

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FACTS CİHAZLARI KULLANILAN ELEKTRİK GÜÇ  
SİSTEMLERİNDE ENERJİ FONKSİYONU İLE  
GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet ÇİFCİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU**

**Kasım 2015**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

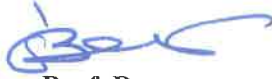
FACTS CİHAZLARI KULLANILAN ELEKTRİK GÜÇ  
SİSTEMLERİNDE ENERJİ FONKSİYONU İLE  
GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Ahmet ÇİFCİ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜH.

Bu tez 06 / 11 /2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~  
ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Şerafettin ÖZBEY  
Jüri Başkanı



Doç. Dr.  
Yılmaz UYAROĞLU  
Üye



Doç. Dr.  
Ahmet ZENGİN  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Muhammer İLKUÇAR  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Mesud KAHRIMAN  
Üye

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalıŐmasının hazırlanmasında, değerli bilgileri ve fikirleri ile katkı sağlayan, çalışmalarında desteklerini esirgemeyen, ulusal ve uluslararası birçok yayın faaliyetlerimizde teŐviki, enerjisi ve fedakârlıklarıyla, akademik özgüven hissini fazlasıyla bende oluşturan, çok saygıdeğer hocam Doç. Dr. Yılmaz UYAROğLU'na teŐekkürü bir borç bilirim.

Tez çalıŐmam süresince göstermiŐ oldukları özveri, anlayıŐ ve sabırlarından dolayı anneme, babama, sevgili kardeŐime ve eŐine teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| TEŞEKKÜR.....                        | ii    |
| İÇİNDEKİLER.....                     | iii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | x     |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                | xiii  |
| TABLolar LİSTESİ.....                | xviii |
| ÖZET.....                            | xxii  |
| SUMMARY.....                         | xxiii |

## BÖLÜM 1.

|   |   |
|---|---|
| GİRİŞ.....                                    | 1 |
| 1.1. Giriş.....                               | 1 |
| 1.2. Tezin İçeriği ve Literatür Taraması..... | 4 |
| 1.3. Tezin Organizasyonu.....                 | 7 |

## BÖLÜM 2.

|  |    |
|--|----|
| ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI.....          | 9  |
| 2.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kararlılık.....              | 9  |
| 2.2. Güç Sistemi Kararlılığının Sınıflandırılması.....       | 10 |
| 2.2.1. Rotor açısı kararlılığı.....                          | 11 |
| 2.2.2. Frekans kararlılığı.....                              | 14 |
| 2.3. Gerilim Kararlılığının Tanımı ve Sınıflandırılması..... | 14 |
| 2.3.1. Gerilim kararlılığının tanımı.....                    | 16 |
| 2.3.1.1. CIGRE tanımı.....                                   | 16 |
| 2.3.1.2. IEEE tanımı.....                                    | 17 |
| 2.3.1.3. IEEE ve CIGRE ortak tanımı.....                     | 17 |
| 2.3.2. Gerilim kararlılığının sınıflandırılması.....         | 17 |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.2.1. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı.....                   | 17 |
| 2.3.2.2. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı.....                   | 18 |
| 2.3.2.3. Kısa süreli gerilim kararlılığı.....                         | 18 |
| 2.3.2.4. Uzun süreli gerilim kararlılığı.....                         | 18 |
| 2.4. Rotor Açılı Kararlılığı ile Gerilim Kararlılığının İlişkisi..... | 19 |
| 2.5. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri.....                       | 21 |
| 2.5.1. Gerilim kararlılığı analizinde P-V eğrileri.....               | 23 |
| 2.5.2. Gerilim kararlılığı analizinde Q-V eğrileri.....               | 24 |
| 2.6. Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmeleri.....                         | 25 |
| 2.6.1. Dünyada meydana gelmiş gerilim çökmesi olayları.....           | 29 |

### BÖLÜM 3.

|  |    |
|--|----|
| LYAPUNOV KARARLILIK TEORİSİ.....   | 31 |
| 3.1. Giriş.....  | 31 |
| 3.2. Lyapunov'un İkinci Metodu.....  | 32 |
| 3.3. Kararlılığa İlişkin Tanım ve Teoremler.....   | 33 |
| 3.3.1. Lyapunov anlamında kararlılık.....  | 34 |
| 3.3.2. Asimptotik kararlılık.....  | 35 |
| 3.3.3. Kararsızlık.....  | 35 |
| 3.3.4. Skaler fonksiyonun pozitif, negatif, pozitif yarı, negatif yarı<br>belirliği ve belirsizliği..... | 36 |
| 3.3.5. Kuadratik form.....   | 38 |
| 3.4. Lyapunov'un Asıl Kararlılık Teoremi.....  | 38 |
| 3.5. Lyapunov Fonksiyonlarının Elde Edilmesine İlişkin Metotlar.....                                     | 42 |
| 3.5.1. Krasovskii metodu.....  | 43 |
| 3.5.2. Ingwerson metodu.....   | 44 |
| 3.5.3. Zubov metodu.....   | 45 |
| 3.5.4. Değişken gradiyent metodu.....  | 47 |

### BÖLÜM 4.

|  |    |
|--|----|
| ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ..... | 51 |
| 4.1. Giriş.....                              | 51 |
| 4.2. FACTS Kavramı.....                      | 52 |

|   |    |
|---|----|
| 4.3. FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması.....  | 53 |
| 4.3.1. Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları.....                               | 53 |
| 4.3.2. Güç sistemine bağlanma şekillerine göre FACTS cihazları....                      | 55 |
| 4.3.2.1. Seri bağlı FACTS cihazları.....  | 55 |
| 4.3.2.2. Paralel bağlı FACTS cihazları.....   | 56 |
| 4.3.2.3. Birleşik yapıli seri-seri bağlı FACTS cihazları.....                           | 56 |
| 4.3.2.4. Birleşik yapıli seri-paralel bağlı FACTS cihazları.....                        | 57 |
| 4.4. FACTS Cihazlarının Yapıları ve Çalışma Prensipleri.....                            | 59 |
| 4.4.1. Statik VAR kompanzatör (SVC).....  | 60 |
| 4.4.1.1. Tristör kontrollü reaktör (TCR).....   | 62 |
| 4.4.1.2. Tristör anahtarlamaı kapasitör (TSC).....                                      | 66 |
| 4.4.1.3. Sabit kapasitör ile tristör kontrollü reaktör (FC-TCR)                         | 70 |
| 4.4.1.4. Tristör kontrollü reaktör ile tristör anahtarlamaı kapasitör<br>(TCR-TSC)..... | 73 |
| 4.4.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM).....  | 76 |
| 4.4.3. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC).....                                     | 79 |
| 4.4.4. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC).....                                      | 81 |
| 4.4.5. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC).....                                   | 82 |
| 4.4.6. Hatlararası güç akış kontrolörü (IPFC).....                                      | 83 |
| 4.5. FACTS Cihazlarının Olumlu ve Olumsuz Etkileri.....                                 | 84 |

## BÖLÜM 5.

|  |    |
|--|----|
| ENERJİ FONKSİYONU ANALİZİ.....   | 87 |
| 5.1. Giriş.....  | 87 |
| 5.2. SVC'siz ve SVC'li Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji<br>Fonksiyonu Analizi..... | 88 |
| 5.2.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun<br>incelenmesi.....            | 94 |
| 5.2.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun<br>incelenmesi.....          | 95 |
| 5.2.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun<br>incelenmesi.....          | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 98  |
| 5.2.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 99  |
| 5.2.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                 | 105 |
| 5.2.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....               | 106 |
| 5.2.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....               | 108 |
| 5.2.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....               | 109 |
| 5.2.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....              | 110 |
| 5.3. SVC'sız ve SVC'li İndirgenmiş Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi..... | 113 |
| 5.3.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                        | 115 |
| 5.3.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 116 |
| 5.3.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 117 |
| 5.3.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 118 |
| 5.3.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                      | 119 |
| 5.3.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                 | 122 |
| 5.3.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....               | 123 |
| 5.3.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....               | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 125 |
| 5.3.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                    | 126 |
| 5.4. SVC'siz ve SVC'li Değiştirilmiş Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi.....     | 128 |
| 5.4.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                              | 130 |
| 5.4.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 131 |
| 5.4.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 133 |
| 5.4.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 135 |
| 5.4.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 136 |
| 5.4.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                       | 140 |
| 5.4.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 142 |
| 5.4.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 143 |
| 5.4.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 145 |
| 5.4.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                    | 146 |
| 5.5. SVC'siz ve SVC'li Dört Baralı Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi.....                              | 156 |
| 5.5.1. Üç numaralı baradaki yük sabitken dört numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı..... | 160 |
| 5.5.1.1. $\delta_2=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 160 |



|   |     |
|---|-----|
| 5.5.1.2. $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 161 |
| 5.5.1.3. $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 162 |
| 5.5.1.4. $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 163 |
| 5.5.1.5. $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 164 |
| 5.5.1.6. $\delta_2=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 168 |
| 5.5.1.7. $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                   | 169 |
| 5.5.1.8. $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                   | 170 |
| 5.5.1.9. $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                   | 171 |
| 5.5.1.10. $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                  | 172 |
| 5.5.2. Dört numaralı baradaki yük sabitken üç numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı..... | 173 |
| 5.5.2.1. $\delta_2=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                            | 173 |
| 5.5.2.2. $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 174 |
| 5.5.2.3. $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 175 |
| 5.5.2.4. $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 176 |
| 5.5.2.5. $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                          | 177 |
| 5.5.2.6. $\delta_2=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....                     | 181 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.5.2.7. $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....  | 182 |
| 5.5.2.8. $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....  | 183 |
| 5.5.2.9. $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi.....  | 184 |
| 5.5.2.10. $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi..... | 185 |

## BÖLÜM 6.

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 186 |
| KAYNAKLAR.....            | 189 |
| EKLER.....                | 206 |
| ÖZGEÇMİŞ.....             | 215 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|       |  |
|-------|--|
| AC    | : Alternatif akım                                |
| ASVC  | : Gelişmiş statik VAr kompanzator                |
| B     | : Süseptans                                      |
| C     | : Kapasitör                                      |
| CIGRE | : Büyük Elektrik Sistemleri Uluslararası Konseyi |
| D     | : Generatörün sönümlenme katsayısı               |
| DC    | : Doğru akım                                     |
| E     | : Generatör gerilimi                             |
| EPRI  | : Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü               |
| FACTS | : Esnek alternatif akım iletim sistemleri        |
| FC    | : Sabit kapasitör                                |
| FR    | : Sabit reaktör                                  |
| G.K.  | : Gerilim kararlılığı                            |
| GTO   | : Kapıdan kesimli tristör                        |
| HVDC  | : Yüksek gerilim doğru akım                      |
| IEC   | : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu           |
| IEEE  | : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü  |
| IGBT  | : İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör   |
| IGCT  | : Entegre kapı komütatörlü tristör               |
| IPFC  | : Hatlararası güç akış kontrolörü                |
| L     | : Endüktans                                      |
| M     | : Generatör atalet momenti                       |
| MCT   | : MOS kontrollü tristör                          |
| MSC   | : Mekanik anahtarlı kapasitör                    |
| MSR   | : Mekanik anahtarlı reaktör                      |
| P     | : Aktif güç                                      |

|                  |  |
|------------------|--|
| Q                | : Reaktif güç                                |
| SSSC             | : Statik senkron seri kompanzatör            |
| STATCOM          | : Statik senkron kompanzatör                 |
| STATCON          | : Statik kondenser                           |
| SVC              | : Statik VAr kompanzatör                     |
| T                | : Motorun zaman sabiti                       |
| TCR              | : Tristör kontrollü reaktör                  |
| TSC              | : Tristör anahtarlama kapasitör              |
| TSR              | : Tristör anahtarlama reaktör                |
| TCPS             | : Tristör kontrollü faz kaydırıcı            |
| TCSC             | : Tristör kontrollü seri kapasitör           |
| ULTC             | : Yük altında kademe değiştirici             |
| UPFC             | : Birleştirilmiş güç akış kontrolörü         |
| V                | : Yük gerilimi                               |
| VSC              | : Gerilim kaynaklı çevirici                  |
| $\omega$         | : Açısal hız                                 |
| X                | : Reaktans                                   |
| X*               | : Denge noktaları                            |
| Z                | : Yük empedansı                              |
| $\cos\phi$       | : Güç faktörü                                |
| b <sub>13</sub>  | : Dört baralı sistemin sabit parametresi     |
| b <sub>14</sub>  | : Dört baralı sistemin sabit parametresi     |
| b <sub>23</sub>  | : Dört baralı sistemin sabit parametresi     |
| b <sub>24</sub>  | : Dört baralı sistemin sabit parametresi     |
| E <sub>0</sub>   | : Sonsuz bara gerilimi                       |
| E <sub>m</sub>   | : Senkron generatör gerilimi                 |
| K <sub>qv</sub>  | : Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler |
| K <sub>qw</sub>  | : Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler |
| K <sub>qv2</sub> | : Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler |
| K <sub>pv</sub>  | : Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler |
| K <sub>pw</sub>  | : Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler |
| K <sub>SVC</sub> | : SVC'nin kazancı                            |
| P <sub>0</sub>   | : Aktif gücün başlangıç güç değeri           |

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| $P_1$      | : PQ yükünün aktif gücü              |
| $P_m$      | : Generatör mekanik gücü             |
| $Q_0$      | : Reaktif gücün başlangıç güç değeri |
| $Q_1$      | : PQ yükünün reaktif gücü            |
| $T_{SVC}$  | : SVC'nin zaman sabiti               |
| $V_{ref}$  | : Referans gerilimi                  |
| $Y_0$      | : Sonsuz bara admitansı              |
| $Y_m$      | : Senkron generatör admitansı        |
| $t_0$      | : Başlangıç zamanı                   |
| $x$        | : Durum vektörü                      |
| $\dot{x}$  | : Durum değişkeni türevi             |
| $x_0$      | : Başlangıç durum vektörü            |
| $\alpha$   | : Tristör tetikleme açısı            |
| $\sigma$   | : Tristör iletimde kalma açısı       |
| $\delta$   | : Yük açısı                          |
| $\delta_m$ | : Senkron generatör açısı            |
| $\theta_0$ | : Sonsuz bara admitans açısı         |
| $\theta_m$ | : Senkron generatör admitans açısı   |
| $\omega_m$ | : Açısal hız                         |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.1.  | Güç sisteminin kararlılığının sınıflandırılması.....  | 11 |
| Şekil 2.2.  | Gerilim kararlılığı olayları ve zaman cevapları.....  | 19 |
| Şekil 2.3.  | Uç durumları gösteren örnekler.....   | 20 |
| Şekil 2.4.  | Gerilim kararlılığı analizi yöntemleri.....   | 22 |
| Şekil 2.5.  | Sonsuz güçlü kaynak ve yük için normalize edilmiş P-V eğrileri.                             | 24 |
| Şekil 2.6.  | Sonsuz büyük kaynak ve yük için normalize edilmiş Q-V eğrileri                              | 25 |
| Şekil 2.7.  | Elektrik güç sistem kesintilerinin tipik bir düzeneği.....                                  | 28 |
| Şekil 3.1.  | Kararlı, asimptotik kararlı ve kararsızlık denge noktaları ve yörüngelerin gösterilimi..... | 36 |
| Şekil 3.2.  | Pozitif belirli bir fonksiyonun karakteristik şekli.....                                    | 37 |
| Şekil 4.1.  | FACTS cihazlarının genel sembolü.....   | 52 |
| Şekil 4.2.  | İletim hattına seri bağlı FACTS cihazı.....   | 55 |
| Şekil 4.3.  | İletim hattına paralel bağlı FACTS cihazı.....  | 56 |
| Şekil 4.4.  | İletim hattına seri-seri bağlı FACTS cihazları.....   | 57 |
| Şekil 4.5.  | İletim hattına seri-paralel, birbirlerine koordineli bağlı FACTS cihazları.....             | 58 |
| Şekil 4.6.  | İletim hattına seri-paralel, birbirlerine DA hattı ile bağlı FACTS cihazları.....           | 58 |
| Şekil 4.7.  | SVC genel bağlantı yapısı.....  | 60 |
| Şekil 4.8.  | Bir SVC tasarımının yerleşim planı.....   | 61 |
| Şekil 4.9.  | Temel TCR devresi.....  | 62 |
| Şekil 4.10. | TCR'ye ait akım ve gerilim dalga biçimleri.....   | 63 |
| Şekil 4.11. | V-I çalışma bölgesi karakteristiği.....   | 66 |
| Şekil 4.12. | TSC'ye ait basit bir güç sistem modeli, akım ve gerilim dalga biçimleri.....                | 67 |
| Şekil 4.13. | Seri reaktörlü TSC devresi.....   | 68 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Şekil 4.14. | TSC'ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği.....                       | 70  |
| Şekil 4.15. | Temel FC-TCR devresi.....  | 70  |
| Şekil 4.16. | FC-TCR'nin VAr çıkışı ile kayıp karakteristiği.....                      | 71  |
| Şekil 4.17. | FC-TCR'nin VAr çıkışı ile VAr talebi karakteristiği.....                 | 72  |
| Şekil 4.18. | FC-TCR'ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği.....                    | 73  |
| Şekil 4.19. | Temel TCR-TSC devresi.....   | 74  |
| Şekil 4.20. | TCR-TSC'nin VAr çıkışı ile VAr talebi karakteristiği.....                | 75  |
| Şekil 4.21. | TCR-TSC'nin VAr çıkışı ile kayıp karakteristiği.....                     | 75  |
| Şekil 4.22. | İki TSC'li TCR-TSC'ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği....         | 76  |
| Şekil 4.23. | STATCOM genel bağlantı yapısı.....                                       | 77  |
| Şekil 4.24. | STATCOM V-I karakteristiği.....  | 78  |
| Şekil 4.25. | TCSC genel bağlantı yapısı.....  | 79  |
| Şekil 4.26. | TCSC X-I karakteristiği.....   | 80  |
| Şekil 4.27. | SSSC genel bağlantı yapısı.....  | 81  |
| Şekil 4.28. | UPFC genel bağlantı yapısı.....  | 82  |
| Şekil 4.29. | İki çeviricili IPFC genel bağlantı yapısı.....                           | 83  |
| Şekil 5.1.  | Tek makine sonsuz bara güç sistemi.....                                  | 88  |
| Şekil 5.2.  | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....             | 94  |
| Şekil 5.3.  | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....           | 96  |
| Şekil 5.4.  | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....           | 97  |
| Şekil 5.5.  | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....           | 99  |
| Şekil 5.6.  | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....           | 100 |
| Şekil 5.7.  | SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi.....                           | 101 |
| Şekil 5.8.  | SVC modeli.....  | 102 |
| Şekil 5.9.  | SVC blok diyagramı.....  | 102 |
| Şekil 5.10. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....      | 105 |
| Şekil 5.11. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....    | 107 |
| Şekil 5.12. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....    | 108 |
| Şekil 5.13. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....    | 110 |
| Şekil 5.14. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....    | 111 |
| Şekil 5.15. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu..... | 115 |
| Şekil 5.16. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu... | 116 |
| Şekil 5.17. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu... | 117 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Şekil 5.18. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu...                   | 118 |
| Şekil 5.19. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu....                  | 119 |
| Şekil 5.20. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu.....            | 122 |
| Şekil 5.21. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu.....          | 123 |
| Şekil 5.22. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu.....          | 124 |
| Şekil 5.23. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu.....          | 125 |
| Şekil 5.24. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu.....          | 126 |
| Şekil 5.25. | Değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi.....                                      | 128 |
| Şekil 5.26. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....                 | 130 |
| Şekil 5.27. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu..                  | 132 |
| Şekil 5.28. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu..                  | 133 |
| Şekil 5.29. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu..                  | 135 |
| Şekil 5.30. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu..                  | 136 |
| Şekil 5.31. | SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi.....                               | 138 |
| Şekil 5.32. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....          | 140 |
| Şekil 5.33. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....        | 142 |
| Şekil 5.34. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....        | 143 |
| Şekil 5.35. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....        | 145 |
| Şekil 5.36. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu.....        | 146 |
| Şekil 5.37. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi.....   | 149 |
| Şekil 5.38. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi..... | 150 |



|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Şekil 5.39. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi.....        | 151 |
| Şekil 5.40. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi.....        | 151 |
| Şekil 5.41. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi.....        | 152 |
| Şekil 5.42. | $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi.....   | 153 |
| Şekil 5.43. | $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi..... | 154 |
| Şekil 5.44. | $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi..... | 154 |
| Şekil 5.45. | $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi..... | 155 |
| Şekil 5.46. | $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi..... | 156 |
| Şekil 5.47. | Dört baralı güç sistemi.....  | 157 |
| Şekil 5.48. | $\delta_2=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                      | 160 |
| Şekil 5.49. | $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 161 |
| Şekil 5.50. | $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 162 |
| Şekil 5.51. | $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 163 |
| Şekil 5.52. | $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 164 |
| Şekil 5.53. | SVC'li dört baralı güç sistemi.....   | 165 |
| Şekil 5.54. | $\delta_2=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....                               | 168 |
| Şekil 5.55. | $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....                             | 169 |
| Şekil 5.56. | $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....                             | 170 |
| Şekil 5.57. | $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....                             | 171 |
| Şekil 5.58. | $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu.....                             | 172 |
| Şekil 5.59. | $\delta_2=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                      | 173 |
| Şekil 5.60. | $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 174 |
| Şekil 5.61. | $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 175 |
| Şekil 5.62. | $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 176 |
| Şekil 5.63. | $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu.....                                    | 177 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Şekil 5.64. | SVC’li dört baralı güç sistemi.....                                   | 178 |
| Şekil 5.65. | $\delta_2=0$ rad seçildiğinde SVC’li sistemin enerji yoğunluğu.....   | 181 |
| Şekil 5.66. | $\delta_2=0.4$ rad seçildiğinde SVC’li sistemin enerji yoğunluğu..... | 182 |
| Şekil 5.67. | $\delta_2=0.8$ rad seçildiğinde SVC’li sistemin enerji yoğunluğu..... | 183 |
| Şekil 5.68. | $\delta_2=1.2$ rad seçildiğinde SVC’li sistemin enerji yoğunluğu..... | 184 |
| Şekil 5.69. | $\delta_2=1.6$ rad seçildiğinde SVC’li sistemin enerji yoğunluğu..... | 185 |

## TABLULAR LİSTESİ

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Tablo 2.1. | Güç sistemi kararlılığının genel olarak sınıflandırılması.....                                | 10  |
| Tablo 2.2. | Dünyada meydana gelmiş gerilim çökmesi olaylarından bazıları.                                 | 29  |
| Tablo 4.1. | Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları grupları ve anahtarlama cevapları.....          | 53  |
| Tablo 4.2. | FACTS cihazlarının sınıflandırılması ve kontrol nitelikleri.....                              | 59  |
| Tablo 4.3. | Güç sisteminin çalışmasında FACTS cihazlarının rolü.....                                      | 85  |
| Tablo 4.4. | Geleneksel cihazlar ile FACTS cihazlarının maliyet karşılaştırması.....                       | 86  |
| Tablo 5.1. | $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (tek makine sonsuz bara güç sistemi).....          | 95  |
| Tablo 5.2. | $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 96  |
| Tablo 5.3. | $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 98  |
| Tablo 5.4. | $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 99  |
| Tablo 5.5. | $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 101 |
| Tablo 5.6. | $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi).....   | 106 |
| Tablo 5.7. | $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 107 |
| Tablo 5.8. | $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 109 |
| Tablo 5.9. | $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 110 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tablo 5.10. | $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi).....             | 112 |
| Tablo 5.11. | $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....          | 116 |
| Tablo 5.12. | $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 117 |
| Tablo 5.13. | $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 118 |
| Tablo 5.14. | $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 119 |
| Tablo 5.15. | $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 120 |
| Tablo 5.16. | $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....   | 123 |
| Tablo 5.17. | $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 124 |
| Tablo 5.18. | $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 125 |
| Tablo 5.19. | $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 126 |
| Tablo 5.20. | $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi)..... | 127 |
| Tablo 5.21. | $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....        | 131 |
| Tablo 5.22. | $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....      | 133 |
| Tablo 5.23. | $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....      | 134 |
| Tablo 5.24. | $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....      | 136 |
| Tablo 5.25. | $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....      | 137 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablo 5.26. $\delta_m=0$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....                       | 141 |
| Tablo 5.27. $\delta_m=0.4$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....                     | 143 |
| Tablo 5.28. $\delta_m=0.8$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....                     | 144 |
| Tablo 5.29. $\delta_m=1.2$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....                     | 146 |
| Tablo 5.30. $\delta_m=1.6$ rad durumu için enerji ölçümü (SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi).....                     | 147 |
| Tablo 5.31. $\delta_2=0$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken).....                      | 161 |
| Tablo 5.32. $\delta_2=0.4$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 162 |
| Tablo 5.33. $\delta_2=0.8$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 163 |
| Tablo 5.34. $\delta_2=1.2$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 164 |
| Tablo 5.35. $\delta_2=1.6$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 165 |
| Tablo 5.36. $\delta_2=0$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi).....   | 168 |
| Tablo 5.37. $\delta_2=0.4$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 169 |
| Tablo 5.38. $\delta_2=0.8$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 170 |
| Tablo 5.39. $\delta_2=1.2$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 171 |
| Tablo 5.40. $\delta_2=1.6$ rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü (üç numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 172 |
| Tablo 5.41. $\delta_2=0$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken).....                      | 174 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablo 5.42. $\delta_2=0.4$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 175 |
| Tablo 5.43. $\delta_2=0.8$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 176 |
| Tablo 5.44. $\delta_2=1.2$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 177 |
| Tablo 5.45. $\delta_2=1.6$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken).....                    | 178 |
| Tablo 5.46. $\delta_2=0$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi).....   | 181 |
| Tablo 5.47. $\delta_2=0.4$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 182 |
| Tablo 5.48. $\delta_2=0.8$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 183 |
| Tablo 5.49. $\delta_2=1.2$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 184 |
| Tablo 5.50. $\delta_2=1.6$ rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü (dört numaralı baradaki yük sabitken SVC'li güç sistemi)..... | 185 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Değişken Gradyent Metodu, Gerilim Kararlılığı, Güç Sistemleri, Lyapunov (Enerji) Fonksiyonu, Statik VAr Kompanzator

Güç sistem kararlılığı, elektrik güç sistem işleyişinde hayati ve önemli bir konu olarak kabul edilmektedir. Gerilim kararsızlığıyla oluşan dünyada meydana gelen büyük çaplı şebeke çökmeleri bu konunun önemini göstermektedir. Elektrik yüklerinde meydana gelen sürekli büyüme, bugünün iletim sistemlerinin kararlılık limitlerine yakın çalışmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, gerilim kararlılığı giderek büyüyen güç sistemlerinde daha fazla ilgilenilen bir konu haline gelmiştir. Yarı iletken güç elektroniğinde meydana gelen hızlı gelişmeler esnek alternatif akım iletim sistemlerinin (FACTS) ortaya çıkmasını sağlamıştır. FACTS cihazları içerisinde SVC, gerilim kararlılığını arttırmada kullanılan, en bilinen ve en önemli FACTS cihazıdır.

Bu tezde, statik VAr kompanzatorün gerilim kararlılığının iyileştirilmesine etkileri tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistemi üzerinde enerji fonksiyonu analizi kullanılarak incelenmiştir. İlk önce, güç sistem modellerinin SVC'siz durumları araştırılmıştır. Daha sonra enerji fonksiyonu analizi SVC'li güç sistem modellerine tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Son olarak SVC'li ve SVC'siz güç sistem modellerinin gerilim kararlılığı ve SVC'nin etkileri tartışılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda, farklı seviyelerdeki sistem çalışmaları gösterilmiş ve değişken gradyent metodun kullanılmasıyla güç sistemlerinin kararlılık tavrını açıkça gösterebilecek daha uygun bir enerji fonksiyonunun elde edilebileceği ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlardan, güç sistemlerine SVC'nin eklenmesiyle güç sistemlerinin kararlılık sınırlarının önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

# **VOLTAGE STABILITY ANALYSIS BASED ENERGY FUNCTION OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS INCORPORATING FACTS DEVICES**

## **SUMMARY**

Keywords: Lyapunov (Energy) Function, Power Systems, Static VAR Compensator, Variable Gradient Method, Voltage Stability

Power system stability has been acknowledged as a vital and important issue in electric power system operation. Many major network collapses throughout the world caused by power system instability have illustrated the significance of this phenomenon. Due to the continuous growth of electrical loads, today's transmission systems are operated near their stability limits. In this regard, voltage stability has become of greater concern in a growing number of power systems. The fast development of semiconductor power electronic devices has led to the application of Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). Among the several FACTS devices, SVC is one of the most important and well-known FACTS devices for the effective enhancement of voltage stability.

In this thesis, the effectiveness of static VAR compensator (SVC) on voltage stability enhancement is studied on a single-machine infinite-bus power system, a reduced model of a single-machine infinite-bus power system, a modified model of a single-machine infinite-bus power system and four-bus power system through energy function analysis. Firstly, voltage stability of the power system models without SVC is investigated. The impact of small and gradual changes in the system is analysed. More, energy function analysis is repeated for the power system models with SVC. The simulation results are compared on power systems. Finally, voltage stability of the power system models with and without SVC and the effect of SVC are discussed.

According to the results of this study, system works in the different levels have shown and this thesis exhibited that a suitable energy function by using variable gradient method, which can clearly show the stability of power systems, can be reached. The results obtained show that stability margins of power systems are significantly extended with the inclusion of SVC.



# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın artması ile birlikte daha büyük ve daha karmaşık hale gelen elektrik güç sistemleri birçok sorunla karşı karşıyadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde yük talebi hızla artmaktadır. Sürekli yük artımı ile birlikte ekonomik ve çevresel etkiler güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı önemli bir konu olmaya başlamıştır [1]. Kararlılık, elektrik güç sisteminin yük artışı, üretimin azalması, hatların devre dışı kalması, paralel hatlarda açmaların meydana gelmesi, kısa devre ve yıldırım darbesi etkileri gibi bir bozucu etkiye maruz kalması durumunda, bu etki ortadan kalktıktan sonra bozucu etki öncesindeki çalışma koşuluna dönebilmesidir [2]. Kararlılık kelimesi dinamik bir sistemi ifade eder. Elektrik güç sistemlerinin planlanması, tesis edilmesi, işletilmesi ve kontrolünde kararlılık çalışmalarının yapılması ile güç sisteminin kararlılık sınır değerlerini aşmadan çalıştırılması amaçlanır. Kararlılığın değerlendirilmesinde önemli olan, geçici bir bozucu etki ile karşılaşıldığında güç sisteminin göstereceği tepkidir. Güç sisteminde oluşan bozulmalar küçük veya büyük boyutta olabilir. Önemli olan güç sisteminin bu değişen şartlara göre kendisini ayarlayabilmesidir.

Bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli hal gerilim kararlılığı gerekse geçici hal gerilim kararlılığı olaylarında belirli işletme sınırları içinde tutabilme yeteneği gerilim kararlılığı olarak ifade edilir [3]. Son yıllarda, dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen gerilim kararlılığı problemi nedenli olumsuz durumlar, çoğu enerji sisteminin çökmesine sebep olmuştur ve gerilim kararlılığı konusundaki çalışmaların artmasını beraberinde getirmiştir. Normal çalışma şartları sırasında üretim yerinden tüketim yerine reaktif gücün iletilebilme kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Güç sistemlerinde

oluşabilecek gerilim düşümünü karşılayabilecek reaktif gücün üretilerek güç sistemine verilememesi sonucunda sistemin bir bölümünde veya tamamında bir gerilim çökmesi meydana gelecektir. Genellikle gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi araştırmacılar tarafından aynı anlamda kullanılmaktadır. Gerilim kararsızlığı veya gerilim çökmesi dinamik bir süreç olsa da, çoğunlukla statik (yük akışı) analize uygun olarak bir sürekli hal problemi olarak görülmesi uygun bir yoldur.

Klasik anlamda kararlılık analizi çalışmaları aktif güç – yük açısı ( $P - \delta$ ) arasındaki ilişkiye odaklanırken, gerilim kararlılığı çalışmalarında reaktif güç – gerilim genliği ( $Q - V$ ) ilişkisi ön plana çıkmaktadır. Gerilim kararlılığı çalışmalarının klasik yolu, sürekli hal gerilim kararlılığına yani statik yük akışı analizlerine dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar genellikle, yük baralarının aktif güç değerleri ile gerilim genlik değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren  $P - V$  eğrileri ile gösterilmektedir.  $P - V$  eğrisi üzerinde sistemin kararsızlık sınır değerleri açıkça görülebildiğinden statik analizler gerilim çökmesinden korunmak için faydalı olmaktadır. Ancak statik yük akışı analizleri gerilim kararlılığının dinamik davranışı hakkında yeterli bilgi veremeyeceğinden, dinamik yük akışı analizlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir [4].

Güç elektroniğinde yaşanan son gelişmeler elektrik güç sistemlerinde kullanılan esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS) cihazlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. FACTS cihazları esnek olduklarından ve hızlı kontrol karakteristiklerine sahip olduklarından güç şebekesinin gerilim kararlılığı sınırlarını arttırmaları. Ayrıca, FACTS cihazları elektrik iletim maliyetlerini düşürmekte, güç osilasyonlarını ve reaktif güç akışını azaltmakta ve böylece hattın daha fazla aktif güç taşımalarını sağlamaktadır [5]. Reaktif güç dengesi gerilim kararlılığı ile sağlanır. Bunun için de FACTS cihazları kullanılmaktadır.

Güç sisteminin uygun yerlerine paralel kapasitörler ve/veya FACTS cihazları eklenerek gerilim kararsızlığı veya çökmesi sorunları azaltılabilir. FACTS cihazlarının uygulamalarda kullanılmasıyla gerilim kararlılığına etkisinin oldukça iyi olduğu görülmüştür. Geleneksel yöntemlerden biri olan paralel kapasitör kullanma

gerilim kararlılığını arttırmasıyla birlikte gerilim regülasyon özelliklerinin iyi olmaması ve belli bir kompanzasyon seviyesinin üzerinde kararlı bir çalışma noktası elde edilememesi nedeniyle problemler oluşturmaktadır [6,7].

Çeşitli FACTS cihazları arasından statik VAr kompanzator (Static VAr Compensator – SVC), gerilim kararlılığını etkileyici bir şekilde arttırma özelliği olan en önemli ve en bilinen FACTS cihazlarından biridir. SVC geçici hal kararlılığını iyileştirmek için reaktif güç kompanze edebilir, sistem kayıplarını azaltabilir ve istenmeyen güç salınımlarını sönmüleyebilir. SVC'lerin geleneksel yöntemlere göre üstünlükleri oldukça fazladır. SVC ayarlanabilir bir süseptans modeli olarak ele alınabilir. SVC sınır değerlerde çalıştırıldığında sabit empedans ve kapasitör karakteristiği gösterir. Normal çalıştırıldığında ise gerilim-akım çalışma bölgesi karakteristiği oldukça iyidir. Bu nedenle gerilim regülasyonu ve kararlılık problemlerini çözmek için mevcut FACTS cihazları içinde SVC'ler kritik sistem durumlarında gerilim kararlılığını sağlamak için etkin bir biçimde kullanılırlar.

Elektrik güç sistemleri genellikle sistem parametrelerini içeren doğrusal olmayan dinamik denklemlerle ifade edilirler. Sistemin herhangi bir parametresindeki herhangi bir değişiklik doğrusal olmayan dinamik sistemin davranışını etkileyebilir. Dolayısıyla, sistem parametre değişiklikleri sistemin kararsızlığıyla sonuçlanabilir. Lyapunov kararlılık teoremleri kararlılık için yeterli koşulları verir. Lyapunov kararlılık teoremlerinden biri olan Lyapunov'un ikinci metodu veya Lyapunov'un doğrudan metodu dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağı veren önemli bir yaklaşımdır. Lyapunov, hayali bir enerji fonksiyonu olan Lyapunov fonksiyonunu ortaya atmıştır. Lyapunov (enerji) fonksiyonu kararlılık bölgesinin kesin bir tahminini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Lyapunov fonksiyonunu oluşturabilecek uygulanabilir genel bir yöntem yoktur. Bazı yaklaşımlar Lyapunov fonksiyonunu elde etmek için uygundur. Bunlardan birisi mantıksal ve sistematik bir metot olan değişken gradyent metodudur. Bu metot, bilinmeyen bir Lyapunov fonksiyonunun gradyenti için kesin bir form varsayımını içermektedir ve varsayılan gradyentin integrali ile Lyapunov fonksiyonunun kendisinin bulunmasıdır.

## 1.2. Tezin İçeriği ve Literatür Taraması

Bu çalışmada güç sistem modelleri olarak Dobson ve arkadaşları [8] tarafından tanıtılan ve literatürde çokça çalışılan tek makine sonsuz bara güç sistemi [9-29], Abed ve arkadaşları [30] tarafından önerilen indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi, Wang ve arkadaşları [31] tarafından sunulan değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ile yine literatürde yer edinmiş dört baralı güç sistemi [32-37] incelenmiştir. Lyapunov'un ikinci metoduyla ortaya çıkan değişken gradiyent metot yukarıda sayılan güç sistemlerine uygulanarak, sistemlerin enerji fonksiyonu oluşturulmuş ve böylece sistemlerdeki enerji seviye değişikliklerinin sistemlerin gerilim kararlılığına etkisi gösterilmiştir. Enerji fonksiyonu analizi ile ilgili yapılan çalışmalar [38-48]'de bulunabilir. Bununla birlikte, literatürde yer edinen gerilim kararlılığını arttırma amaçlı SVC içeren çalışmalara [17,20,22,23,27-29,33-35,37,49-57] istinaden, yukarıda bahsedilen güç sistemlerine SVC eklenerek enerji fonksiyonları elde edilmiş ve SVC'nin gerilim kararlılığına etkileri gözlemlenmiştir.

Tek makine sonsuz bara ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerinin enerji fonksiyonu analizleri için sayısal simülasyon çalışmaları MATHCAD [58] programı, indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistem modellerinin enerji fonksiyonu analizleri için ise sayısal simülasyon çalışmaları MACSYMA [59] programı kullanılarak yapılmıştır.

Tripathy [16], gerilim çökmesi olayını incelemek amacıyla tek makine sonsuz bara sistemini kullanarak bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, daha sonra özdeğerler analizinde kullanılacak nominal çalışma noktasını hesaplamak için yük akış çalışması yapılmıştır. Reaktif güç yükünün gerilim kararlılığına etkisi gösterilmiştir. Reaktif gücün aşırı derecede arttırılması sonuç olarak sistemi çökmeye götürdüğü ortaya koyulmuştur.

Wang ve arkadaşları [17], zaman simülasyonu ve çatallaşma analizi ile üç baralı bir güç sisteminin gerilim kararlılığına SVC'nin etkisini incelemişlerdir. Zaman simülasyonu, gerilim çöküşü zamanının SVC ile geciktirildiğini, çatallaşma analizi ise SVC'nin gerilim kararsızlığı ile ilişkili kararsız çatallanmaları ortadan

kaldırabildiğini göstermiştir. Sonuç olarak SVC'nin gerilim kararlılığını etkili bir şekilde arttırdığı kanıtlanmıştır. Benzer bir çalışmayla Kasusky ve arkadaşları [20], çatallaşma teorisine dayalı olarak doğrusal olmayan salınımlar ile gerilim çökmesi arasındaki ilişkiyi ele almışlardır. Hem dinamik ve statik çatallaşmaların hem de kaosun oluşumunu geciktirmek için SVC'nin etkili bir şekilde kullanılabileceğini sayısal örneklerle göstermişlerdir.

Subramanian ve arkadaşları [27] güç sistemlerinde SVC'nin gerilim çökmesi, kaos ve çatallaşma üzerine etkilerinin analizi için yeni bir algoritma önermişlerdir. Çalışmada tek makine sonsuz bara güç sistemi kullanılmıştır. Bu makalede güç sisteminin gerilim kararlılığının artmasını, gerilim çökmesinin gecikmesini ve Hopf çatallaşmalarının yok edilmesini sağlayan SVC'nin yararlılığı analiz edilmiştir. Önerilen algoritmanın güç sisteminin kararlı ve kararsız periyodik bölümlerinin izlenmesi için uygunluğu doğrulanmıştır.

Başka bir çalışmayı da Varan ve arkadaşları [28] yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada gerilim çökmesine giren tek makine sonsuz bara güç sistemi için SVC ile uygun Hopf çatallaşma noktalarının yok edilmesini göstermişlerdir.

Ginarsa ve arkadaşları [29], hem kaotik salınımları hem de gerilim çökmesini kontrol edebilen SVC'li bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemin kaosu ve gerilim çökmesini başarılı bir şekilde kontrol edebildiği ve ortadan kaldırabildiği sonuçlarla sunulmuştur. Ayrıca, SVC ile sağlanan reaktif gücün ayarlanarak yük geriliminin kontrol edilebildiği gösterilmiştir.

Farklı bir çalışmada Hiskens ve Hill [40] enerji fonksiyonuna SVC'nin eklenmesini incelemişlerdir. SVC ve limitlerinin etkilerini içeren geçerli bir enerji fonksiyonu kurulmuştur. Çalışmayla, SVC limitlerinin etkileri gerçek bir güç sisteminden elde edilen kararlılık değerlendirme sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Jiang ve arkadaşları [43], türbin-generatör mili içeren güç sisteminin kararlılık analizinde Lyapunov'un ikinci metodunun potansiyel yararlarını ve geçerliliğini

incelemiştir. Simülasyon sonuçlarıyla Lyapunov'un ikinci metodunun etkinliği gösterilmiştir.

Haque [44], SVC içeren bir güç sisteminin birinci salınım kararlılığını incelemek için enerji fonksiyonunun bir uygulamasını tanıtmıştır. Enerji fonksiyonu hem tek makineli hem de çok makineli güç sistemlerine uygulanmıştır. Enerji fonksiyonu analizinin güç sistemlerinin kararlılık sınırlarının yaklaşık olarak belirlenmesi için kullanımı gösterilmiştir.

Wang ve arkadaşları [49], doğrudan geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi kullanılarak oluşturulmuş SVC'nin gerilim kararlılığına olan etkisini tek makine ve çok makine güç sistemlerinde ele almışlardır. Güç sistemlerinin SVC'li ve SVC'siz durumlarını incelemiştir. SVC'li sistemin Hopf çatallaşmalarını yok edebildiğini ve böylece gerilim kararlılığının önemli ölçüde iyileştirilebildiğini gözlemlemiştir.

Bir diğer çalışmada Gu ve arkadaşları [51] basit bir güç sisteminin kararlılığı üzerine SVC'nin etkilerini açıklamışlardır. İlk önce, SVC'siz sistemin kararlılığını incelemiştir. Analiz çatallaşma diyagramları, küçük sinyal kararlılık analizi ve zaman alanlı benzetimleri içermektedir. SVC'siz güç sistemi bir eyer noktası çatallaşmasını göstermektedir. Sonra, SVC'li güç sistemi için statik ve dinamik analizler tekrar edilmiştir. SVC'nin güç sisteminin yüklenebilirliğini arttırdığı ama bir Hopf çatallaşmasına neden olduğu gösterilmiştir. Benzer bir çalışmada Du ve arkadaşları [55], gerilim kararlılığı ve Hopf çatallaşma analizi üzerinde durmuşlardır. Simülasyon sonuçlarından gerilim kararlılığı sınırlarının arttığını ve Hopf çatallaşmalarının yok edilebildiğini göstermişlerdir.

Nagendra ve arkadaşları [57], farklı çalışma koşullarında gerçek sistemin en uygun güç akışı çözümüyle elde edilen özgün iki bara  $\pi$  tipi şebeke eşdeğer modelini oluşturmuşlar ve bu modeli kullanarak SVC içeren bir güç sisteminin gerilim kararlılığı durumunu incelemek için bir metot sunmuşlardır. SVC'nin gerilim kararlılığı açısından güç sistem performansına etkisini incelemiştir.

Tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistemlerinin gerilim kararlılığını en iyi şekilde tahmin etmek için kullanılacak uygun enerji fonksiyonlarını elde etmek bu tezin en önemli amaçlarından biridir. Uygun enerji fonksiyonlarının oluşturulmasıyla güç sistemlerinin gerilim kararlılığı açık bir şekilde gözlemlenebilecektir. Yukarıda sayılan güç sistemlerine SVC eklenerek, enerji fonksiyonlarının tekrar oluşturulması tezin bir diğer amacıdır. Böylece SVC'li ve SVC'siz güç sistemlerinin gerilim kararlılığı analizleri birbirleriyle kıyaslanabilecektir. Bu çalışma, değişken gradiyent metodu kullanılarak oluşturulan enerji fonksiyonuyla güç sistemlerinin gerilim kararlılığı analizine yeni bir bakış açısı getirmektedir.

### 1.3. Tezin Organizasyonu

Bu tezin organizasyonu aşağıda açıklanan şekilde yapılmıştır:

Bölüm 2'de, elektrik güç sistemlerinde gerilim kararlılığı ve sınıflandırılması ile gerilim çökmesi konuları ele alınmış ve konuyla ilgili temel kavramlar verilmiştir. Bu bölümde [60-101] kaynaklarından faydalanılmıştır.

Lyapunov kararlılık analizine ilişkin tanım ve teoremler bölüm 3'te verilmiştir. Ayrıca, uygun bir enerji fonksiyonu oluşturabilmek için kullanılan metotlar sunulmuştur. Özellikle tezin konusunu oluşturan değişken gradiyent metodun ayrıntılı bir şekilde anlatımı verilmiştir. Bölüm 3'te [102-130] kaynaklarından faydalanılmıştır.

4. bölümde, FACTS kavramıyla ilgili bilgiler verilmiş ve sınıflandırılması yapılmıştır. FACTS cihazlarının yapıları ve çalışma prensipleri ele alınmıştır. Özellikle tezin konusunu oluşturan SVC'nin temel bileşenleri, genel yapısı ve çalışma karakteristiği ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde [131-191] kaynaklarından faydalanılmıştır.

Bölüm 5'te, tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistemlerinin enerji

fonksiyonları değişken gradiyent metodun kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bahsedilen güç sistemlerine SVC eklenerek yine değişken gradiyent metot kullanılarak enerji fonksiyonları çıkarılmıştır. Yük açısı ve yük gerilimine göre SVC'li ve SVC'siz güç sistemlerindeki enerji seviye değişimlerinin analizi yapılmış ve benzetim sonuçları verilmiştir. Yapılan analizlerin benzetim sonuçları ele alınmış ve SVC'li ve SVC'siz güç sistemlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Bölüm 5'te [192-197] kaynaklarından faydalanılmıştır.

Çalışmanın son bölümü olan sonuçlar ve öneriler kısmında, elde edilen bulgular ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Gelecekte yapılabilecek çalışmaların neler olabileceği hakkında öneriler ifade edilmiştir.

Ek A'da, SVC'li ve SVC'siz tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistemlerinin hesaplamalar sonucu bulunan enerji fonksiyonları verilmiştir.



## **BÖLÜM 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI**

### **2.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kararlılık**

Elektrik güç sistem kararlılığının, sistemin güvenli olarak çalışması bakımından önemli bir problem olarak görülmeye başlanması 1920'li yıllara dayanmaktadır [60-62]. Güç sisteminin kararsızlığı sebebiyle oluşan birçok önemli sistem çökmeleri bu problemin önemini ortaya koymuştur [63]. Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bir bozucu etki sonrası tekrar normal denge durumuna dönebilmesidir. Bu tanımlama bütün elektrik şebeke yapısını kapsar.

Güç sistemleri daima değişen şartlara bağlı olarak çalışan doğrusal olmayan sistemlerdir. Güç sistem kararlılığının bozulmasına yol açan birçok küçük ve büyük bozucularla karşı karşıya kalabilirler. Bazı tüketicilerin devreye girmesi veya devreden çıkması gibi küçük bozucular sistemde her zaman görülebilir. Enerji iletim hatlarında oluşan kısa devreler, büyük güçlü üretim birimlerinin veya bir düğüm yükünün aniden devre dışı kalması gibi bozulmalar ise büyük bozuculardır. Güç sistemi değişen şartlara uyum sağlayabilmelidir. Ayrıca, her türlü bozucu etki sonrası tekrar normal denge durumuna dönebilmelidir. Bununla birlikte, denge durumunda bulunan güç sistemi bir bozucu için kararlı kalırken, başka bir bozucu için kararsızlığa gidebilir. Güç sisteminde oluşabilecek her sorun için sistemi her zaman kararlı tutabilecek bir tasarım yapmanın mümkün olmaması sebebiyle, sistem oluşma ihtimali en büyük bozuculara göre tasarlanır.

Güç sistem kararlılık analizleri için sınıflandırma yapmak çok önemlidir. Güç sisteminin kararlılık tanımının daha kesin ve açık bir şekilde yapılması, sınıflandırılması için sistematik bir yaklaşım sağlanması ve güç sistemi güvenilirliği

ile güvenliği gibi konular arasındaki bağlantının ortaya konması amacıyla güç sistem kararlılığının tanımlamalarına ve sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulmuştur [64].

## 2.2. Güç Sistemi Kararlılığının Sınıflandırılması

Güç sistem kararlılığı genel olarak rotor açısı kararlılığı ve gerilim kararlılığı olarak sınıflandırılabilir [64,65]. Kararlılık, bir başka biçimde zaman ve meydana getirdiği etki düşünülerek de sınıflandırılabilir. Zaman ve meydana getirdiği etki düşünülerek verilen bir sınıflandırma tablo 2.1’de gösterilmiştir. Kararsızlığa neden olan etki generatör veya yük kaynaklı olabilir. Zaman ise kısa süreli ve uzun süreli olarak belirtilmiştir.

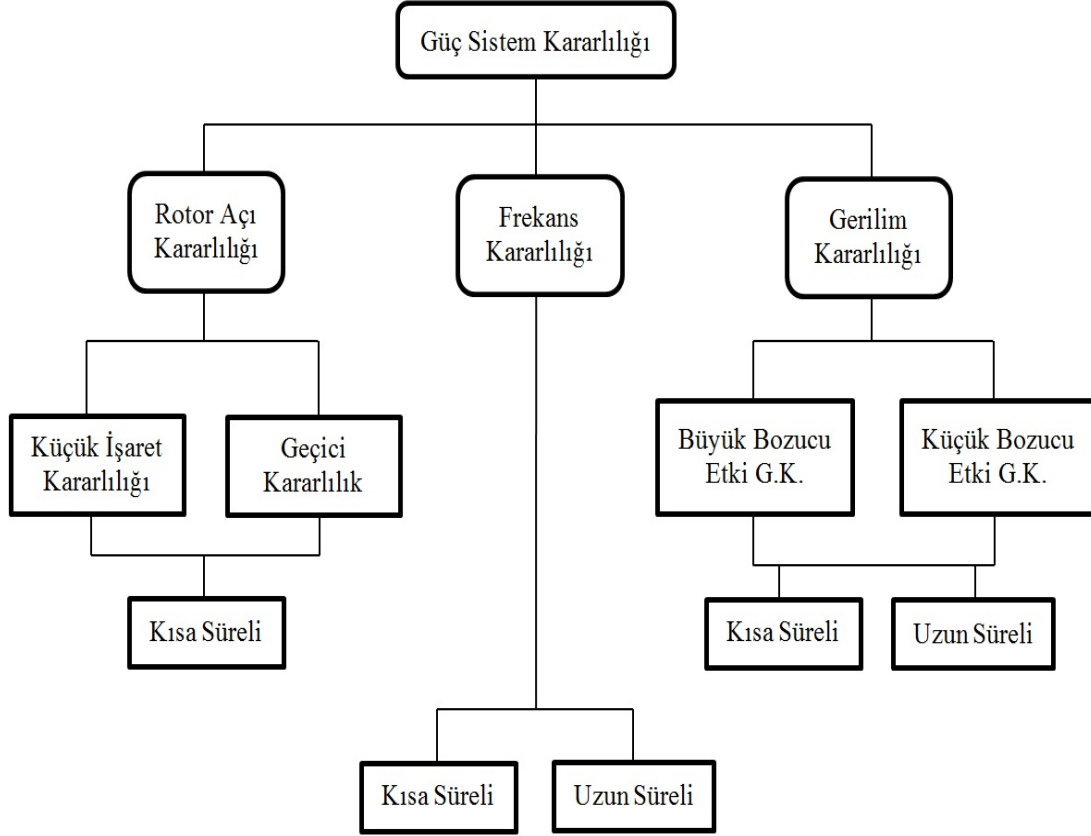
Tablo 2.1. Güç sistemi kararlılığının genel olarak sınıflandırılması [66]

| Zaman Ölçüsü | Generatör Kaynaklı      | Yük Kaynaklı                    |
|--------------|-------------------------|---------------------------------|
| Kısa Süreli  | Rotor Açısı Kararlılığı | Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı |
|              | Geçici Küçük İşaret     |                                 |
| Uzun Süreli  | Frekans Kararlılığı     | Uzun Süreli Gerilim Kararlılığı |

Kararlılık problemlerinin karmaşıklığından dolayı, güç sisteminin karşılaştığı kararsızlıklar kolayca analiz edilemezler. Kararlılık analizinde, kararsızlığa neden olan sebeplerin ve kararlı çalışmayı sağlayan yöntemlerin uygun bir şekilde sınıflandırılmasının büyük bir önemi vardır. Güç sistemi kararlılığı sınıflandırılması yapılırken aşağıdaki düşünceler göz önüne alınmıştır [64]:

- Ana sistem değişkeni tarafından belirtilen, sistemi kararsızlığa götüren kararsızlığın fiziksel doğası gözlemlenir.
- Kararlılığın hesaplanması ve tahmin edilmesi metodunu etkileyen bozulmanın büyüklüğü dikkate alınır.
- Kararlılığı incelemek için cihazlar, süreçler ve zaman aralığı göz önünde bulundurulur.

Şekil 2.1’de güç sisteminin kararlılığı çeşitli alt kategorilere ayrılmış ve sınıflandırılmıştır [64].



Şekil 2.1. Güç sisteminin kararlılığının sınıflandırılması

Gerilim kararlılığı konusuna geçmeden önce diğer kararlılık çeşitleri olan rotor açılı kararlılığı ve frekans kararlılığı hakkında bilgiler verilecektir.

### 2.2.1. Rotor açılı kararlılığı

Güç sisteminin elektromekaniksel dinamiklerine bağlı olarak birkaç saniye içinde oluşan bir kararlılık problemi olan rotor açılı kararlılığı, zaman bakımından kısa süreli bir kararlılık problemidir ve güç sisteminde eş zamanlı çalışan makinelerin bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra eş zamanlı çalışabilirliğini içermektedir. Bu durum sistemdeki her bir eş zamanlı makinenin elektromanyetik momenti ile mekanik momenti arasındaki dengenin devam ettirilebilmesi veya yeniden kazanılması kabiliyetine bağlıdır.

Senkron generatörlerde uyarma sargısı ve endüvi sargısı olmak üzere iki önemli sargı bulunmaktadır. Genel olarak uyarma sargısı rotorda, endüvi sargısı ise statorda bulunur. Uyarma sargısı doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen ve genliği sabit olan bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, rotorun dışarıdan bir tahrik makinesi ile döndürülmesi sonucu statora yerleştirilmiş üç fazlı endüvi sargılarında alternatif gerilimler indükler. Bu durum göz önüne alındığında, iki ya da daha fazla senkron generatörün birlikte çalıştığı durumlarda, tüm senkron generatörlerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansta olmalı ve her bir rotorun mekanik hızının bu frekansla senkronize olması gerekir [67].

Bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra bir senkron makinenin elektromekanik momentindeki değişim iki bileşene ayrılabilir:

a) Senkronlayıcı moment bileşeni: Bu bileşen rotor açısız sapması ile aynı fazdadır.

b) Sönümleyici moment bileşeni: Bu bileşen hız sapması ile aynı fazdadır.

Her bir senkron makine için bu iki bileşenin var olması sistem kararlılığını oluşturur. Senkronlayıcı moment bileşeninin olmaması periyodik olmayan kararsızlığa yol açarken, sönümleyici moment bileşeninin eksikliği periyodik kararsızlığa neden olur. Bozulmanın büyüklüğüne ve içeriğine bağlı olarak rotor açısı kararlılığı, küçük bozucu etki (küçük işaret) rotor açısı kararlılığı ve büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı (geçici hal kararlılığı) olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

#### 1) Küçük Bozucu Etki (Küçük İşaret) Rotor Açısı Kararlılığı

Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı elektromekanik zararsız salınımların oluşturduğu küçük bozucu etkilerden meydana gelir. Güç sistemlerinin küçük bozulmalar altında senkronizasyonlarını devam ettirebilme yeteneği ile ilgilidir. Yük ve üretimdeki küçük değişimler örnek olarak verilebilir. Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı güç sisteminin başlangıç işletme şartlarına bağlıdır. Ortaya çıkabilecek kararsızlık iki şekilde olabilir:

a) Senkronlayıcı moment bileşeninin eksikliğine bağlı olarak rotor açısındaki periyodik olmayan artış.

b) Sönümleyici moment bileşeninin eksikliğinden dolayı gittikçe artan genlikte rotor salınımları.

Günümüz güç sistemlerinde küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı problemleri salınımların yeterince sönümlendirilememesiyle ilişkilendirilir. Periyodik olmayan kararsızlık problemleri büyük ölçüde devamlı devrede olan gerilim regülatörleri ile ortadan kaldırılabilir. Fakat bu problem, sabit uyartım ile çalışan veya uyartım akımı sınırlayıcısına sahip generatörlerde karşı karşıya kalınan bir sorun olarak devam etmektedir.

Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı problemleri küçük veya büyük çaplı olabilir. Küçük çaplı problemler, güç sisteminin küçük bir bölümünü kapsar ve genellikle tek bir üretim tesisine ait rotor açısı salınımlarıyla ilgilidir. Büyük çaplı problemler ise, üretim tesisindeki birçok generatör grubunu kapsar ve etkisini daha yaygın bir şekilde gösterir. Burada oluşan salınımlar daha karmaşık yapıya sahiptir. Küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı çalışmalarında genellikle bozulmadan sonra 10 – 20 saniyelik zaman aralığı ile ilgilenilir.

## 2) Büyük Bozucu Etki Rotor Açısı Kararlılığı (Geçici Hal Kararlılığı)

Büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı güç sisteminin iletim hattındaki bir kısa devre gibi ciddi ve kritik bozulmalarda senkronizasyonunu devam ettirebilme yeteneği olarak tanımlanır. Sistemin cevabı, generatör rotor açısının büyük değişimleri ve bunun sebep olduğu doğrusal olmayan güç – açı ilişkisi ile ilgilidir. Büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı hem sistemin başlangıç işletme şartlarına hem de bozulmanın şiddetine bağlıdır. Buradaki kararsızlık genellikle yetersiz senkronlayıcı moment sonucu oluşan periyodik olmayan açı değişimi şeklindedir. Büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı çalışmalarında genellikle bozulmadan sonra 3 – 5 saniyelik zaman aralığı ile ilgilenilir. Bu süre çok büyük sistemlerde 10 – 20 saniyeye kadar çıkabilir.

Hem küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı hem de büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı kısa süreli birer olay olarak değerlendirilir.

### **2.2.2. Frekans kararlılığı**

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminde yük ile üretim arasında oluşacak bir dengesizlik yaratan bir bozulma sonrasında sistemin frekansının sabit kalabilme yeteneğidir. Bu kararsızlık en az yük kaybı ile yük ve üretim arasındaki dengenin yeniden kurulmasına ya da sürdürülebilmesine bağlıdır. Ciddi sistem bozuklukları genel olarak frekansta, güç açısında, gerilimde ve diğer sistem değişkenlerinde büyük değişimlere neden olur. Bu yüzden gerilim kararlılığı çalışmalarında modellenmeyen proseslerin, denetimlerin ve koruma sistemlerinin dikkate alınması gerekir. Genel olarak frekans kararlılığı problemleri cihaz cevaplarının yetersizliğine, denetim ve koruma sistemleri arasındaki ilişkinin zayıflığına veya eksik üretim stokuna bağlıdır.

Frekanstaki büyük değişimler sonucu cihazların harekete geçme süreleri saniyelerden dakikalara kadar sürebilir. Bu nedenle frekans kararlılığı bir kısa süreli olay olabildiği gibi bir uzun süreli olay şeklinde de olabilir. Düşük frekansta yük atma olayı kısa süreli bir olaya örnek olarak verilebilir [68]. Buhar türbinlerinin aşırı hız denetim sistemlerinin neden olduğu daha karmaşık frekans kararsızlıkları onlarca saniyeden birkaç dakikaya kadar süren bir uzun süreli bir olaya örnek gösterilebilir [69].

### **2.3. Gerilim Kararlılığının Tanımı ve Sınıflandırılması**

Son zamanlarda, gerilim kararlılığı problemi sebebiyle dünyanın çeşitli yerlerinde meydana gelen enerji sistem çökmeleri neticesinde, gerilim kararlılığı elektrik güç sistemlerinde temel bir konu haline gelmiştir [3,70]. Gerilim kararlılığı problemi güç sisteminde aşırı yüklenme, arızalanma veya yetersiz reaktif güç durumlarında oluşur. Gerilim kararlılığı üretim, iletim ve reaktif güç tüketiminin incelenmesi ile analiz edilebilir.

Bir elektrik güç sisteminde belli bir çalışma koşulunda bozucu etkiden sonra gerilimler normal çalışma gerilim değerlerine yakın kalıyorsa, bu durumda güç sisteminin gerilim kararlılığına sahip olduğu söylenebilir. Generatör, hat, transformatör, bara v.b. elemanların herhangi bir sebeple devre dışı edilmesiyle, gerilim kontrolünün yapılamaması veya yükün artması durumlarında, kontrolsüz gerilim düşümü oluşursa güç sisteminin kararsızlığı söz konusu olur. Gerilim kararsızlığına neden olan önemli faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir [4,71,72]:

- 1- Enerji iletim hatlarının aşırı derecede yüklenmesi ile elektriksel yüklerin yapısı ve özellikleri
- 2- Enerji üretim kaynaklarının yük merkezlerine olan uzaklıklarının fazla olması
- 3- Kaynak gerilimlerinin çok düşük olması
- 4- Çeşitli kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon bozukluğu
- 5- Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının veya kontrolörlerinin yapısı ve özellikleri
- 6- Transformatör kademe değiştiricisi gibi gerilim kontrol cihazlarının çalışma biçimleri
- 7- Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkileri

Güç sistemi sınırsız büyüklükteki bir elektrik gücünü yüke iletme kabiliyetine sahip değildir. Gerilim kararsızlığının esas nedeni, aşırı yüklü sistemlerde gerilim değerlerini belirli bir değerde tutabilmek için sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif enerjiyi sistemin karşılayamamasıdır [65,66,73,74]. Diğer nedenler generatör reaktif güç limitleri, yük karakteristikleri, yük altında kademe değiştirebilen transformatörlerin özellikleri, reaktif güç kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri ve gerilim kontrol cihazlarının davranışlarıdır. Reaktif güç iletimi sırasında aşırı derecede reaktif güç kayıpları oluşması nedeniyle reaktif güç iletimi zordur. Bu aşırı

derecedeki reaktif güç kaybı nedeniyle gerilim kontrolü için kullanılan reaktif güç kontrol alanında üretilir ve tüketilir.

### **2.3.1. Gerilim kararlılığının tanımı**

Güç sisteminin normal çalışma koşullarında veya bozucu bir etkiye maruz kalması durumunda bozucu etki sonrası kabul edilebilir bir denge durumunda kalması kararlılık olarak tanımlanır [66]. Gerilim kararlılığı normal çalışma koşullarında ve maruz kaldığı bozucu etki sonrası güç sistemindeki tüm baraların kabul edilebilir gerilim değerlerinde tutulabilmeleri kabiliyetidir [2].

Güç üretiminde azalma, talep edilen yükte artma veya generatör, hat, transformatör, bara v.b. elemanların herhangi bir nedenle devre dışı edilmesi gibi durumlardan dolayı gerilim kontrol edilemediğinden güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı oluşmaktadır. Gerilim kararsızlığı, sistemde meydana gelen olayların geniş bir kısmını içerirken; gerilim kararlılığı için ise değişik düşünceler bulunmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde söz sahibi veya standartların belirlenmesinde öncü olan değişik çalışma gruplarının yaptıkları gerilim kararlılığı tanımlamaları aşağıda belirtilmektedir.

#### **2.3.1.1. CIGRE tanımı**

CIGRE, gerilim kararlılığı tanımını dinamik kararlılık problemlerine benzer şekilde yapmaktadır.

Herhangi bir küçük bozucu etki sonrası, eğer yüklere yakın gerilimlere bakılırsa değerler bozucu etki öncesi değerlere eşit ya da yakınsa verilen çalışma durumundaki bir güç sistemi küçük bozulmalara karşı gerilim kararlıdır. Verilen çalışma durumunda ve bir bozulmaya bağlı olarak, eğer gerilim yaklaşık olarak sonraki bozulma dengesi değerine yakınsa, güç sistemindeki gerilim kararlıdır. Eğer bozucu etki sonrası gerilim değerleri kabul edilebilir sınırların altında ise güç sistemi gerilim çökmesine gider [75,76].



### **2.3.1.2. IEEE tanımı**

IEEE, gerilim kararlılığını güç sisteminin gerçek çalışma süreciyle tanımlamaktadır.

Bir sistemin gerilimini belirli değerlerde koruyabilme yeteneğine gerilim kararlılığı denir. Yükün gücü arttığı zaman, hem yük hem de gerilim kontrol edilebilecektir. Sistemin önemli bir parçasında olan gerilim azalmaları gerilim kararsızlığına yol açar ve bu durum gerilim çökmesini oluşturur. Gerilim güvenliği, bir sistemin yalnızca çalışma kararlılığında kalma kabiliyeti değil, aynı zamanda sistemdeki değişimlere veya bozucu durumlara karşı da kararlı kalabilme yeteneğidir [65].

### **2.3.1.3. IEEE ve CIGRE ortak tanımı**

Gerilim kararlılığı, bir güç iletim sisteminin herhangi bir bozucu etki sonrasında tüm baralarda kararlı gerilimi koruyarak normal çalışma koşullarına dönebilmesi kabiliyetidir. Güç sisteminde meydana gelen aşırı gerilim düşümü veya kesintiler gerilim çökmesi oluşmasına sebep olur [64].

### **2.3.2. Gerilim kararlılığının sınıflandırılması**

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin verilen bir başlangıç koşulu durumundayken küçük veya büyük olduğu önemli olmayan bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra güç sisteminin bütün baralarında kabul edilebilir sürekli gerilimi devam ettirebilme yeteneğidir. Rotor açısı kararlılığında olduğu gibi, gerilim kararlılığını bozulmanın büyüklüğüne bağlı olarak iki alt kategoride sınıflandırmak faydalı olur [64,76].

#### **2.3.2.1. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı**

Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı sistem arızaları, üretim kaybı veya hat arızaları gibi büyük bozulmalardan sonra, güç sisteminin kabul edilebilir gerilim dengesini koruyabilmesi yeteneğidir. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığının belirlenebilmesi için, kesintili ve kesintisiz koruma ve kontrol cihazlarının güç sistemindeki doğrusal olmayan cevaplarının analiz edilmesi gerekir. Büyük bozucu etki gerilim

kararlılığında ilgilenilen zaman dilimi 10 – 30 saniyeden onlarca dakikaya kadar varabilir [76].

### **2.3.2.2. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı**

Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı sistem yüklerindeki artış gibi küçük bozulmalardan sonra, güç sisteminin kabul edilebilir gerilim dengesini koruyabilmesi yeteneğidir. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığının belirlenebilmesi için, doğrusallaştırılmış sistem modellerinin incelenmesi gerekir. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığında ilgilenilen zaman aralığı dakikalar ile saatler aralığında değişebilir [77].

Gerilim kararlılığı, yükün niteliğine bağlıdır. Gerilim kararlılığı, yüklerin dinamik özelliklerinin zaman durumlarına bağlı olarak kısa ve uzun süreli gerilim kararlılığı olmak üzere iki grupta incelenir.

### **2.3.2.3. Kısa süreli gerilim kararlılığı**

Kısa süreli gerilim kararlılığı asenkron motorlar, senkron generatörlerin uyartım sistemleri, statik VAR kompanzatörleri ve HVDC (yüksek gerilim doğru akım) dönüştürücüleri gibi hızlı çalışan yük bileşenlerinin dinamiklerini içermektedir. İlgilenilen zaman aralığı birkaç saniyedir [78-81].

Kısa süreli gerilim kararlılığının analizi uygun diferansiyel eşitliklerinin çözümü ile olmaktadır. Bu durum rotor açısı kararlılığının analizine benzemektedir. Burada yüklerin dinamik olarak modellenmesi önemlidir. Açık kararlılığının tersine yüklere yakın kısa devreler önemlidir. Bu kararlılık için geçici gerilim kararlılığında kullanılan analizlerin kullanılmaması önerilir [64].

### **2.3.2.4. Uzun süreli gerilim kararlılığı**

Uzun süreli gerilim kararlılığı yük altında kademe değiştiren transformatörleri, termostatik kontrollü yükleri ve generatör akım sınırlayıcıları gibi daha yavaş çalışan

cihazları içerir. İlgilenilen zaman aralığı birkaç dakika veya daha uzun bir süredir. Uzun süreli gerilim kararlılığının belirlenebilmesi için, sistemin dinamik performansının analizi gereklidir [74,82,83]. Ayrıca P – V eğrileri kullanılarak da analizi mümkündür. P –V eğrileri kullanılarak yapılan çalışma yük artırımı şeklindedir. Bu çalışmada kademe değiştirme, aşırı veya düşük uyartım ve anahtarlanabilir şönt elemanların durumları dikkate alınır. Yükün aktif güç değerinin en büyük sınır değeri ve yükün en küçük gerilim sınır değeri belirlenir ve bu değerler aşılsa sistemde gerilim çökmesi oluşabilir [84].

Şekil 2.2’de farklı güç sistem elemanlarının gerilim değişimleri ve bozulmalarının zaman cevapları gösterilmektedir [3].

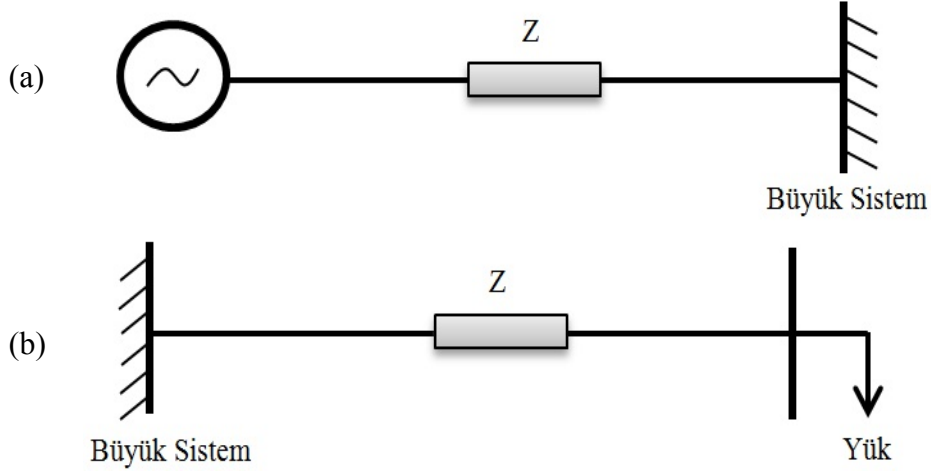
| <u>Geçici Gerilim Kararlılığı</u>                       |                               | <u>Uzun Dönem Gerilim Kararlılığı</u>    |                      |          |
|---|-------------------------------|--|----------------------|----------|
| <u>Asenkron Motor Dinamikleri</u>                       |                               | <u>Yük/Güç Transferi Artışı</u>          |                      |          |
| <u>Generatör/Uyarma Dinamikleri</u>                     |                               | <u>LTC Trafo&amp;Ayarlı Gerilim Reg.</u> |                      |          |
| <u>İlk Hareket Kontrolü</u>                             |                               | <u>Yük Yoğ./Termostat</u>                |                      |          |
| <u>Mek. Anah. Kapasitör/Reaktör</u>                     | <u>Uyarma Limitleri</u>       | <u>Gaz Türbin Çalış.</u>                 |                      |          |
| <u>Düşük Gerilim Yük Paylaşımı</u>                      |                               | <u>Güç Üretim İşletimi</u>               |                      |          |
| <u>SVC</u>  | <u>Üretim Değişimleri/AGC</u> |  |                      |          |
| <u>Generator Atalet Dinamikleri</u>                     |                               | <u>Kazan Dinamikleri</u>                 | <u>Hat/Trf A.Yük</u> |          |
| <u>DC</u>   | <u>DC Çeviriciler LTC</u>     | <u>Sistem Operatörü</u>                  |                      |          |
| <u>Aşırı Yük Korumalarını da İçeren Koruma Röleleri</u> |                               |  |                      |          |
| 0.1   | 1                             | 10                                       | 100                  | 1000(sn) |

Şekil 2.2. Gerilim kararlılığı olayları ve zaman cevapları

#### 2.4. Rotor Açısı Kararlılığı ile Gerilim Kararlılığının İlişkisi

Gerilim kararlılığı ve rotor açısı kararlılığı birbiri ile ilişkili kavramlardır. Geçici hal gerilim kararlılığı genellikle büyük bozucu etki rotor açısı kararlılığı (geçici hal kararlılığı) ile ve gerilim kararlılığının daha yavaş formları, küçük bozucu etki rotor açısı kararlılığı ile ilişkilidirler. Genellikle bunlar ayırt edilemezler. Eğer

kararsızlığın hakim olduğu bir durum söz konusu ise o zaman aşağıda gösterildiği gibi bir çok olumsuz durum vardır.



Şekil 2.3. Uç durumları gösteren örnekler a) Saf açı kararlılığı b) Saf gerilim kararlılığı

a) Uzaktaki senkron generatörün, büyük bir sisteme iletim hatları üzerinden bağlanması [65]. (Tek makine sonsuz bara problemi için Saf Açı Kararlılığı) (Şekil 2.3a)

b) Bir senkron generator veya büyük bir sistemin, iletim hatları üzerinden asenkron bir yüke bağlanması [65]. (Saf Gerilim Kararlılığı) (Şekil 2.3b)

Rotor açısı kararlılığı da, gerilim kararlığında olduğu gibi reaktif güç kontrolünden etkilenir. Periyodik olmadan artan açılarını içeren küçük bozucu etki açı kararsızlığı, sürekli-aktif generatörde otomatik gerilim regülatörü kullanılmadan önce önemli bir problem olarak görülmektedir. Küçük bozucu etki açı kararlılığı ve uzun süreli gerilim kararlılığı arasındaki ilişki şöyledir: Generator akım limitleri normal otomatik gerilim regülasyonuna engel olurlar. Generator akım limitleri kararlılığın her iki durumunda da çok zararlıdır. Gerilim kararlılığı yük bölgeleri ve yük karakteristikleri ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığında, sistemin uzak güç üretim merkezi, büyük bir sisteme uzun iletim hatları üzerinden bağlanmaktadır.

Gerilim kararlılığı genelde yük kararlılığı, rotor açısı kararlılığı da generatör kararlılığı olarak adlandırılmaktadır. Büyük bir enterkonnekte sistemde, herhangi bir generatörde senkronizma kaybı olmaksızın, bir yük bölgesinde gerilim çökmesi meydana gelebilir. Geçici hal gerilim kararlılığı genelde geçici hal rotor açısı

kararlılığı ile oldukça yakından ilişkilidir. Buna karşın uzun süreli gerilim kararlılığı, rotor açısı kararlılığı ile daha az ilişkilidir.

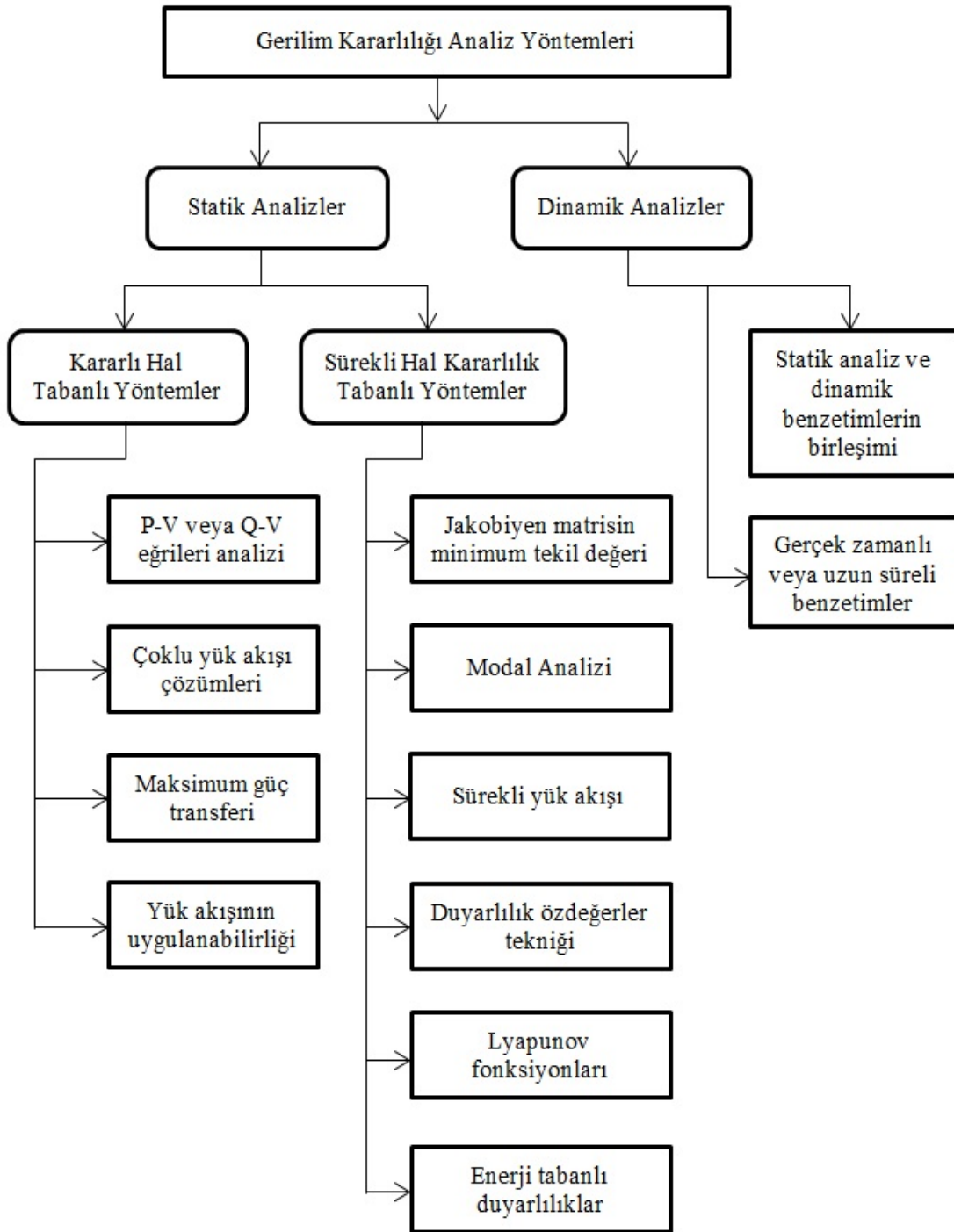
Gerilim çökmeleri, yüklerden uzak bir noktada iletim hattında ise, bu açı kararsızlığı problemidir. Eğer gerilim çökmeleri yük bölgesinde ise bu olay bir gerilim kararsızlığı problemidir.

## 2.5. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri

Sistemin verilen bir durumu için gerilim kararlılığı analizi, gerilim kararsızlığına yakınlık ve gerilim kararsızlığı mekanizması olmak üzere iki farklı konuyu içermektedir [2]. Gerilim kararsızlığına yakınlık sistemin gerilim kararsızlığına ne kadar uzak olduğunu belirtir. Kararsızlığa olan yakınlık yük seviyesi, aktif güç akışı ve reaktif güç yedekleri gibi fiziksel niceliklerle ölçülebilir. Gerilim kararsızlığı mekanizması ise gerilim kararsızlığının nasıl ve niçin oluştuğunu, kararsızlığa götüren nedenlerin neler olduğunu ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için hangi önlemlerin alınması gerektiğini belirtir.

Kullanılan analiz yöntemleri statik yöntemler ve dinamik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Gerilim kararsızlığı veya çökmesi dinamik bir problem olarak belirtilse de genellikle statik analize uygun olarak bir sürekli hal problemi olarak görülmüştür. Bu yüzden, yük akışı temelli statik analiz yöntemleri hızlı ve yaklaşık analiz olarak kullanılmaktadır. Statik analiz yöntemleri ile tüm güç sistemi incelenebilir ve sistemin doğru bir şekilde modellenmesi yapılırsa problemin çözümüne ilişkin nedenler ortaya çıkarılabilir. Gerilim kararlılığının bir problem olarak ortaya çıkmasıyla birlikte dinamik analizlere de gereksinim duyulmuştur. Dinamik analiz yöntemleri gerilim çökmesinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, kontrol ve korumanın koordinasyonunun sağlanması ve sorunun çözümüne odaklı yapılan ölçüm testleri için faydalı olur.

Gerilim kararlılığı analiz yöntemlerinin sınıflandırılması şekil 2.4'te gösterilmiştir [85].



Şekil 2.4. Gerilim kararlılığı analizi yöntemleri

Statik analiz yöntemleri, bir güç sistemindeki parametrelerin küçük bozulmalara maruz kalması durumunda denge noktasının varlığını ve/veya kararlılığını araştırırlar. Statik analizlerin iki alt grubundan biri olan kararlı hal tabanlı yöntemler, sürekli hal modelinin denge noktası çözümlerinin varlığı ile alakalıdır. Statik analizlerin ikinci alt grubu olan sürekli hal kararlılık tabanlı yöntemler, kararlı

çalışma noktalarının varlığının belirlenmesini sağlar. Genellikle dinamik denklemin çalışma noktasındaki özdeğerleri veya yük akışı jakobiyeni ile yakından ilgili bir duyarlılık matrisi kullanılır.

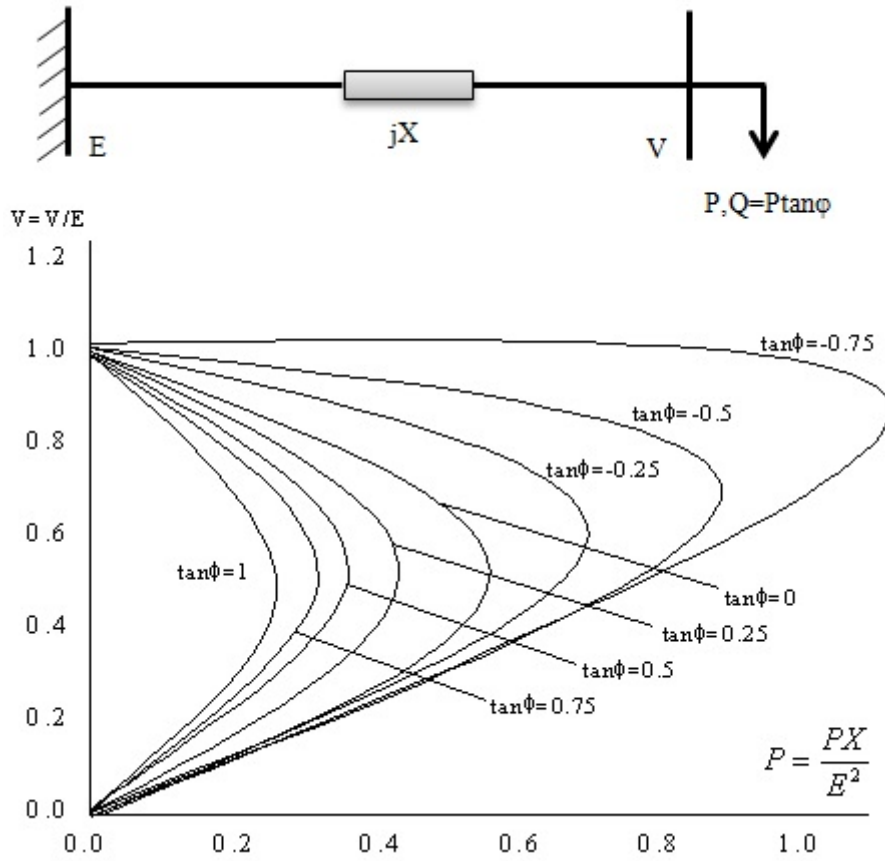
Gerilim kararlılığı analizinde kullanılan P-V eğrileri ve Q-V eğrileri hakkında kısaca bilgi verildikten sonra güç sistemlerinde gerilim çökmeleri konusuna geçilecektir.

### 2.5.1. Gerilim kararlılığı analizinde P-V eğrileri

Arıza sonrası güç akışlarının yanı sıra, P-V eğrileri ve V-Q eğrileri olmak üzere diğer iki güç akışı tabanlı metotların kullanım alanları da geniştir. Bu iki metot gerilim kararlılığı ile ilgili sürekli hal yüklenebilirlik limitlerini belirler. Güç akışı metoduna dayalı statik analiz genelde P-V veya V-Q eğrileri kullanılarak yapılmaktadır. Bu eğriler sistemdeki P, Q, V arasındaki ilişkiyi ve gerilim kararlılığıyla ilgisi bulunan sürekli haldeki yüklenmeyi göstermektedir. Yani, sistemdeki bir baradan çekilen güç arttırıldığında, o baradaki gerilimin değişimi bu eğriler ile gösterilmektedir.

P-V eğrileri gerilim kararlılığının kavramsal analizleri ve radyal sistem çalışmaları için yararlıdır. Bu metot büyük gözlü şebekeler için de kullanılır. Bu çözümün bir dezavantajı sistemin devrilme noktasında veya maksimum güç noktasında güç akış simülasyonunun çözümden uzaklaşmasıdır. Bölge yükünün her arttığı durumda, enerji üretimi için tekrar çözüm yapılması zorunluluğunun olması da diğer bir dezavantajdır. Kavramsal analizler için, yük karakteristikleri gerilimin bir fonksiyonu olarak analiz edilirse P-V eğrileri ile çalışmak uygundur.

P-V eğrisindeki kritik noktaya karşılık gelen güç, baradan çekilecek maksimum aktif yük miktarını belirtmektedir. Eğrinin kritik noktasının üstünde kalan kısmı, kararlı çalışma bölgesini temsil etmektedir.



Şekil 2.5. Sonsuz güçlü kaynak ve yük için normalize edilmiş P-V eğrileri

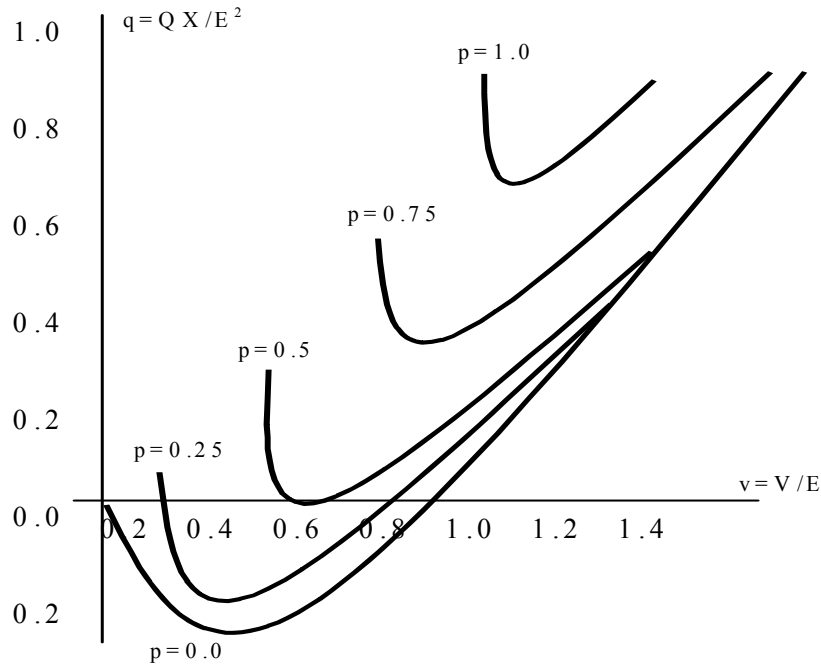
### 2.5.2. Gerilim kararlılığı analizinde Q-V eğrileri

Şekil 2.5’de gösterilen normalize edilmiş P-V eğrilerini kullanarak Q-V eğrileri elde edilebilir. P’nin sabit değerleri için Q ve V değerleri not edilir ve sonra yeniden şekil 2.6’da görüldüğü gibi Q-V eğrileri çizilir.

Büyük yükler için, kritik gerilim çok yüksek olur ( $P=1$  pu için  $V=1$  pu’dan büyük). Kapasitör grubu eklenerek bara gerilimini arttırdığı sağ taraf normal şartları gösterir.

Büyük sistemler için bu eğriler güç akışı simülasyonu ile elde edilebilir. Q-V eğrileri test barası veya kritik baradaki reaktif güce karşı gelen gerilimi gösterir.





Şekil 2.6. Sonsuz büyük kaynak ve yük için normalize edilmiş Q-V eğrileri

## 2.6. Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmeleri

Şebeke frekansında, 10 ms'den fazla (0.5 periyot) ve 1 dakikadan az olmak kaydıyla, nominal gerilimin etkin değerinin % 10'u ile % 90'ı arasında azalma göstermesi gerilim çökmesi olarak tanımlanır. % 10'luk bir gerilim çökmesi gerilimin etkin değerindeki % 10'luk bir azalma ile 0,9 birim değerlik değere düşmesi anlamına gelmektedir. Gerilim çökmesi tüketicilerin en çok karşılaştığı ve etkilendiği güç kalitesi problemlerinden birisidir [86,87].

Gerilim çökmesi güç sisteminin bir kısmında gerilim kararsızlığı nedeni ile olağan dışı bir şekilde gerilimin düşük bir seviyeye inmesi işlemidir. Sürekli çalışma koşullarında yükün tahminler dışında değişmesi neticesinde transformatörlerin kademe değiştiricilerinin sınır değerlerinin bu durum karşısında yetersiz kalmaları neticesinde düşük gerilimde sistemin çalışmaya devam etmesi ve neticede yükün talep ettiği normal gerilim seviyesine ulaşamaması gerilim çökmesine sebep olur [88].

Gerilim çökmesi sistemin kararsızlığı neticesinde oluşur. Güç sisteminde tipik olarak çökmeler aşırı yük, arıza ve/veya reaktif güç eksikliğinden meydana gelir. Gerilim çökmeleri reaktif gücün üretim ve iletimdeki sınırlamalarından dolayı talep edilen reaktif gücün temin edilememesinden oluşur. Generatör ve SVC reaktif güç değerlerinin ve kapasitörler tarafından üretilen reaktif güç değerlerinin azalması gerilimin düşmesine sebep olur. İletim hattındaki güç değerlerinin azalması gerilimin düşmesine sebep olur. İletim hattındaki sınırlamalardan bir tanesi hat sonunda ve hat üzerinde aşırı reaktif güç kayıplarının sınırlanmasıdır. Motor veya kompresör gibi yüklerin artması durumunda reaktif güç talebinde de artma olur [88].

Gerilim çökmesi, kesilmesi ve dalgalanmasını hesaplamak için IEC 61000-4-30 [89] ve IEEE Std. 1159-2009 [87] olmak üzere iki tip standart vardır. IEC 61000-4-30 [89] standardında aşağıdaki tanımlamalara yer verilmiştir:

- Bir elektrik sistemindeki gerilim çökmesi geçici olarak gerilimin belirli bir eşik değerinden aşağı doğru azalmasıyla meydana gelir.
- Gerilim kesilmesi, bir elektrik sisteminde gerilimin belli bir eşik değerinden itibaren azalmasıyla oluşur.
- Gerilim yükselmesi ise bir elektrik sisteminde gerilimin geçici olarak belli bir eşik seviyesinden itibaren artmasıyla meydana gelir.

IEEE Std. 1159-2009 [87] standardında yapılan tanımlamalar ise şunlardır:

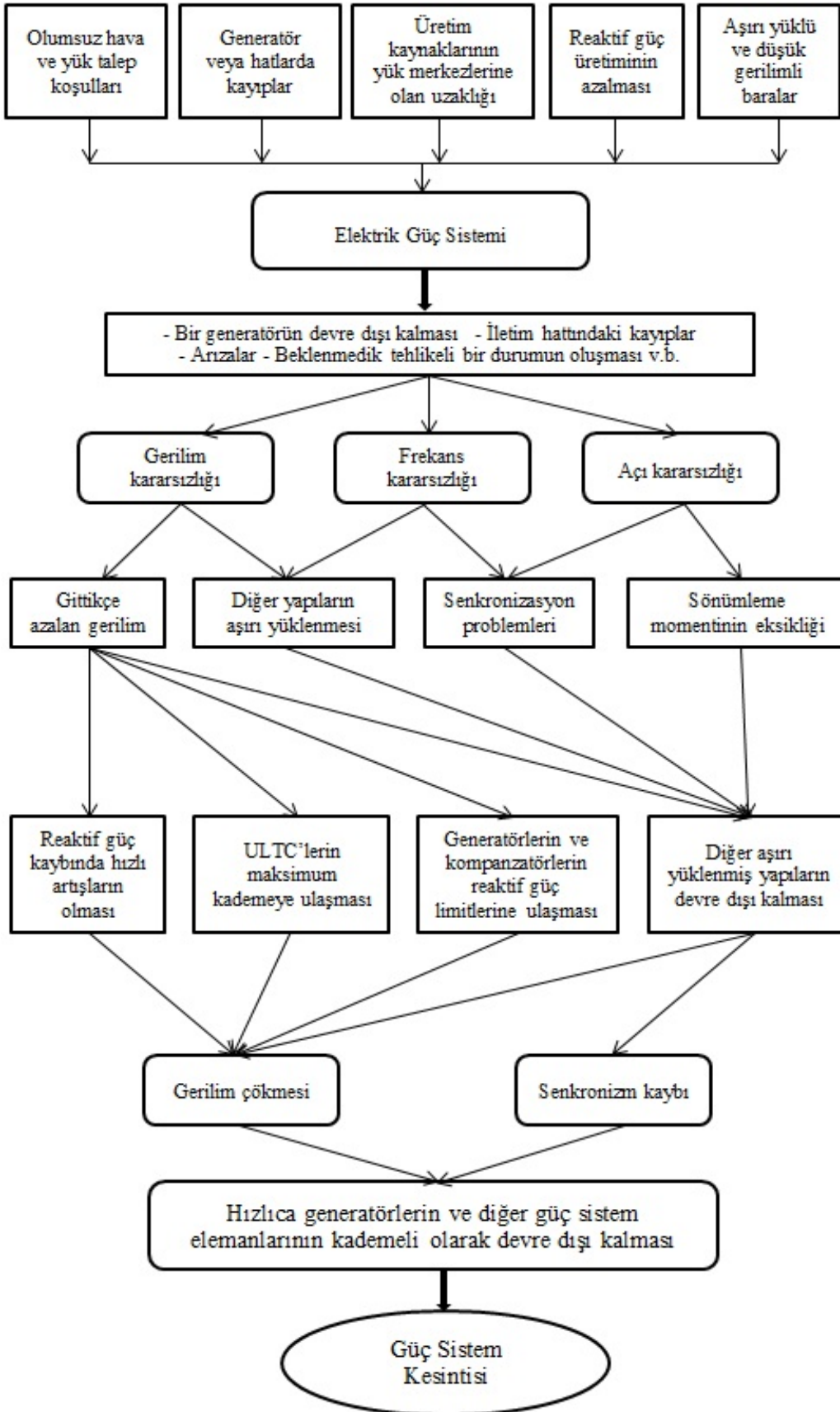
- Gerilim çökmesi bir dakika içinde yarım periyotluk güç frekansında gerilimin etkin değerinin 0.1 ve 0.9 pu arasında azalmasıdır.
- Gerilim kesilmesi 3 sn ve yarım periyot arasındaki bir zaman diliminde bir veya daha fazla ki fazda kısa süreli olan gerilim kaybıdır.
- Gerilim yükselmesi bir dakika içindeki yarım periyotluk güç frekansında gerilimin artmasıdır.

Gerilim çökmesi üç fazın eşik değerinin üzerinde bulunduğu zaman ve fazlardan birinin eşik değerinin altına indiği zaman başlar. Gerilim çökmesindeki eşik değeri referans geriliminin %90'ı seçilir. Gerilimde ki kesilmeler bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu ve üç fazın eşik değerinin altında olduğu durumlarda başlar. Gerilim kesilmesindeki eşik değeri referans geriliminin %10'u seçilir. Gerilim yükselmesi üç fazın eşik değerinin altında olduğu ve bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu ve en az bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu zaman başlar. Gerilim yükselmesindeki eşik değeri referans geriliminin %110'u seçilir [86].

Gerilim çökmeleri ile ilgili birçok ihtimaller göz önünde bulundurulmaktadır. Klasik anlamda ve tipik gerilim çökmeleri uzun süreli gerilim kararsızlığının bir sonucudur. Aşağıda verilen maddelerle bu durum ifade edilmektedir [88]:

- a) Reaktif güç üretiminin azalmasıyla meydana gelen enerji iletim hattının aşırı yüklenmesi nedeniyle gerilim çökmesi oluşabilir.
- b) Enerji iletim hattının aşırı yüklenmesinden dolayı kayıpların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Kayıpların artması toplam reaktif güç talebini artırır. Bu talep karşılanmazsa gerilim çökmesi olayı gerçekleşebilir.
- c) Yük gerilimindeki azalmalar ise enerji iletim hattındaki yükün ve yük talebinin azalmasına neden olur. Generatör çıkış gerilimlerinin yeniden ayarlanmasıyla bu durum düzeltilir. Fakat bununla birlikte reaktif güçte artma oluşur ve gerilim düşümleri meydana gelir.
- d) Gerilim arttığında yük talebinin artmasıyla birlikte iletim kayıpları da artar ve büyük gerilim düşümlerine neden olur.
- e) Şönt kapasitelerin iletim hattı üzerinde etkilerinin azalmasıyla birlikte gerilim de azalır ve sistem gerilim kararsızlığına buradan da gerilim çökmesine gider.

Elektrik güç sistem kesintilerinin tipik bir düzeneği aşağıda şekil 2.7'de verilmiştir [85].



Şekil 2.7. Elektrik güç sistem kesintilerinin tipik bir düzeneği

### 2.6.1. Dünyada meydana gelmiş gerilim çökmesi olayları

Sistemdeki arızalar bazen gerilim çökmesine bazen de sistemde gerilim çökmesi olmadan dakikalarca sürebilen, güvenli olmayan bir enerji akışına neden olmaktadır. Geçmişte dünya genelinde meydana gelen bazı arızalar tablo 2.2’de verilmiştir. Bu olaylardan bazılarının içeriği ile ilgili bilgi tablodan sonra verilecektir.

Tablo 2.2. Dünyada meydana gelmiş gerilim çökmesi olaylarından bazıları

| Güç Sistemi  | Yıl  |
|--|------|
| New York Güç Sistemi   | 1970 |
| Florida Güç Sistemi  | 1977 |
| Fransa Güç Sistemi   | 1978 |
| Danimarka Güç Sistemi  | 1979 |
| Belçika Güç Sistemi, Florida Güç Sistemi                         | 1982 |
| Japonya Güç Sistemi, İsveç Güç Sistemi                           | 1983 |
| Florida Güç Sistemi  | 1985 |
| Batı Fransa Güç Sistemi, Japonya Güç Sistemi                     | 1987 |
| Mısır Güç Sistemi  | 1990 |
| Güney Finlandiya Güç Sistemi                                     | 1992 |
| Sri Lanka Güç Sistemi  | 1995 |
| Kuzeybatı Amerika Güç Sistemi                                    | 1996 |
| Şili Güç Sistemi   | 1997 |
| Kuzey Amerika Güç Sistemi, İsveç Güç Sistemi, İtalya Güç Sistemi | 2003 |
| Atina ve Güney Yunanistan Güç Sistemi                            | 2004 |
| Pakistan Ulusal Şebeke Sistemi                                   | 2006 |

1978 yılında Fransa’da meydana gelen gerilim çökmesinde, sabah 7-8 saatleri arasında bir önceki gün talep edilen yükten 1600 MW daha fazla güç talebi oldu. 20 dakikalık süre boyunca 400 kV’luk şebeke 342 kV’a düştü. Saat 12:30’da gerilim normal seviyesine getirilebildi. Bu sürede 29 GW ve 100 GWh enerji kesintiye uğradı. Kesinti maliyetinin 300 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir [2,3,90].

1982 yılında Belçika’da test çalışması sırasında 700 MW’lık güç sisteme bağlanamadığından yaklaşık 4 dakika boyunca gerilim çökmesi meydana geldi [2,3,90].

İsveç’in güneyi 1983 yılında bir nükleer santral çıkışında meydana gelen arıza sebebiyle bir dakikalığına sistemden ayrıldı. Bu gerilim çökmesi olayı yük artışından ziyade sistemin topolojisindeki değişiklikten kaynaklanmaktadır [2,3,90].

Amerika'nın Florida eyaletinde 1985 yılında generatör fırçalarının yanması 500 kV'luk iletim hattında gerilim azalmasına ve sonuçta birkaç saniye içinde gerilim çökmesine neden oldu. Yük kaybı 4292 MW'tır [3,90].

1987 yılında Batı Fransa'da Cordemais termik santralindeki dört güç ünitesi 50 dakikalık bir süre boyunca açtırılmıştır. Toplam yük kaybı 9000 MW civarında iken gerilim düşük seviyelerde kararlı hale gelmiştir. Gerilim çökmesinden altı dakika sonra, 1500 MW'lık yükü devre dışı bırakmak için 400/225 kV transformatörü açtırılmıştır [2,3,90].

1992 yılında Güney Finlandiya'da, 400 kV'luk hatta bakım sırasında 735 MW'lık yükün etkilediği sistemde gerilim seviyesi 344 kV seviyesine düşmüştür. Gerilim gaz türbinlerinin yük koruyucuları ile çalıştırılmaya başlanması neticesinde reaktif güç üretiminin artırılması ile normal seviyesine getirilmiştir [91].

1997 yılında Şili enterkonnekte sisteminde bir gerilim çökmesi meydana gelmiştir. 154 kV'luk hattaki arıza nedeniyle gerçekleşen bu çökme, yaklaşık 30 dakika sürmüş ve bu süre içerisinde sistem yükünün yaklaşık %80'i kayıp olarak kayıtlara geçmiştir. Daha sonraları sistemin çökmeye karşı daha dayanıklı olabilmesi için şönt kompanzasyon sistemleri üzerinde durulmuştur [92].

2003 yılında Amerika Kanada arasındaki gerilim çökmesinde bu iki ülkeden toplam 50 milyon insan etkilenmiştir. 63 GW kayıp ve tahmini 10 milyar dolar zarar meydana gelmiştir. 261 elektrik santralinde 531 üretim birimi ve 400 iletim hattı zarar görmüştür [93-97].

İtalya'da 2003 yılında fırtınalı bir havada iki iletkenin birbirine temasıyla oluşan arıza sonrasında tüm iletim hattı çökmüştür. 58 milyonun etkilendiği bu kesintide toplam yük kaybı 27 GW olmuştur. Tahmini kesinti maliyeti on milyarlarca dolar olan bu gerilim çökmesinin düzeltilmesi 16,5 saat sürmüştür [98-100].

2004 yılında Atina'da klima kullanımının artmasıyla birlikte sistemin aşırı yüklenmesiyle gerilim çökmesi yaşanmıştır. Toplam yük kaybı 9 GW'tır [101].

## BÖLÜM 3. LYAPUNOV KARARLILIK TEORİSİ

### 3.1. Giriş

Lyapunov kararlılık teorisi dinamik sistemlerin kararlılığında önemli bir rol oynamaktadır. Kararlılığın özelliği dinamik sistemlerin davranışları için çok önemlidir [102]. Sistem kararlılığı, sistem durumlarında oluşan küçük bozululara karşı bir dinamik sistemin cevabının analiziyle karakterize edilir. Özellikle, başlangıç bozulmalarının yeterince küçük değerleri için bir dinamik sistemin bir denge noktasında kararlı olduğu söyleniyorsa, bozulmuş hareket durum uzayının rasgele belirlenmiş bir küçük bölgesinde devam eder. Diğer bir ifadeyle, kararlılık zamanla değişmez bir denge noktasının yakınında, sistemin başlangıç koşullarının bir fonksiyonu olarak, çözümlerin sürekliliğine eşdeğerdir [103].

Eğer bir sistem doğrusal fakat zamandan bağımsızsa, bu sistemde Routh-Hurwitz kararlılık kriteri, Nyquist kararlılık kriteri gibi kararlılık kriterlerinden bahsedilebilir [104]. Eğer sistem doğrusal veya doğrusal olmayan fakat zamana bağımlı ise, o zaman yukarıda belirtilen kararlılık kriterleri bu sisteme uygulanamaz. Doğrusal sistemlerde kararlılığın incelenmesi için genel çözüm metotları mevcut olmasına karşın doğrusal olmayan sistemlerin kararlılığının incelenmesi önemli bir sorundur.

1892 yılında Rus matematikçi Alexandr Mikhailovich Lyapunov çığır açıcı çalışması “*The General Problem of the Stability of Motion*” ile doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kararlılık analizine büyük katkı sağlamıştır [105-107]. Lyapunov, bu çalışmasıyla kararlılık probleminin çok hassas bir tartışma gerektiren karmaşık bir problem olduğunu göstermiştir.

Lyapunov, birinci metot (Lyapunov’un dolaylı metodu) ve ikinci metot (Lyapunov’un doğrudan metodu) olmak üzere iki önemli metot açıklamıştır [105-

107]. Her ikisi de adi diferansiyel denklemlerle veya fark denklemleriyle tanımlanan dinamik sistemlerin kararlılığının belirlenmesinde kullanılabilir. Hem zamanla değişen, hem de zamanla değişmeyen sistemlere doğrudan uygulanabilen yöntemlerdir [108].

Birinci metot, diferansiyel denklemin çözümünü kullanır ve dinamik sistemin kararlı olup olmadığını belirlemeye yarar. Yani, orijinal sistemin yerel kararlılığını belirlemek için sistemin doğrusallaştırılmasından yararlanır [109]. İkinci metot, dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağı verir. Bu nedenle bu metot pratikte çok yararlıdır [108]. İkinci metot, kesin çözümleri bulunmayan doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık analizi için uygundur. Bu metot zamana bağlı doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık durumlarının tespitinde en genel metottur. Bu metot bilinen tüm sistemlere uygulanabilir.

### 3.2. Lyapunov'un İkinci Metodu

Lyapunov'un doğrudan metodu olarak da bilinen Lyapunov'un ikinci metodunun esas açıklaması temel bir fiziksel gözlemin matematiksel uzantısı şeklindedir. Eğer bir mekanik veya elektriksel sistemin toplam enerjisi sürekli azalıyorsa, sistem doğrusal olsa da olmasa da en sonunda bir denge noktasına yerleşmelidir. Dolayısıyla, tek bir skaler fonksiyonun değişimi incelenerek bir sistemin kararlılığı konusunda bir sonuca varılabilir [110].

Eğer sistem asimptotik olarak kararlı bir denge durumunda ise, artan zamanla bir çekim yöresi dahilinde yer değiştirmiş sistemin depolanmış enerjisi sonunda denge durumunda minimum değere ulaşmaya kadar azalır. Lyapunov'un ikinci metodu işte bu genellemeye dayanmaktadır. Ancak, bir enerji fonksiyonu tanımlamanın basit bir yolu yoktur. Lyapunov, bu zorluğu aşmak için hayali bir enerji fonksiyonu olan Lyapunov fonksiyonunu ortaya atmıştır. Lyapunov fonksiyonu çok geneldir ve yaygın olarak kullanılabilir. Lyapunov kararlılık teoremlerinin şartlarına cevap veren herhangi bir skaler fonksiyon Lyapunov fonksiyonu olabilir [108].



Enerji (Lyapunov) fonksiyonu ile ilgili ayrıntılı bilgiler bölüm beşte enerji fonksiyonu analizi altında verilecektir.

### 3.3. Kararlılığa İlişkin Tanım ve Teoremler

Doğrusal olmayan dinamik sistemler genellikle

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.1)$$

denklemi ile ifade edilirler. Burada  $x$ ,  $n$  boyutlu bir durum vektörü olarak tanımlıdır.  $f(x, t)$  fonksiyonu da elemanları  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ve  $t$  olan  $n$  boyutlu bir vektördür. (3.1) eşitliğinde sistemin verilen ilk koşullarda tek çözüme sahip olduğunu varsayalım. (3.1) eşitliğinin çözümünü  $\phi(t; x_0, t_0)$  ile gösterebiliriz. Burada  $x=x_0$ ,  $t=t_0$  ve  $t$ 'de herhangi bir gözlem zamanıdır. Böylece,

$$\phi(t_0; x_0, t_0) = x_0 \quad (3.2)$$

olarak ifade edilebilir [108].

Bir sistemin denge noktası (3.1) nolu denklemin sifıra eşit olduğu noktadır. Bir başka deyişle, sistemin durum değişkenlerinin zamanla değişiminin (zamana göre türevi) sıfır olduğu noktadır. Lyapunov kararlılığına göre eğer bir sistemin ilk durumu bir denge noktasına yeterince yakın ise, sistemin durum değişkenlerinin hep o nokta civarında kalması gerekir [111].

(3.1) nolu denklem ile verilen sistemde  $x_e$  ifadesi burada,

$$f(x_e, t) = 0 \quad \text{bütün } t\text{'ler için} \quad (3.3)$$

olarak tanımlıdır. Sistemin durum vektörü  $x(t)$ , bir  $x_e$  noktasına ulaştığında her  $t$  anı için bu noktada kalıyorsa  $x_e$  sistemin bir denge durumudur.

Eğer sistem doğrusal ve zamana bağımlı değil ise yani  $f(x, t) = Ax$  ve  $A$  tekil değil ise, o zaman yalnızca bir tane denge noktası vardır. Eğer  $A$  tekil ise o zaman sonsuz tane denge noktası ortaya çıkar. Doğrusal olmayan sistem için bir veya daha fazla denge noktası olabilir. Bu durumlar sistemin sabit çözümlerine ( $x = x_e$  bütün  $t$ 'ler için) uygundur. Denge noktalarının belirlenmesi, sistemin diferansiyel eşitliğinin çözümünü gerektirmez, denklem (3.1) yalnızca (3.3) eşitliğinin çözümünü gerektirir. Herhangi bir izole edilmiş denge noktasının koordinatları orijine kaydırılabilir veya  $f(0, t) = 0$  koordinat çevirmesi ile de yapılabilir [108,112].

Sistem denge noktasında küçük bir değişim ile başka bir konuma getirildiğinde  $x \rightarrow \infty$  giderken tekrar denge noktasına geri geliyorsa, söz konusu denge noktası kararlıdır,  $x \rightarrow \infty$  giderken denge noktasından uzaklaşıyorsa, söz konusu denge noktası kararsızdır [113].

### 3.3.1. Lyapunov anlamında kararlılık

Bir  $x_e$  denge noktası civarında  $r$  yarıçaplı bir bölge aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\|x - x_e\| \leq r \quad (3.4)$$

Burada,  $\|x - x_e\|$ 'ye öklid norm denir ve

$$\|x - x_e\| = [(x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2]^{1/2} \quad (3.5)$$

ile tanımlıdır. Öyle bir  $S(\delta)$  bölgesi düşünelim ki bu  $S(\delta)$  bölgesi tüm noktaları içersin,

$$\|x - x_e\| \leq \delta \quad (3.6)$$

ve aynı şekilde  $S(\varepsilon)$  bölgesi de bütün noktaları içersin,

$$\|\phi(t; x_0, t_0) - x_e\| \leq \varepsilon \quad \text{tüm } t \geq t_0 \text{ için} \quad (3.7)$$

(3.1) eşitliğindeki sistemin bir  $x_e$  denge noktasında eğer her  $S(\varepsilon)$ 'na karşılık bir  $S(\delta)$  geliyorsa sistemin Lyapunov'a göre kararlı olduğu söylenir ki burada  $t$  sonsuza giderken  $S(\delta)$  bölgesinde başlayan sistemin yörüngesi  $S(\varepsilon)$ 'dan ayrılmaz. Bir başka deyişle  $S(\delta)$  bölgesinde başlayan sistemin yörüngesi  $t$  sonsuza giderken  $S(\varepsilon)$  bölgesi içerisinde kalıyorsa sistem kararlıdır denir. Bir reel sayı olan  $\delta$ ,  $\varepsilon$ 'na ve genelde de  $t_0$ 'a bağımlıdır. Eğer  $t_0$ 'a bağımlı değil ise denge noktası için düzgün kararlı denir [108,109,114,115].

### 3.3.2. Asimptotik kararlılık

(3.1) diferansiyel denkleminin bir  $x_e$  denge durumunda,  $t$  zamanında artan değerleri için  $S(\delta)$  bölgesinden başlayan her çözümü,  $S(\varepsilon)$  bölgesinin dışına çıkmadan  $x_e$ 'ye yaklaşırsa bu sistem asimptotik kararlı olarak adlandırılır.

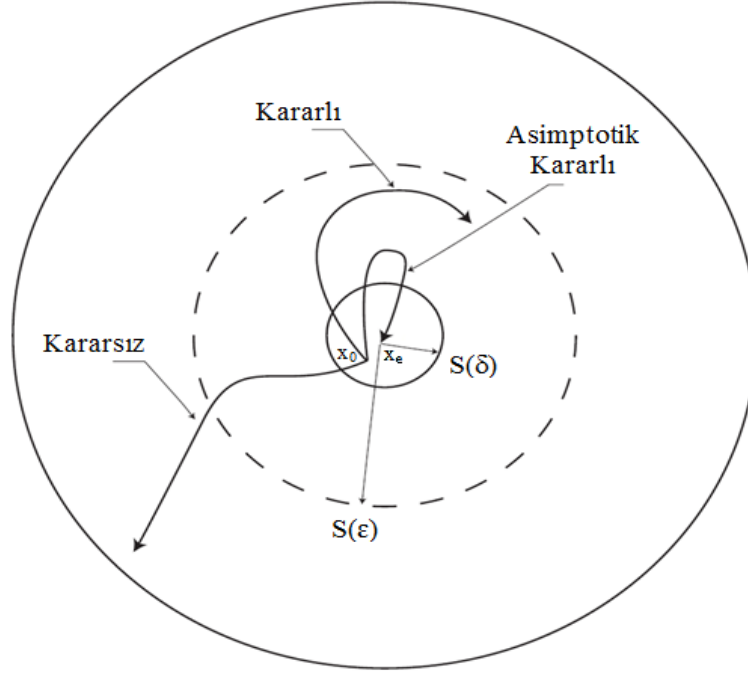
Asimptotik kararlılık, kararlılıktan daha önemlidir. Eğer asimptotik kararlılık bölgesel ise bu basitçe kurulu asimptotik kararlılık için sistemin uygun bir şekilde çalışacağı anlamına gelmez. Genelde asimptotik kararlılığın en büyük bölgesinin ölçülerinin bazı bilgileri gereklidir. Bu bölgeye çekicilik alanı denir. Bu, asimptotik kararlılık yörüngelerinin olduğu uzayın bölgesidir. Bir başka deyişle çekici alanında meydana gelen her yörünge asimptotik olarak kararlıdır [108-110,116].

Eğer asimptotik kararlılık bütün durum uzayı değişkenleri için geçerli ise sistem bu denge durumunda geniş anlamda asimptotik kararlı olarak adlandırılır. Bir başka deyişle, (3.1) eşitliğinde verilen sistemin bir denge noktası  $x_e$  için, eğer sistem kararlı ve her çözüm  $t$  sonsuza giderken  $x_e$ 'ye yaklaşıyorsa buna geniş anlamda asimptotik kararlı denir [108].

### 3.3.3. Kararsızlık

Kararsız sistemlerde (3.1) denkleminin çözümü,  $S(\varepsilon)$  bölgesinin dışına çıkar ya bir limit çevrimine girer ya da sonsuza giderse sistem kararsızdır.

İki boyutlu bir durum üzerinde düşünülduğünde, şekil 3.1 kararlılık, asimptotik kararlılık ve kararsızlık durumlarına karşılık gelen denge noktası ve uygun yörünge tiplerini göstermektedir. Şekil 3.1’de  $S(\delta)$  bölgesi  $x_0$ ’ın ilk durumunu ve  $S(\epsilon)$  bölgesi de  $x_0$ ’da yörüngeyi başlatmasını sınırlıyor.



Şekil 3.1. Kararlı, asimptotik kararlı ve kararsızlık denge noktaları ve yörüngelerin gösterilmesi

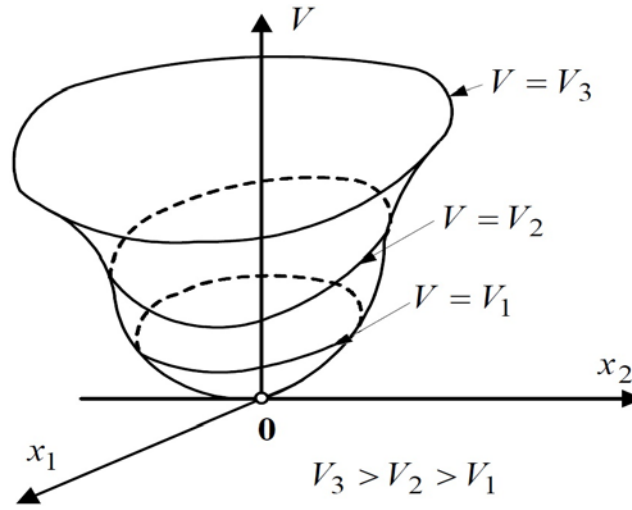
Yukarıdaki belirlemelerde ilk şartların kesin bölgesi açıkça belirtilmemiştir. Bu şekilde tanımlanan yaklaşım, denge noktasının etrafında  $S(\epsilon)$  bütün durum yüzeylerine karşılık gelinceye kadar devam eder.

Kararsızlık denge durumuna dikkat edilirse, görüldüğü gibi yörünge  $S(\epsilon)$ 'dan ayrılıyor. Eğer yörünge  $S(\epsilon)$  bölgesinde sınırın dışına yaklaşıyor ise, bunun anlamı belirsizliğe gitmeyeceğidir.

### 3.3.4. Skaler fonksiyonun pozitif, negatif, pozitif yarı, negatif yarı belirliliği ve belirsizliği [108-110,116]

Eğer bir  $V(x)$  skaler fonksiyonu durum uzayının başlangıç noktasını da içeren  $\Omega$  bölgesinde sıfır olmayan  $x$  durumları için  $V(x)>0$  ve  $V(0)=0$  özelliklerini sağlıyorsa

bu fonksiyon pozitif belirli fonksiyondur.



Şekil 3.2. Pozitif belirli bir fonksiyonun karakteristik şekli

Şekil 3.2’de durum değişkenleri  $x_1 - x_2$  eksenine,  $V$  ise  $z$  eksenine yerleştirilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi pozitif tanımlı  $V$  fonksiyonu orijinde sıfırdır ve durum değişkenleri arttıkça  $V_1 < V_2 < V_3$  eşitsizliğinde olduğu gibi artar.

Eğer  $-V(x)$  pozitif belirli ise  $V(x)$  negatif belirlidir denir.

Bir skaler fonksiyon  $V(x)$  orijinden ve nerede sıfır olduğu belirli durumlar haricinde eğer  $\Omega$  bölgesinin her yerinde pozitif belirli ise bu  $V(x)$  fonksiyonuna pozitif yarı belirli denir. Eğer  $-V(x)$  pozitif yarı belirli ise  $V(x)$  negatif yarı belirlidir denir.

Bir skaler fonksiyon  $V(x)$  bir  $\Omega$  bölgesinde hem pozitif hem de negatif ise bu  $V(x)$  fonksiyonuna belirsizdir denir.  $\Omega$  bölgesinin ne kadar küçük olduğu önemli değildir.

Yukarıda verilen tanımlamalara bağlı olarak aşağıda birkaç skaler fonksiyon ve sınıflandırılması örnek olarak verilmiştir.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad \longrightarrow \quad \text{pozitif belirli}$$

$$V(x) = (x_1 + x_2)^2 \quad \longrightarrow \quad \text{pozitif yarı belirli}$$

$$V(x) = -x_1^2 - (2x_1 + x_2)^2 \longrightarrow \text{negatif belirli}$$

$$V(x) = x_1x_2 + x_1^2 \longrightarrow \text{belirsiz (} x_1x_2 \text{ çarpımı içermektedir)}$$

### 3.3.5. Kuadratik form

Lyapunov'un ikinci metodunda kararlılık analizinin temelinde yer alan önemli kurallardan biri de skaler fonksiyonun kuadratik form şeklinde formüle edilmesidir.

Kuadratik form;

$$V(x) = \sum_{i,j}^n p_{ij}x_i x_j = x^* P x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{12} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

olarak verilebilir. Burada P simetrik bir matristir. V(x)'in pozitif belirli olması için Sylvester teoremine göre;

$$p_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ p_{1n} & p_{2n} & \dots & p_{nn} \end{vmatrix} > 0 \quad (3.9)$$

olmalıdır [108,115].

### 3.4. Lyapunov'un Asıl Kararlılık Teoremi

Eğer, x n-boyutlu bir vektör olmak üzere, bir skaler fonksiyon V(x) pozitif belirli ise o zaman x'in durumları,

$$V(x) = C \quad (3.10)$$

olur. Burada  $C$   $n$ -boyutlu uzayda orijin civarında kapalı bir hiperyüzey boyunca uzanan bir pozitif sabittir. Eğer  $\|x\| \rightarrow \infty$  iken  $V(x) \rightarrow \infty$  ise o zaman oluşan yüzey bütün uzayı kapsar. Eğer  $C_1 < C_2$  ise hiperyüzey  $V(x) = C_1$ , hiperyüzey  $V(x) = C_2$ 'nin içinde yer alır.

Verilen bir sistem için, eğer böyle bir pozitif belirli skaler fonksiyon  $V(x)$  bulunabiliyorsa ve onun bir yörünge boyunca zamana göre alınan türevi daima negatifse, o zaman, zaman arttıkça  $V(x)$  daha küçülür ve  $C$ 'nin daha küçülen değerlerini alır. Zaman arttıkça,  $V(x)$  sifıra çekilir ve böylece  $x$ 'de sifıra çekilir. Bu uzayın orijininin asimptotik kararlılığını gösterir. Bu bahsedilen gerçeklerin genellemesinden ibaret olan Lyapunov'un asıl kararlılık teoremi asimptotik kararlılık için yeterli bir şart oluşturur. Bu teorem aşağıdaki gibi gösterilebilir [108]:

**Teorem 3.1.** Bir sistemin denkleminin;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad f(0, t) = 0, \quad \text{tüm } t\text{'ler için} \quad (3.11)$$

biçiminde verildiğini varsayalım. Eğer  $V(x, t)$  gibi sürekli, birinci mertebeden türevleri olan ve  $V(x, t)$  pozitif belirli,  $\dot{V}(x, t)$  negatif belirli olan bir skaler fonksiyon bulunabiliyorsa, bu sistemin başlangıç noktasındaki kararlılığı asimptotik kararlılık özelliğindedir.

Ayrıca, eğer  $\|x\| \rightarrow \infty$  iken  $V(x, t) \rightarrow \infty$  ise sistem geniş anlamda düzgün asimptotik kararlıdır [108,110,112].

Bu teoremin koşulları aşağıdaki gibi değiştirilerek tekrar yazılabilir:

Bir sistemin denkleminin;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad f(0, t) = 0 \quad \text{tüm } t \geq t_0 \text{ için} \quad (3.12)$$

biçiminde verildiğini varsayalım. Öyle bir skaler fonksiyon  $V(x,t)$  belirleyelim ki sürekli ve birinci mertebeden türevleri olsun. Ayrıca aşağıdaki şartlara uygun olsun.

1.  $V(x,t)$  pozitif belirlidir.
2.  $\dot{V}(x,t)$  negatif yarı belirlidir.
3.  $\dot{V}(\phi(t; x_0, t_0), t)$   $t \geq t_0$ 'da herhangi bir  $t_0$  ve herhangi bir  $x_0 \neq 0$  için sıfır olmaz.

Burada  $\phi(t; x_0, t_0)$ ,  $t_0$ 'da  $x_0$ 'dan yörünge veya çözümün başladığını gösterir.

O zaman sistemin orijindeki denge noktası düzgün olarak geniş anlamda asimptotik kararlıdır.

Eğer sistemin denge noktası  $x=0$  kararsız ise, o zaman orada denge noktasının kararsızlığını tespit eden bir skaler fonksiyon  $W(x,t)$  vardır [108].

**Teorem 3.2.** Bir sistemin denkleminin;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad f(0, t) = 0 \quad \text{tüm } t\text{'ler için} \quad (3.13)$$

biçiminde verildiğini varsayalım. Öyle bir skaler fonksiyon  $W(x,t)$  belirleyelim ki sürekli ve birinci mertebeden türevleri olsun. Ayrıca aşağıdaki şartlara uygun olsun.

1.  $V(x, t)$  pozitif belirlidir.
2.  $\dot{V}(x, t)$  negatif yarı belirlidir.

Sistemin orijindeki denge noktası düzgün kararlıdır [108,112].

**Teorem 3.3.** Bir sistemin denkleminin;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad f(0, t) = 0 \quad \text{tüm } t \geq t_0 \text{ için} \quad (3.14)$$



biçiminde verildiğini varsayalım. Öyle bir skaler fonksiyon  $W(x,t)$  belirleyelim ki sürekli ve birinci mertebeden türevleri olsun. Ayrıca aşağıdaki şartlara uygun olsun.

1.  $W(x,t)$  orijin civarında bazı bölgelerde pozitif kararlıdır.
2.  $\dot{W}(x,t)$  'de aynı bölgede pozitif kararlıdır.

Böylece sistemin orijindeki denge noktası kararsızdır denilebilir [108,112].

**Teorem 3.4.** Bir sistemin durum denklemi aşağıdaki biçimde;

$$\dot{x} = Ax \quad (3.15)$$

olarak verilsin. Burada  $A$ 'nın  $n \times n$  boyutunda tekil olmayan bir matris  $x$ 'inde  $n \times 1$  bileşenli bir vektör olduğunu varsayalım. Verilen herhangi bir pozitif belirli reel simetrik matris  $Q$  için gerek ve yeter şart denge noktasının  $x=0$  geniş anlamda asimptotik kararlı olmasıdır ve bulunan bir pozitif belirli reel simetrik matris  $P$  şöyle yazılabilir:

$$A^*P + PA = -Q \quad (3.16)$$

Skaler fonksiyon  $x^*Px$  bu sistem için bir Lyapunov fonksiyondur [108,110]. Bu teoremi uygularken birkaç önemli noktaya dikkat etmek gerekir [108]:

1. Eğer  $\dot{V}(x) = -x^*Qx$  herhangi bir yörünge boyunca sıfır olmuyorsa o zaman  $Q$  pozitif yarı belirli olarak seçilebilir.
2. Eğer  $Q$  gibi rastgele bir pozitif belirli matris seçilirse ve  $P$ 'nin tespiti için matris denklemi çözümlerse;

$$A^*P + PA = -Q \quad (3.17)$$

elde edilir.  $P$ 'nin pozitif belirliliği  $x=0$  denge noktasının asimptotik kararlılığı için gerek ve yeter şarttır.

3. Eğer  $Q$  pozitif belirli veya pozitif yarı belirli ise  $P$ 'nin çözümü  $Q$ 'dan ziyade  $A$ 'ya bağımlıdır.

4.  $P$  matrisinin elemanlarının tespiti için  $A^*P + PA$  matrisi ile  $-Q$  matrisinin elemanları birbirine eşlenir.  $P$ 'nin  $p_{ij} = \bar{p}_{ji}$  elemanlarının tespiti için bu sonuçlar  $n(n+1)/2$ 'de doğrusal eşitliklerdir. Eğer  $A$ 'nın sistem kökleri  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  ile gösterilirse karakteristik eşitliğin bir kökü gibi her tekrarlanmada onun çarpımı kadar sıklaşır ve eğer iki kökün her toplamı için,

$$\lambda_j + \lambda_k \neq 0 \quad (3.18)$$

ise, o zaman  $P$ 'nin elemanları birbirinden farksızca belirlenir. Eğer matris  $A$ , bir kararlı sistem gösterirse, o zaman  $\lambda_j + \lambda_k$  toplamı daima sıfırdan farklıdır.

5. Bir pozitif belirli reel simetrik matris  $P$ 'nin olup olmadığı tespit edilir, eğer  $I$  benzer bir matris ise  $Q=I$  seçmek uygun olur. O zaman  $P$ 'nin elemanları,  $A^*P + PA = -I$ 'dan belirlenir ve  $P$  matrisi pozitif belirlilik için test edilir.

### 3.5. Lyapunov Fonksiyonlarının Elde Edilmesine İlişkin Metotlar

Lyapunov kararlılık teorisi genel ve başarılı bir yaklaşım olmasına rağmen, Lyapunov fonksiyonunu elde etmenin genel bir yöntemi mevcut değildir. Lyapunov'un ikinci metodundan ortaya çıkan birkaç metot, doğrusal olmayan sistemlerin kararlılığının tespiti için uygundur. Krasovskii metodu, Ingwerson metodu, Zubov metodu ve Schultz-Gibson değişken gradiyent metodu bu metotlar arasında sayılabilir. Daha fazla metot için kaynak [117]'ye bakılabilir. Bu kısımda diğer metotlar kısaca açıklandıktan sonra tezin konusunu oluşturan değişken gradiyent metodu ayrıntılı bir şekilde gösterilecektir.

Değişken gradiyent metodu, bir Lyapunov fonksiyonu elde edilmesine ilişkin en ünlü metotlardan birisidir. Bu metot çok çeşitli alanlarda kullanılmış ve metotla ilgili birçok algoritma oluşturulmuştur [118-121]. Uygun bir fonksiyonun seçiminde oldukça esneklik sağlayan bu metot, çok genel ve güçlü bir yöntemdir. Dahası, kararlılıkla ilgili çok genel koşulları da sağlamaktadır. Değişken gradiyent metodu,

otonom sistemlere uygulanabilir ve verilen bir sistem için istenilen Lyapunov fonksiyonunun bulunmasını sağlar. Değişken gradiyent metodunun bütün bu özellikleri bu tezde tercih edilmesinin nedenleridir.

### 3.5.1. Krasovskii metodu [103,110,122,123]

Krasovskii metodu, geniş anlamda asimptotik kararlılığın belirlenmesinde doğrusal olmayan sistemler için yeterli şartları ve doğrusal sistemler içinde gerekli ve yeterli şartları verir. Bir doğrusal olmayan sistemin denge noktası bu teoremdaki şartların yeterli olmadığını gösterse de kararlı olabilir.

Bir sistem aşağıdaki biçimde tanımlı olarak verilsin:

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.19)$$

Burada  $x$ ,  $n$  boyutlu vektör,  $f(0)=0$  ve  $f(x)$ ,  $i=1,2,\dots,n$  için  $x_i$  ile türevlenebilir olmak üzere, bu sistem için  $A(x)$  Jakobiyen matrisi;

$$A(x) = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Krasovskii metodu  $A^*$ ,  $A$ 'nın transpozunu olmak üzere bir  $F(x)$  matrisinin,

$$F(x) = A^*(x) + A(x) \quad (3.21)$$

şeklinde seçimini esas alır.  $F(x)$  negatif belirli ise o zaman denge noktasında orijinde asimptotik kararlıdır. Bu sistem için bir Lyapunov fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V(x) = f^*(x)f(x) \quad (3.22)$$

Eğer  $\Omega$  bölgesi tüm durum uzayı ve  $\|x\| \rightarrow \infty$  iken  $V(x) \rightarrow \infty$  ise, o zaman denge noktası global asimptotik kararlıdır.

### 3.5.2. Ingwerson metodu [112,117,124,125]

Bir otonom sistem;

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.23)$$

olarak verilsin. Sistemi değiştirerek tekrar yazarsak;

$$\ddot{x} = A(x)\dot{x} \quad (3.24)$$

elde edilir. Burada  $A(x)$  aşağıdaki gibi ifade edilen  $n \times n$  Jakobiyen matristir:

$$A_{ij}(x) = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.25)$$

Ingwerson'ın önerdiği uygun bir Lyapunov fonksiyonunun elde edilmesine ilişkin çözüm yolu aşağıdaki maddelerle açıklanabilir:

1. (3.26) eşitliği ile verilen Lyapunov matris denklemi;

$$A^*(x)B(x) + B(x)A(x) = -C \quad (3.26)$$

çözülür. Burada  $C = C^* > 0$  olmak üzere, uygun bir pozitif belirli veya pozitif yarı belirli sabit matristir.

2. Çözümünden yeni bir matris olan  $A^*$  elde edilir.  $A^*$  matrisinin her elemanı ( $a^*_{ij}$ )  $A(x)$ 'e karşılık gelen elemanlardan ( $a_{ij}$ ) oluşturulur. Böylece,  $x_i$  ve  $x_j$  haricindeki  $a_{ij}$  içinde bulunan tüm  $x_k$ 'lar sifıra eşittir:

$$a^*_{ij} = a^*_{ij}(x_i, x_j) = a_{ij}(0, 0, 0, x_i, 0, 0, x_j, 0, \dots, 0) \quad (3.27)$$

3.  $V$ 'nin gradiyenti  $\nabla V$  (3.28) ile verilen eşitlikteki bileşenleri karşılayacak şekilde oluşturulur.

$$\nabla V_i = \sum_{j=1}^n \int_{x_j=0}^{x_j=x_j} a^*_{ij}(x_i, x_j) dx_j \quad (3.28)$$

4.  $V$ , (3.29) ile verilen  $\nabla V$ 'nin çizgisel integralinden elde edilir:

$$V = \int_0^x (\nabla V)^* dx \quad (3.29)$$

5. Elde edilen  $V$  ve türevi  $\dot{V}$ 'nin Lyapunov fonksiyonu özelliklerini taşıyıp taşımadığı kontrol edilir.

### 3.5.3. Zubov metodu [123,125,126]

Bir otonom sistem;

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.30)$$

olarak verilsin.

Bu metot, negatif belirli bir  $r$  fonksiyonunun (3.30) sisteminin çözümleri boyunca Lyapunov fonksiyonunun türevi olarak seçimini ve buna bağlı olarak;

$$\nabla V(x)f(x) = r(x) \quad (3.31)$$

Kısmi diferansiyel denkleminin  $V(0) = 0$  sınır koşulu ile birlikte  $V(x)$  çözümünün bulunmasını esas alır.

Eğer sistemin denge durumu asimptotik kararlı ise orijin komşuluğunda  $V(x)$  pozitif belirli olmalıdır. Gerçekten,

$$V\{\varphi(t, x)\} = V(x) + \int_0^t r(\varphi(t, x))dt \quad (3.32)$$

eşitliği 0 denge durumunun çekim kümesi içinde bir  $x$  başlangıç durumu için  $x \neq 0$  olduğunda,

$$V(x) = -\int_0^{\infty} r(\varphi(t, x))dt \quad (3.33)$$

fonksiyonu pozitiftir.

Eğer  $x$ , 0 çözümünün çekim kümesinin sınırına yakınsıyor ise  $V(x)$  sonsuza gider. Buradan asimptotik kararlılık bölgesi,  $V(x)$ 'in sonsuza gittiği durum uzayındaki  $x$  noktalarının kümesinin tanımlanmasıyla bulunabilir.

Genellikle bu yöntem,  $V$  fonksiyonunun sonsuz olduğu noktalardan kaçınmak için  $V(x)$ 'e bağlı bir  $Z$  fonksiyonu,

$$Z = 1 - \exp(-V(x)) \quad (3.34)$$

şeklinde değiştirilir. (3.31) denklemini  $Z(0) = 0$  sınır koşulu ile,

$$\dot{Z} = f(x)^* \nabla Z = r(x)[1 - Z(x)] \quad (3.35)$$

şeklini alır. Sıfır denge durumu çekiminin tanım kümesinin sınırı  $Z(x) = 1$ 'den elde edilir.

### 3.5.4. Değişken gradiyent metodu [103,110,112,113,117,123,125,127-130]

Schultz ve Gibson, 1962 yılında doğrusal olmayan otonom sistemlerin kararlılığının belirlenmesi için Lyapunov fonksiyonlarının elde edilmesi amacıyla mantıksal ve sistematik bir metot olan değişken gradiyent metodu öne sürmüşlerdir. Değişken gradiyent metodu, Lyapunov fonksiyonlarının oluşturulması için düzgün bir yaklaşımdır. Bu metot, bilinmeyen bir Lyapunov fonksiyonunun gradiyenti için kesin bir form varsayımını içermektedir ve varsayılan gradiyentin integrali ile Lyapunov fonksiyonunun kendisinin bulunmasıdır. Eğer verilen bir sistem için kararlılığın doğruluğunu gösterebilen özel bir Lyapunov fonksiyon bulunabiliyorsa bu V fonksiyonunun bir gradiyenti de vardır.

Bir doğrusal olmayan otonom sistem;

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.36)$$

olarak verilsin. V ile bir test Lyapunov fonksiyonu gösterilsin. Bu fonksiyonda V, x'in açık fonksiyonu fakat t'nin açık fonksiyonu olmadığı varsayılınsın. Burada;

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt} \quad (3.37)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik (3.37), gradiyent açısından aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{V} = (\nabla V)^* \dot{x} \quad (3.38)$$

Burada  $(\nabla V)^*$ , bir satır vektörüdür ve  $\nabla V$ 'nin transpozudur.  $V$ ,  $\nabla V$ 'nin bir çizgisel integrali olarak elde edilebilir:

$$V = \int_0^x (\nabla V)^* dx \quad (3.39)$$

Burada integralin üst limiti  $V$ 'nin bir vektör büyüklüğü olduğunu göstermez, fakat integral faz uzayında rastgele bir noktanın  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  çizgisel integraline tercih edilir.

Bir skaler fonksiyon  $V$ , bir vektörel fonksiyon  $\nabla V$ 'nin çizgisel integralinden eşsiz olarak elde edilebilmesi için, aşağıdaki  $\Phi$  matrisi  $\partial \nabla V_i / \partial x_j$  ile şekillenmelidir.

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla V_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \nabla V_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \nabla V_n}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \nabla V_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \nabla V_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \nabla V_n}{\partial x_2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \nabla V_1}{\partial x_n} & \frac{\partial \nabla V_2}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial \nabla V_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Aşağıdaki eşitliğin sağlanabilmesi için  $\Phi$  matrisinin simetrik olması gerekir.

$$\frac{\partial \nabla V_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \nabla V_j}{\partial x_i} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.41)$$

Bu eşitliklerin toplam sayısı  $n(n-1)/2$ 'dir. Örneğin,  $n=2$  olması halinde bir eşitlik söz konusudur:

$$\frac{\partial \nabla V_1}{\partial x_2} = \frac{\partial \nabla V_2}{\partial x_1} \quad (3.42)$$



$\Phi$  matrisinin bu şartı  $n$  boyutlu durum için bir genel rotasyonel ihtiyacıdır. Artık, Lyapunov teoremi için yeterli olan bir  $V$  fonksiyonunu elde etme problemi  $n$  boyutlu rotasyoneli sifıra eşit olan bir  $\nabla V$  bulma problemine dönüşmüştür. Bununla birlikte  $\nabla V$ 'den belirlenen  $V$  ve  $\dot{V}$  kararlılığın ispatı için yeterli olmalıdır. Ayrıca Lyapunov teoremini de yerine getirmelidirler.

Lyapunov fonksiyonunu elde etmek için uygulanan işlemler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1.  $\nabla V$  seçilir.
2.  $\nabla V$ 'den  $\dot{V}$  belirlenir.
3.  $\dot{V}$ , en azından negatif belirli olmaya zorlanır.
4. “ $\nabla V$ 'deki bilinmeyen katsayıları belirlemek için  $\Phi$  simetrik olmalıdır” ifadesinin işaret ettiği  $n(n-1)/2$  rotasyonel denklemi kullanılır.
5.  $\dot{V}$  tekrar kontrol edilir, çünkü 4. adımın sonuçları gerekli terimlerin eklenmesi ile  $\dot{V}$ 'nü değiştirebilir.
6. (3.39) eşitliği ile  $V$  belirlenir ve asimptotik kararlılığın bölgesi kontrol edilir.

Bir dinamik sistemin en basit formunda kolayca oluşturulan Lyapunov fonksiyon gradiyent sistemdir. Bu formun bir sistemi;

$$\dot{x} = -A\nabla V(x, x_0) \quad (3.43)$$

şeklinde tanımlı olarak verilsin. Burada;  $V, \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$  devamlı olarak diferansiyellenebilir.  $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$ ,  $\det(A) \neq 0$ ,  $x = x_0$ 'da  $V(x, x_0) = 0$  ve  $\nabla V(x, x_0) = 0$  olarak tanımlıdır.

Eğer  $x_0$ 'da  $V$ 'nin Hessian'ı kesin pozitif belirli ise  $x_0$ 'da denge noktası asimptotik kararlıdır.

Lyapunov fonksiyon aşağıdaki denklem ile verilir:

$$V(x) = \int_{x_0}^x [f(\xi)]^T d\xi \quad (3.44)$$

(3.44) ile verilen Lyapunov fonksiyon denklemi tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara sistem modelleri ile dört baralı sistemde kullanılmıştır.

**Teorem 3.5.** Lyapunov fonksiyon olarak kullanılan  $V(x, x_0)$  için gerekli olan birinci kabul  $A$ ,  $\nabla V(x, x_0)$  ve (3.43)'ün yörüngelerinin yapısıyla ilgilidir.

$$S = \{x \mid \nabla V(x, x_0)^T (A + A^T) \nabla V(x, x_0) = 0\} \quad (3.45)$$

Burada  $(A+A^T)$  matrisi pozitif yarı belirlidir. Lyapunov fonksiyon formuna gradiyent sistemin tanımlanmasıyla oluşturulacak denklemin denkliği yalnızca  $\nabla V(x, x_0) = 0$  noktalarında olur. Bu oluşturulacak denklemden gözlemlenebilir. Ayrıca,  $A$  tekil değildir.

Eğer denge noktası  $x_0$ 'da denklem (3.43)'ün doğrusallaştırılması kesin kararlıysa,  $x_0$ 'da  $\nabla^2 V(x, x_0) > 0$  yani  $V$ 'nin Hessian'ı kesin pozitif belirlidir.

Teorem 3.5 ile verilen özellikler kapsamında bir çalışma noktası için önerilen enerji fonksiyonu kesin Lyapunov fonksiyondur denilebilir.

## **BÖLÜM 4. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ**

### **4.1. Giriş**

Günümüz karmaşık ve enterkonnekte elektrik güç sistemlerinin ekonomik, güvenilir ve güvenli işletilebilmesinin sağlanabilmesi için iletim hatları, farklı yük modellemelerine ve üretimde olabilecek değişikliklere karşı esnek olmalıdır. Ayrıca enerjinin kesintiye uğramadan sağlanması ve oluşabilecek arızalara hızlı cevap vermesi gerekir.

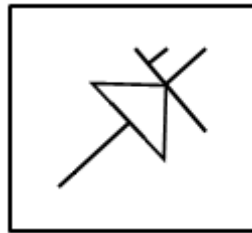
Elektrik güç sistemlerinin çok büyük bir bölümü alternatif akım iletim sistemlerinden oluşmaktadır. Alternatif akım iletim sistemleri esnek olmayan yapılardır. Esnek olmamasının nedeni sistemin herhangi bir değişime hızlı bir şekilde cevap verememesi ve güç akışının istenilen şekilde kontrol edilememesidir. Güç akışı hat empedansı, hat başı ve hat sonu gerilimleri ile faz açısının bir fonksiyonudur. Paralel ve seri kompanzasyon yapılarak hat empedansının kontrolü ile gerilim büyüklüğü, faz açısı ve hat akımının kontrolü yapılarak güç faktörünün iyileştirilmesi dolayısıyla güç transferinin artırılması mümkündür [131].

Son yıllarda, anahtarlama hızlarının yüksek olması sebebiyle güç elektroniği elemanları elektrik güç sistemleri kompanzasyon uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Böylece gerilim çökmelerinin önlenebileceği ve kararlılığın artırılacağı öngörülmüştür. Güç elektroniği elemanları tüm dünyada elektrik güç sistemleri üzerinde devrim niteliğinde bir etki yapmıştır. Kontrol ve anahtarlama işlemleri için güç sistemlerinde tristörlerin kullanılmasıyla yeni nesil tristör tabanlı hızlı işletim cihazları ortaya çıkmıştır. Alternatif akım iletim sistemlerinin kontrol edilebilirliğini, kararlılığını ve güç transfer yeteneğini artırma olanağı sağlayan, güç elektroniği tabanlı bu yeni cihazlara esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS) adı verilmiştir [132,133].

FACTS'in açılımındaki "esnek" kelimesi bu cihazların kontrol edilebilir olduğu ve hızlı cevap verme yeteneğine sahip olduğu anlamını taşımaktadır. FACTS cihazlarının kullanımının amacı mekanik elemanların yerini daha güvenli ve daha hızlı olan güç elektroniği tabanlı elemanların alması ve böylece güç sistemi kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini arttırmaktır.

#### 4.2. FACTS Kavramı

Elektrik enerji sistemlerindeki, özellikle 1970'li yıllarda olan, hızlı gelişmeler gerilim kararsızlığı, uzun ve yüklü hatlardaki aktif güç kararsızlığı ve frekans kontrolü gibi sorunları beraberinde getirmiştir. Bu gibi sorunların ortadan kaldırılması için, FACTS kavramı 1980'li yıllarda Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü'nde (Electric Power Research Institute – EPRI) N. G. Hingorani tarafından ortaya atılmıştır [134]. FACTS cihazları genel olarak şekil 4.1'deki gibi sembolize edilir.



Şekil 4.1. FACTS cihazlarının genel sembolü

IEEE'ye göre FACTS ile ilgili tanımlamalar şu şekilde verilmektedir [135-138]:

Elektrik güç iletiminin esnekliği, çalışma koşullarındaki değişikliklere uyum sağlama yeteneği veya sürekli hal ve geçici hal sınır değerlerini belirli bir seviyede tutacak biçimde elektrik iletimi olarak tanımlanmıştır.

FACTS ise kontrol edilebilirliği ve güç transfer kapasitesini arttırmak için güç elektroniği tabanlı veya diğer statik kontrolörler içeren alternatif akım iletim sistemleri şeklinde tanımlanmıştır.

Bir veya birden fazla alternatif akım iletim parametrelerinin kontrolünü sağlayan güç elektroniği tabanlı sistemler veya diğer statik donanımlar FACTS kontrolörleri olarak tanımlanmıştır.

1980'li yıllardan beri FACTS ile ilgili gerekli standartların oluşturulması için, FACTS cihazlarının tasarım ve işletmesinde dikkat edilmesi gereken hususların belirlenmesi için EPRI, CIGRE ve IEEE gibi birçok kuruluş çalışmalar yapmaya devam etmektedir [139].

### 4.3. FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması

FACTS cihazlarındaki gelişmeler, bu cihazların sınıflandırılması ihtiyacını doğurmuştur. FACTS cihazları için farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır.

#### 4.3.1. Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları

Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları tristör kontrollü FACTS cihazları ve gerilim kaynaklı anahtarlama çevirici FACTS cihazları olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları grupları ve anahtarlama cevapları özet halinde tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Teknolojik özelliklerine göre FACTS cihazları grupları ve anahtarlama cevapları

| FACTS Cihazı Grubu            | 1. Grup                           | 2. Grup  |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>Kullanılan Eleman Tipi</b> | Tristör Kontrollü Elemanlar       | Gerilim Kaynaklı Anahtarlama Çevirici Elemanlar (GTO, IGBT, IGCT, MCT) |
| <b>FACTS Cihazı</b>           | Anahtarlama Frekansında 2-3 Döngü | Anahtarlama Frekansında 1-2 Döngü                                      |
| <b>Cevap Hızı</b>             | Hızlı                             | Hızlı  |

FACTS cihazlarının gelişiminin temel taşı tristörlerdir. Birinci grup FACTS cihazları anahtarlama ve düzenleme elemanı olarak geleneksel tristörleri kullanırlar. Tristörler de kapasitör ve reaktörler ile kademe değiştirebilen transformatörleri kontrol ederler. Burada amaç bu güç sistem bileşenlerinin cevap verme sürelerini hızlandırmaktır. Statik VAR Kompanzator (Static VAR Compensator – SVC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (Thyristor-Controlled Series Capacitor – TCSC) ve Tristör Kontrollü Faz Kaydırıcı (Thyristor-Controlled Phase Shifter – TCPS) birinci grup tristör kontrollü FACTS cihazlarından [5,140]. Tristör kontrollü bu cihazlar mekanik olarak çalışan geleneksel cihazların (kesici anahtarlama kapasitör ve reaktör, faz kaydırıcı, kademe değiştirebilen transformatör vb.) devre düzenlerine benzer devre yapılarına sahip olmalarına karşın bu cihazlardan son derece hızlı çalışırlar [141].

500 kV'luk güç sistemine, nominal değeri 100 MW'ı bulan tristörler seri bağlanmaktadır. Yarı iletkenin tetiklenmesi için gereken kapı darbeleri açısından bir problem oluşturan bu durum, tetikleme devresinde fiber optik kabloların kullanımıyla ve soğutma tekniğindeki gelişmelerle çözülmüştür. Tristörden geçen akım belli bir değerin altına düştüğünde iletim durumundan kesime geçer. Bu da anahtarlama çalışmaları uygulamalarında kullanılamamasına neden olduğundan bir diğer problemdir. Yüksek gerilim ve güç değerlerine sahip Kapıdan Kesimli Tristör (Gate Turn-Off Thyristor - GTO) kullanımıyla bu problem de ortadan kaldırılmıştır [142].

İkinci grup FACTS cihazları, kapasitör ve reaktör bankları kullanmaksızın iletim hatları kompanzasyonu için kapasitif ve endüktif reaktif gücü sağlayan GTO ve kendinden komütasyonlu doğru akımı alternatif akıma çeviren elemanları kullanırlar [140]. Ayrıca, maliyet açısından ve tasarımdaki kolaylıklar sebebiyle akım kaynaklı çeviriciler yerine gerilim kaynaklı çeviriciler tercih edilir. Statik Senkron Kompanzator (Static Synchronous Compensator – STATCOM), Statik Senkron Seri Kompanzator (Static Synchronous Series Compensator – SSSC), Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (Unified Power Flow Controller – UPFC) ve Hatlararası Güç Akış Kontrolörü (Interline Power Flow Controller – IPFC) ikinci grup gerilim kaynaklı anahtarlama çevirici FACTS cihazlarından [5,140].

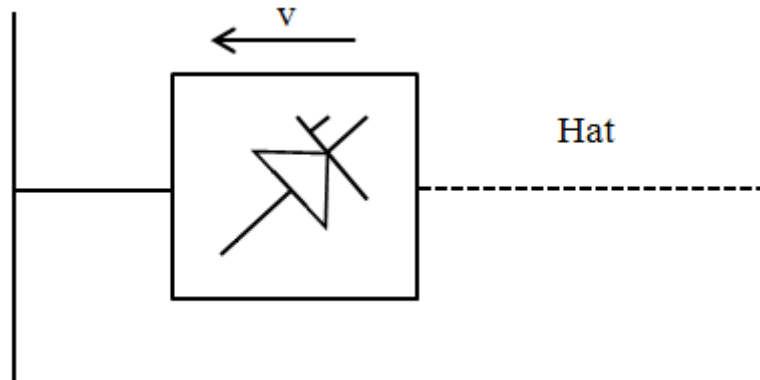
Her iki grup FACTS cihazları da birbirinden farklı işletim ve performans özelliklerine sahiptir.

### 4.3.2. Güç sistemine bağlanma şekillerine göre FACTS cihazları

FACTS cihazları güç sistemine bağlanma şekillerine göre seri bağlı FACTS cihazları, paralel bağlı FACTS cihazları, birleşik yapıli seri-seri bağlı FACTS cihazları ve birleşik yapıli seri-paralel bağlı FACTS cihazları olmak üzere dört gruba ayrılır.

#### 4.3.2.1. Seri bağlı FACTS cihazları

Seri bağlı FACTS cihazları kapasitör, reaktör gibi değişken empedanslı, değişken kaynaklı veya bunların birleşimi olan cihazlardır. Temelde tüm seri FACTS cihazları gerilimi iletim hattına seri olarak verirler. Şekil 4.2’de iletim hattına seri bağlı bir FACTS cihazı gösterilmektedir.

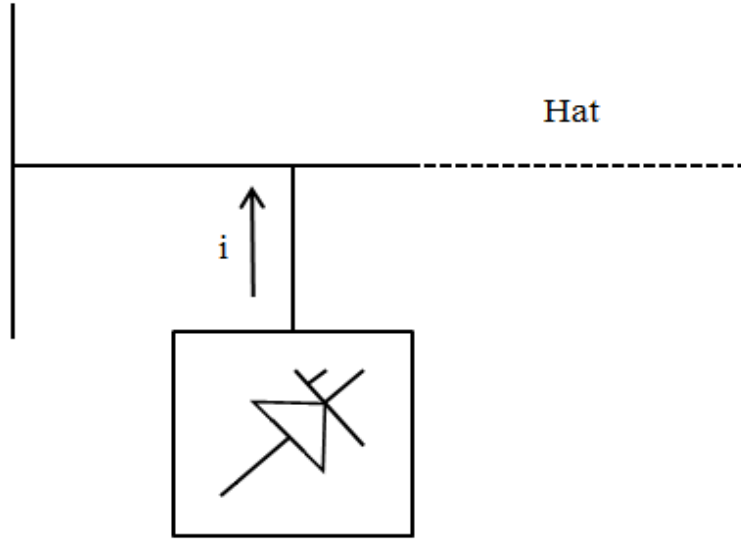


Şekil 4.2. İletim hattına seri bağlı FACTS cihazı [143]

Eğer hat gerilimi ile hat akımı arasındaki faz farkı  $90^\circ$  olursa, seri bağlı FACTS cihazı hatta reaktif güç verir veya hattan reaktif güç çeker. Diğer faz açısı durumlarında ise seri bağlı FACTS cihazı hatta aktif ve reaktif güç verir veya hattan aktif ve reaktif güç çeker [144]. TCSC ve SSSC gibi FACTS cihazları iletim hattına seri bağlanarak, etkili bir şekilde sistemin güç akışını ve akımını kontrol ederler ve sistem salınımlarını sönmölerler [138,145].

#### 4.3.2.2. Paralel bağı FACTS cihazları

Değişken empedanslı, değişken kaynaklı veya bunların birleşimi olan cihazlardır. Paralel bağı FACTS cihazları, seri bağı FACTS cihazlarına benzemekle birlikte iletim hattına bağlandıkları noktadan sisteme akım verirler. İletim hattına paralel bağı bir FACTS cihazı şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. İletim hattına paralel bağı FACTS cihazı [143]

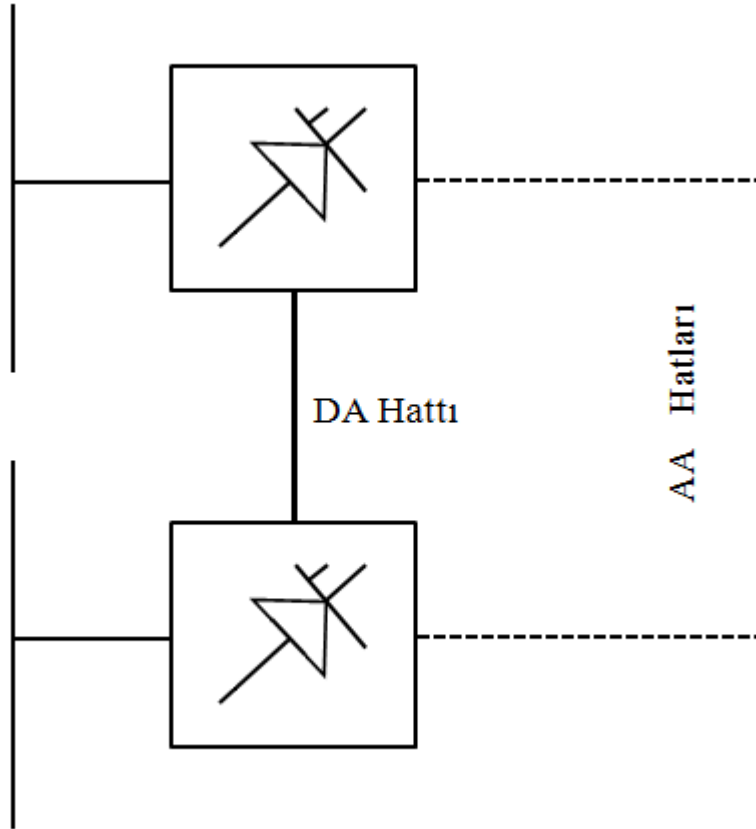
Hatta değişken bir empedansın paralel bağlanmasıyla, sisteme bir akım girişi başlar ve bu da değişken bir akım akışına neden olur. Eğer sisteme verilen akım ile hat gerilimi arasındaki faz farkı  $90^\circ$  olursa, paralel bağı FACTS cihazı hatta reaktif güç verir veya hattan reaktif güç çeker. Diğer faz açısı durumlarında ise paralel bağı FACTS cihazı hatta aktif güç verir veya hattan aktif güç çeker [144]. SVC ve STATCOM gibi FACTS cihazları iletim hattına paralel olarak bağlanırlar [138,145]. Sisteme aktif ve reaktif akım vererek bağlandıkları nokta ve çevresinde iyi bir şekilde gerilimi kontrol etmek için kullanılabilirler.

#### 4.3.2.3. Birleşik yapıli seri-seri bağı FACTS cihazları

Birleşik yapıli seri-seri bağı FACTS cihazları için iki tür düzenleme mevcuttur: Birinci düzenleme birden çok sayıda iletim hattına bağı, birbirleriyle koordine



çalışan seri FACTS cihazlarını içermektedir. Diğer düzenlemede ise her hat için bağımsız reaktif güç kontrolü yanı sıra g bağlantıları yoluyla aktif güç transferi olanağı da sağlanır [144]. Birleşik yapılı seri-seri bağlı FACTS cihazlarına IPFC rnek verilebilir [138,144]. İletim hatları üzerinde aktif ve reaktif güç akışlarının dengelenmesine yardımcı olurlar. Birleşik yapılı seri-seri bağlı FACTS cihazları Şekil 4.4'te görülmektedir.

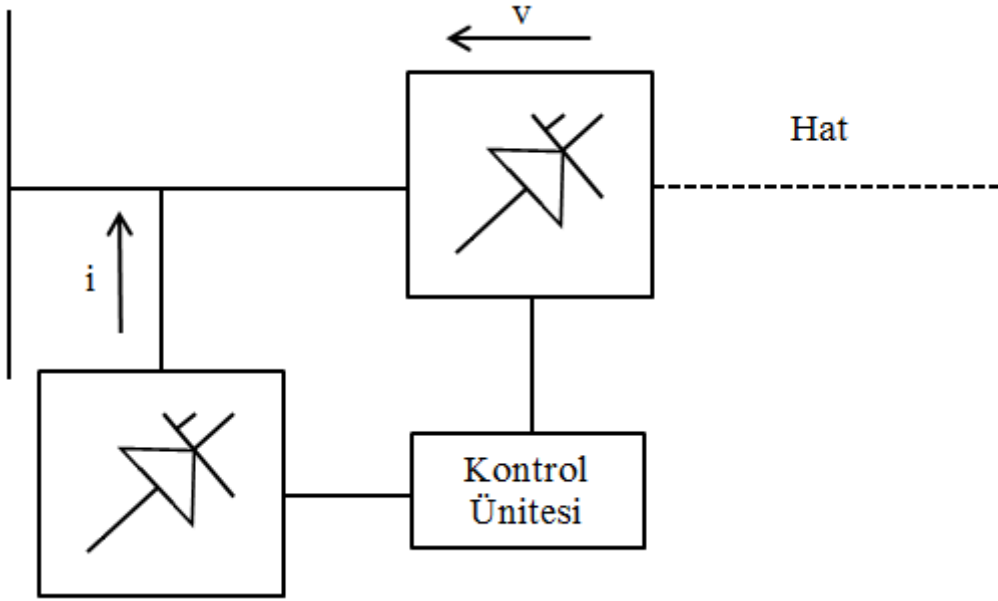


Şekil 4.4. İletim hattına seri-seri bağlı FACTS cihazları [143]

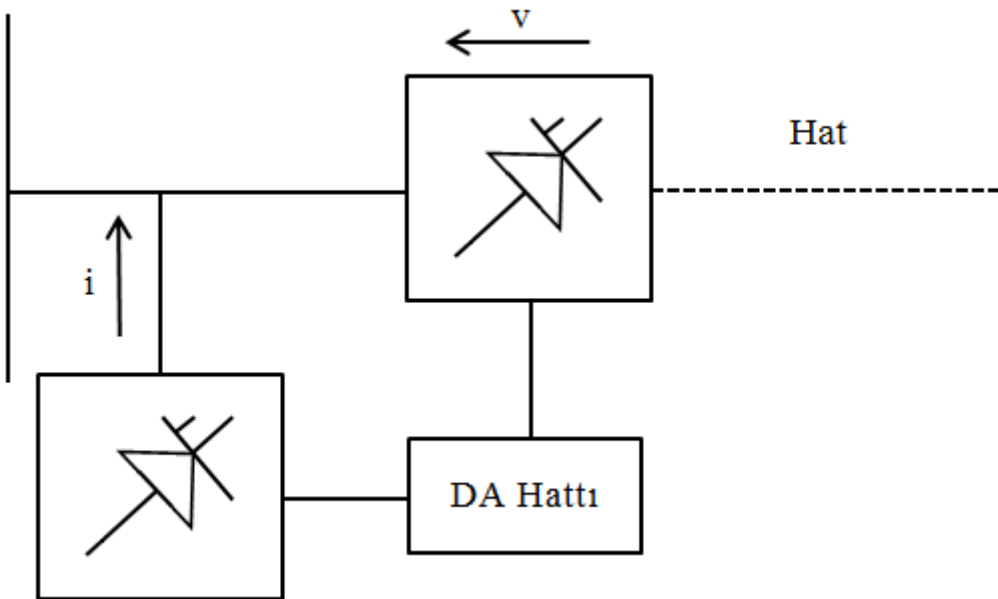
#### 4.3.2.4. Birleşik yapılı seri-paralel bağlı FACTS cihazları

Birleşik yapılı seri-paralel bağlı FACTS cihazları için de iki tür düzenleme mevcuttur: Birinci düzenleme birbirleriyle koordine çalışan ayrı seri ve paralel FACTS cihazlarını içermektedir. İkinici düzenleme ise birbirine bağlı seri ve paralel FACTS cihazlarından oluşmaktadır. Her iki düzenlemede de paralel eleman sisteme akım verirken, seri elemanda hatta gerilim verir. Seri ve paralel bağlı FACTS cihazları birleştirilmişe g bağlantısı yardımıyla aralarında aktif güç transferi

olabilir [144]. Birleşik yapıli seri-paralel bağlı FACTS cihazlarına UPFC örnek verilebilir [138,144]. Seri ve paralel bağlı FACTS cihazlarının sağladığı olumlu yönlerini içermekle birlikte, hat gerilim kontrolü ile etkili ve bağımsız güç/akım akışını kolaylaştırırılar. Şekil 4.5 ve şekil 4.6’da birleşik yapıli seri-paralel bağlı FACTS cihazları gösterilmektedir.



Şekil 4.5. İletim hattına seri-paralel, birbirlerine koordineli bağlı FACTS cihazları [143]



Şekil 4.6. İletim hattına seri-paralel, birbirlerine DA hattı ile bağlı FACTS cihazları [143]

FACTS cihazlarının teknolojik özelliklerine ve güç sistemine bağlanma şekillerine göre sınıflandırılması ile kontrol nitelikleri tablo 4.2’de özetlenmiştir [146-148].

Tablo 4.2. FACTS cihazlarının sınıflandırılması ve kontrol nitelikleri

| FACTS Cihazı   | Bağlantı Şekli                  | Kontrol Nitelikleri  |
|--|---------------------------------|--|
| <b>Tristör Kontrollü FACTS Cihazları</b>                       |                                 |  |
| SVC  | Paralel                         | Gerilim kontrolü, VAr kompanzasyonu, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme  |
| TCSC   | Seri                            | Akım kontrolü, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme, Hata akımı sınırlama  |
| <b>Gerilim Kaynaklı Anahtarlamalı Çevirici FACTS Cihazları</b> |                                 |  |
| STATCOM  | Paralel                         | Gerilim kontrolü, VAr kompanzasyonu, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme  |
| SSSC   | Seri                            | Akım kontrolü, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme, Hata akımı sınırlama  |
| UPFC   | Birleşik Yapılı<br>Seri-Paralel | Aktif ve reaktif güç kontrolü, Gerilim kontrolü, VAr kompanzasyonu, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme, Hata akımı sınırlama |
| IPFC   | Birleşik Yapılı<br>Seri-Seri    | Gerilim kontrolü, Reaktif güç kontrolü, Geçici ve dinamik kararlılık, Gerilim kararlılığı, Salınımları sönümleme   |

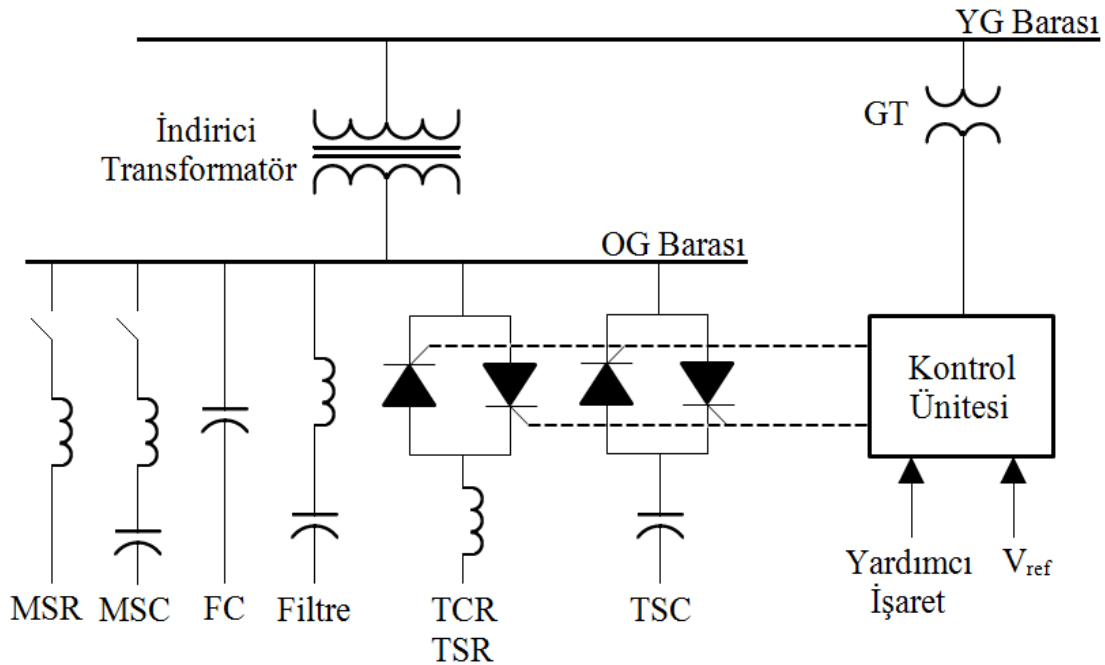
#### 4.4. FACTS Cihazlarının Yapıları ve Çalışma Prensipleri

Elektrik güç sistemleri düzenli olmayan yük akışı ile güvenilir olmaktan çıkmış, yeni iletim hatlarının yapımının sınırlı olmasıyla birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyacın artmasıyla büyük kayıplar altında çalışmaya başlamıştır. Ancak, daha önce bahsedilen ileri derecede bir teknoloji olan FACTS cihazlarının kullanımı ile güç transferleri düzenlenebilir ve taşıma kapasiteleri arttırılabilir hale gelmiştir.

Tezin bu kısmında bazı FACTS cihazlarının yapıları ve çalışma prensipleri hakkında bilgiler verilecektir. Çalışmanın analiz bölümünde FACTS cihazı olarak SVC kullanıldığı için SVC ile ilgili daha ayrıntılı açıklamalar sunulacaktır.

#### 4.4.1. Statik VAr kompanzatör (SVC)

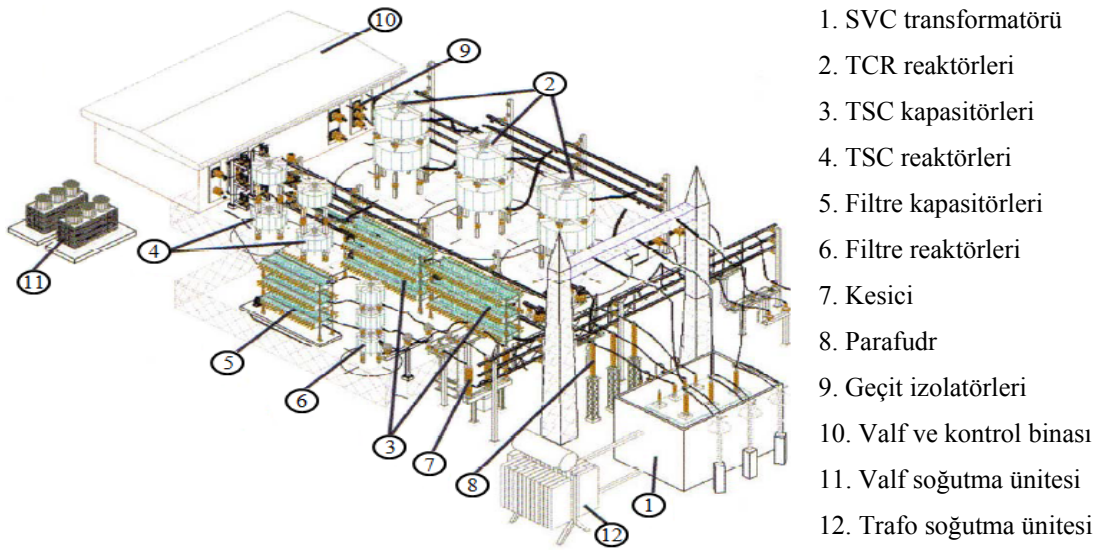
SVC güç sistemine paralel bağlanarak, gerilim gibi güç sistem parametrelerini kontrol etmek için duruma göre reaktif güç üreten veya tüketen FACTS cihazlarından biridir. Devamlı reaktif güç üretebilen veya tüketebilen, cevap verme süresi yüksek olan, sınırsız bir aralıkta çalışabilen, güvenli ve işletme esnekliğine sahip cihazlardır [133]. SVC'ler güç sistemlerinde ağırlıklı olarak gerilim kontrolü ve sistem kararlılığını iyileştirme amaçlı kullanılır. İstenilen gerilim seviyesinin elde edilip devamının sağlanması açısından otomatik gerilim regülatörlerine benzer biçimde çalışırlar. SVC'nin hareketli veya dönen bir parçası olmadığından açılımlında "statik" kelimesi kullanılmaktadır. SVC'ye ait genel bağlantı yapısı şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. SVC genel bağlantı yapısı [151]

SVC'ler genellikle Tristör Kontrollü Reaktör (Thyristor Controlled Reactor – TCR), Tristör Anahtarlmalı Reaktör (Thyristor Switched Reactor – TSR) ve Tristör Anahtarlmalı Kapasitör (Thyristor Switched Capacitor – TSC) gibi reaktif güç kontrol elemanlarından meydana gelir [136,149,150]. Ayrıca, bir SVC sistemi Mekanik Anahtarlmalı Kapasitör (Mechanically Switched Capacitor – MSC), Mekanik Anahtarlmalı Reaktör (Mechanically Switched Reactor – MSR), Sabit Kapasitör (Fixed Capacitor – FC), Sabit Reaktör (Fixed Reactor – FR) ve harmonik filtreler gibi bileşenleri de içerebilir [151].

Bir SVC tasarımına ait yerleşim planı şekil 4.8'de gösterilmiştir. Tasarım SVC transformatörü, TCR reaktörleri, TSC reaktörleri ve kapasitörleri ile filtre gruplarından oluşmaktadır. Ayrıca, iletim hattı elemanları ile kontrol binası ve soğutma üniteleri de yerleşim planında görülmektedir.



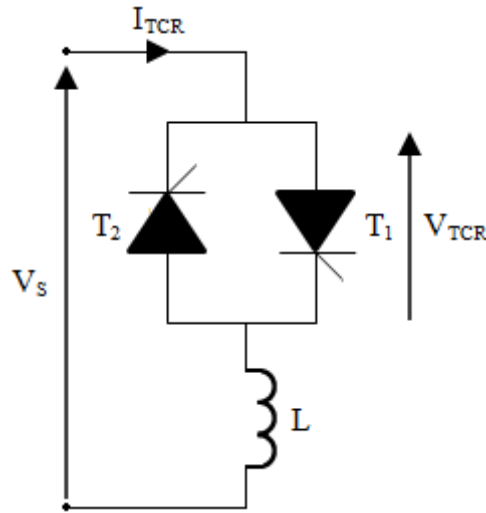
Şekil 4.8. Bir SVC tasarımının yerleşim planı [152]

SVC'lerin halen kullanılan başlıca türleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır [153,154]:

- Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)
- Tristör Anahtarlmalı Kapasitör (TSC)
- Sabit Kapasitör ile Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR)
- Tristör Kontrollü Reaktör ile Tristör Anahtarlmalı Kapasitör (TCR-TSC)

#### 4.4.1.1. Tristör kontrollü reaktör (TCR)

Bir fazlı temel bir TCR, birbirine zıt yönlü paralel  $T_1$  ve  $T_2$  tristörlerinden ve bu tristörlere seri bağlı sabit reaktanslı bir endüktanstan ( $L$ ) oluşur [136,154,155]. TCR'nin temel bileşenleri şekil 4.9'da gösterilmektedir.

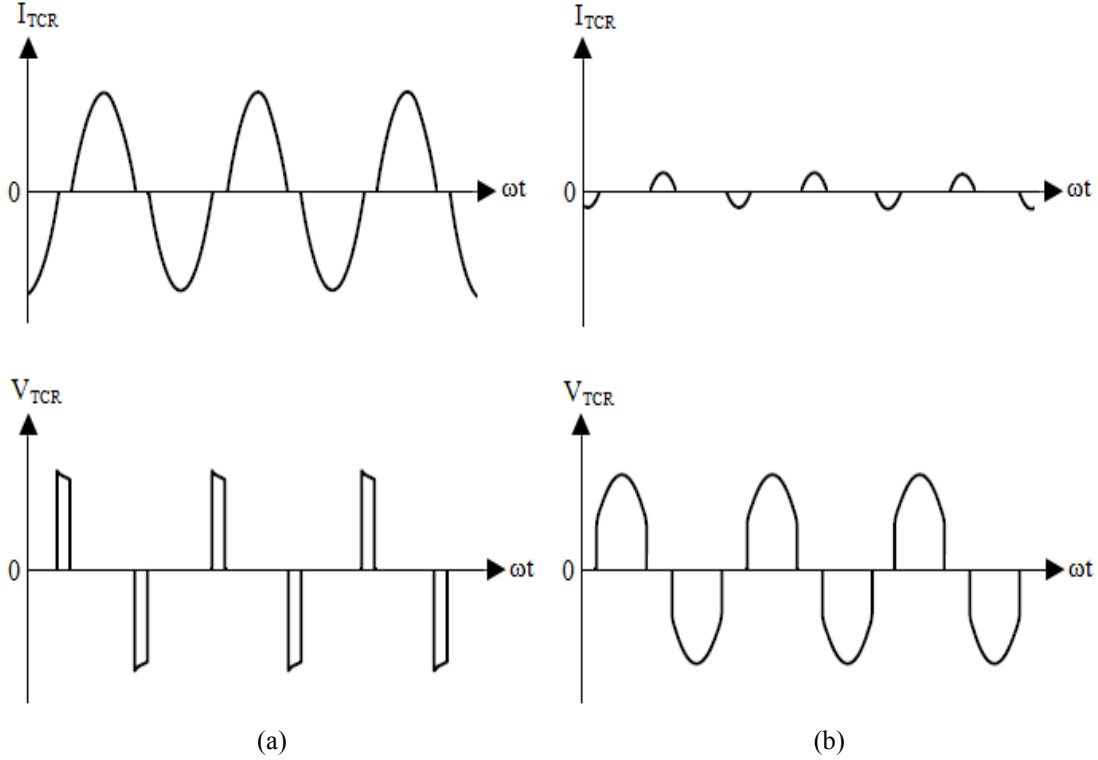


Şekil 4.9. Temel TCR devresi

Birbirine zıt yönlü paralel bağlı bu tristörler;  $T_1$  tristörü kaynak geriliminin pozitif yarı periyodunda iletimde,  $T_2$  tristörü ise kaynak geriliminin negatif yarı periyodunda iletimde olacak şekilde iki yönlü anahtar gibi çalışmaktadır. Tristörlerin tetikleme açıları ( $\alpha$ ) sıfır gerilim geçişleri referans alınarak ölçülür.  $\alpha$   $180^\circ$  iken akım minimum,  $90^\circ$  iken ise akım maksimum değerdedir. TCR tetikleme açısının kontrol edilebilir aralığı  $90^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye uzanarak endüktif reaktans, minimum değerden maksimum değere kadar ayarlanabilir [136]. Yani,  $\alpha$ 'nın kontrolü ile değişken empedans elde edilmektedir. Böylece güç sistemlerinde seri veya paralel olarak reaktif güç kompanzasyonu sağlanarak hat sonu gerilimi ve hat üzerindeki gerilim düşümü kontrol edilir [156].

$90^\circ$ 'lik bir tetikleme açısı, TCR'den sürekli sinüzoidal bir akım akmasını sağlar.  $\alpha$ ,  $90^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye doğru değişirken akım, pozitif ve negatif yarı periyotlarda sürekli olmayan simetrik darbeler biçiminde akar. Bir tristörün iletime geçmesinden sonra tetikleme açısındaki herhangi bir değişim sadece sonraki yarı periyotta uygulanabilir.

Bu da tristör ölü zamanı olarak adlandırılan olaya neden olur [136]. Farklı tetikleme açıları için TCR'nin akım ve gerilim dalga biçimleri şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. TCR'ye ait akım ve gerilim dalga biçimleri [136] a)  $\alpha=105^\circ$  için akım ve gerilim dalga biçimleri b)  $\alpha=150^\circ$  için akım ve gerilim dalga biçimleri

İletimde kalma açısı  $\sigma$  ile gösterilirse, tetikleme açısı cinsinden ifadesi

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (4.1)$$

eşitliği ile gösterilir. Kaynak gerilimi,

$$V_s(t) = V \sin \omega t \quad (4.2)$$

ile ifade edilir. TCR akımı ise aşağıda verilen diferansiyel denklemle gösterilir:

$$L \frac{di}{dt} - V_s(t) = 0 \quad (4.3)$$

(4.3) eşitliğinin integrali alınırsa,

$$i(t) = \frac{1}{L} \int V_s(t) dt + C = -\frac{V}{\omega L} \cos \omega t + C \quad (4.4)$$

eşitliği elde edilir. Burada C sabit değerdir. (4.4) eşitliğinde sınır şartları,  $i(\omega t = \alpha) = 0$ , kullanıldığında,

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $\alpha$ , uygulanan gerilimin pozitiften sıfır geçişine göre ölçülen tetikleme açısıdır. TCR akımının temel bileşeni  $I_1(\alpha)$ , Fourier analizi kullanılarak,

$$I_1(\alpha) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (4.6)$$

elde edilir. Burada tek dalga simetrisinden dolayı  $b_1 = 0$ 'dır.  $a_1$  ise,

$$a_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cos \frac{2\pi x}{T} dx \quad (4.7)$$

ile verilir. Denklem (4.7) çözüldüğünde,

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (4.8)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (4.8) tekrar aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_1(\alpha) = V B_{\text{TCR}}(\alpha) \quad (4.9)$$

Burada,



$$B_{\text{TCR}}(\alpha) = B_{\text{max}} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \left. \begin{array}{l} \\ B_{\text{max}} = \frac{1}{\omega L} \end{array} \right\} \quad (4.10)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. (4.1) eşitliğinde  $\pi$  yalnız bırakılıp (4.8) denkleminde yerine yazılırsa TCR akımının temel bileşeninin bir diğer ifadesi,

$$I_1(\sigma) = VB_{\text{max}} \left( \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (4.11)$$

eşitliğiyle veya

$$I_1(\sigma) = VB_{\text{TCR}}(\sigma) \quad (4.12)$$

eşitliğiyle verilir. Burada,

$$B_{\text{TCR}}(\sigma) = B_{\text{max}} \left( \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (4.13)$$

denklemleriyle ifade edilir.  $\alpha$ 'nın bir fonksiyonu olarak  $n$ . mertebe harmoniğin rms değeri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

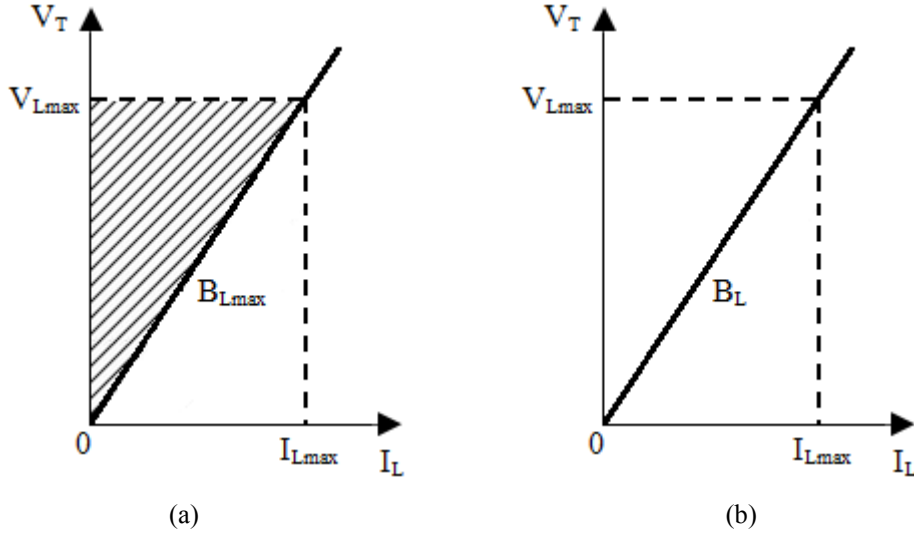
$$I_n(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \frac{2}{\pi} \left[ -2 \frac{\cos \alpha}{n} \sin n\alpha + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right] \quad (4.14)$$

$$= \frac{V}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left[ \frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right]$$

Burada,  $n = 2k + 1$  ve  $k = 1, 2, 3, \dots$ 'dir [136].

Uygulamada, uygulanan gerilimin en yüksek değeri ve karşılanan akım değeri kullanılan güç bileşenlerinin değerleri ile sınırlıdır. TCR, şekil 4.11a'da gösterilen tanımlı olan V-I alanının herhangi bölgesinde çalıştırılabilir. Alanın sınırlarını maksimum ulaşılabilir admitans, gerilim ve akım değerleri belirler.

Eğer TCR, bir sabit tetikleme açısında, genellikle  $\alpha = 0$ 'da, çalıştırılırsa sabit bir endüktif admitans sağlayan bir TSR olarak işlev görür. Şekil 4.11b'de görüldüğü gibi TSR için, reaktif akım uygulanan gerilimle orantılı olarak değişir.

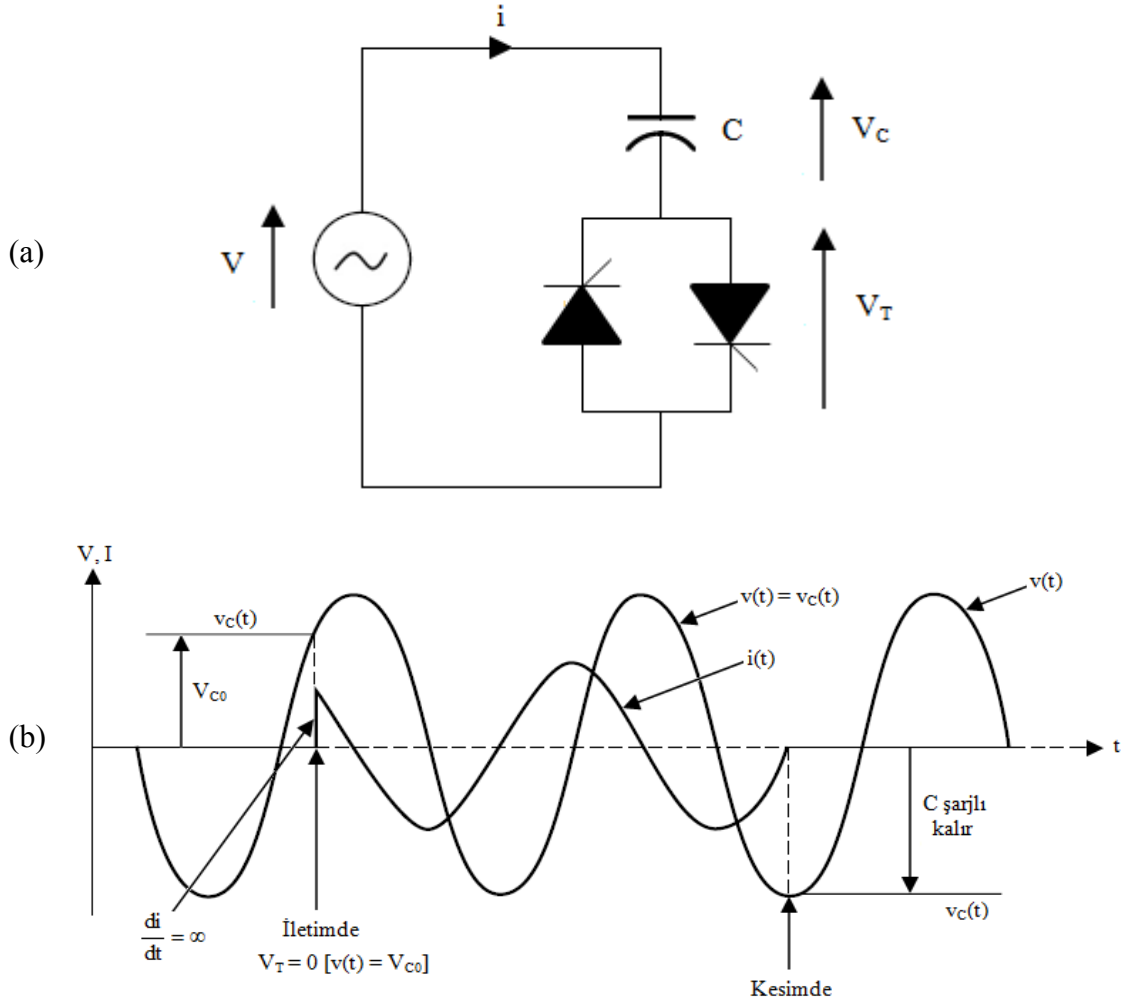


Şekil 4.11. V-I çalışma bölgesi karakteristiği [133] a) TCR b) TSR

Üç fazlı sistemlerde TCR'ler üçgen bağlanarak güç sistemine bağlanır. Üçgen bağlantı ile yüksek harmonik bileşenlerin güç sistemine akması önlenir. Tetikleme açısı arttıkça akımdaki harmonik bozulmalar artmaktadır. Üçgen bağlantı ile maksimum toplam harmonik bozulma katsayısı %10'nun altına iner [131].

#### 4.4.1.2. Tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC)

Bir fazlı temel bir TSC, birbirine zıt yönlü paralel bağlı tristörlerden ve bu tristörlere seri bağlı bir kapasitörden oluşan, reaktif güç sağlayan bir paralel kompanzatördür [136,154]. TSC'ler reaktif güç kompanzasyonunda uygun sonuçlar elde etmek için kullanılan kayıpları az, esnek ve harmonik üretmeyen ucuz cihazlardır [154,157-159]. Şekil 4.12'de basit bir TSC modeli ile akım ve gerilim dalga biçimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.12. TSC'ye ait [136] a) Basit bir güç sistem modeli b) Akım ve gerilim dalga biçimleri

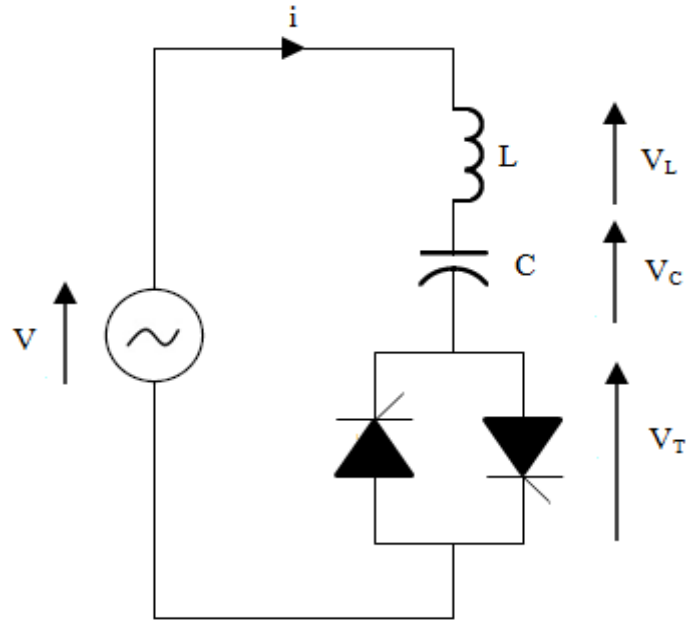
Tristörlerin ilettime sokulmasından önce kapasitör geriliminin değeri çok önemlidir. Kapasitör gerilimine ve ilettime girme anına göre iki durum ortaya çıkar [136]:

a. Tristörler ilettime geçtiğinde, eğer kapasitör gerilimi kaynak gerilimine eşit değilse, tristör üzerinden aniden büyük bir akım akmaya başlar ve kısa bir zamanda kapasitör kaynak gerilimiyle şarj olur. Tristörler tarafından oluşturulan anahtar, üzerinden geçen akımın yarattığı strese karşı dayanamayıp, arızalanır.

b. Tristörler ilettime geçtiğinde, eğer kapasitör gerilimi kaynak gerilimine eşitse, tristör üzerinden akacak akım, şekil 4.12b' de gösterildiği gibi, aniden kararlı hal akımının değerine ulaşır. Bu durum son derece kısa bir zamanda olur. Akımın büyüklüğü, kararlı hal değerini aşmamasına rağmen,  $di/dt$  değeri tristörün

dayanabileceği  $di / dt$  değerinin üstündedir. Burada  $di / dt$  sonsuzdur ve tristörler tarafından oluşturulan anahtar yine arızalanacaktır.

Bu nedenle, şekil 4.12a'da gösterilen TSC'ye ait güç sistem modelinin uygun olmadığı sonucuna varılır. Yukarıda belirtilen problemleri ortadan kaldırmak için, şekil 4.13'de gösterildiği gibi, küçük bir sönümleme reaktörü kapasitöre seri olarak eklenir [136,160].



Şekil 4.13. Seri reaktörlü TSC devresi

Kaynak gerilimi,

$$v(t) = V \sin \omega_0 t \quad (4.15)$$

ile ifade edilsin. Burada  $\omega_0$  sistem nominal frekansdır.  $t = 0$ 'da tristör ilettime sokulduktan sonra, devreden geçecek akımın ifadesi,

$$i(t) = I_{AC} \cos(\omega_0 t + \alpha) - nB_C \left( V_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} V \sin \alpha \right) \cdot \sin \omega_n t - I_{AC} \cos \alpha \cos \omega_n t \quad (4.16)$$

şeklinde olur. Burada  $V_{C0}$ ,  $t = 0$ 'da kapasitör başlangıç gerilimidir.  $\omega_n$  ise doğal frekanstır ve

$$\omega_n = n\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.17)$$

ile ifade edilir. Birim değer olarak ise doğal frekansın ifadesi,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{|X_C|}{|X_L|}} \quad (4.18)$$

şeklinde olur.  $I_{AC}$  akımı da,

$$I_{AC} = V \frac{B_C B_L}{B_C + B_L} = VB_C \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (4.19)$$

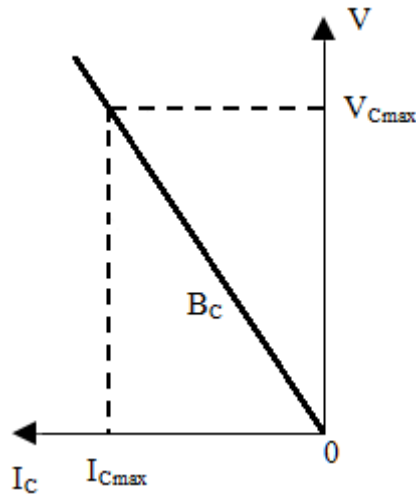
ile ifade edilir [136]. LC devreleri, kaynak frekansının üç katı ve daha yüksek frekanslarda rezonansa girecek şekilde ayarlanır.  $3\omega_0$  altındaki değerlerde, güçlendirme faktörü yaklaşık olarak 1.0'dır. Bu yüzden, pratik uygulamalar için bu değerlerin altında rezonans devresi kurulmaz. Geçici salınımların olmaması için, (4.20) ve (4.21) denklemlerinin aynı anda yerine getirilmesi gerekir [136].

$$\cos \alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = \pm 1 \quad (4.20)$$

$$V_{C0} = \pm V \frac{n^2}{n^2 - 1} = I_{AC} X_C \quad (4.21)$$

Birinci koşul, (4.20) eşitliği, tristörlerin kaynak geriliminin sinüs dalgalarının pozitif ya da negatif tepelerinde iletme sokulması gerektiğini ifade eder. İkinci koşul, (4.21) eşitliği, kapasitörün önceden belirlenmiş bir değere şarj olması gerektiğini gösterir.

Şekil 4.14'te TSC'nin gerilim-akım karakteristiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi TSC akımı uygulanan gerilimle doğrusal olarak değişmektedir.

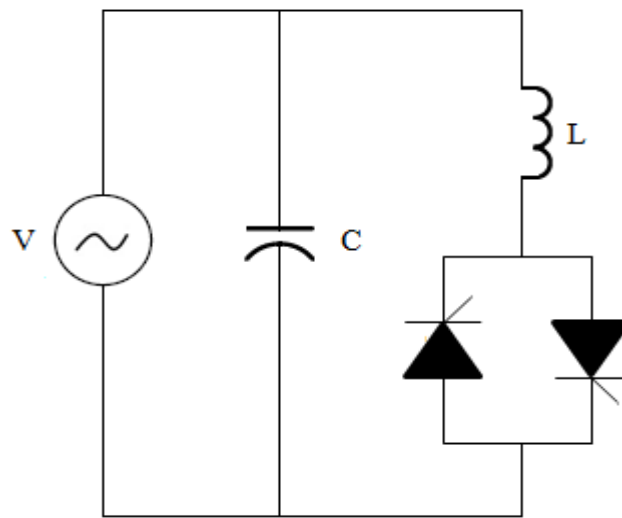


Şekil 4.14. TSC'ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği [133]

Üç fazlı bir TSC ünitesi, genellikle bir indirici transformatörün üçgen bağlı sekonder sargısından beslenen üç adet tek fazlı TSC'nin üçgen bağlanmasından oluşur. Bir diğer üç fazlı bağlantı ise, dört telli yıldız bağlı TSC'lerden oluşur [136].

#### 4.4.1.3. Sabit kapasitör ile tristör kontrollü reaktör (FC-TCR)

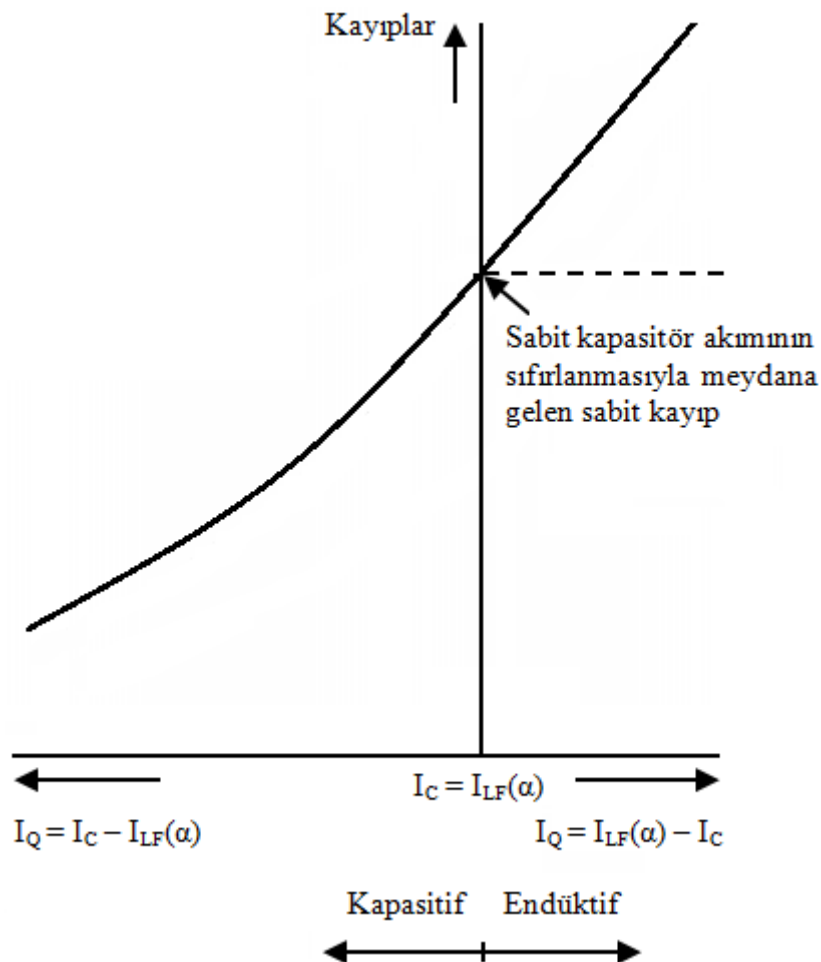
Şekil 4.15'te sabit kapasitör ile tristör kontrollü reaktöre ait basit bir model gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Temel FC-TCR devresi

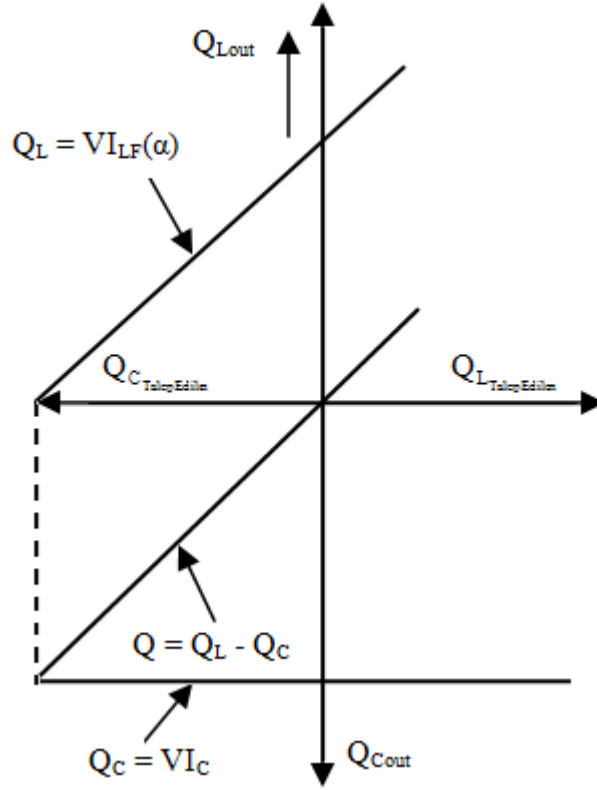
FC-TCR yapısı, birbirine zıt yönlü paralel bağlı tristörler ile seri endüktans ve bunlara paralel kapasitörden oluşur [136,161,162]. Çoğu durumda, düşük harmonikler için bir filtre de FC-TCR yapısında bulunur [163]. Endüktans akımı tristörlerin tetikleme açılarıyla kontrol edilir ve böylece reaktif güç ayarlanabilir. Sabit kapasitör ise istenilen reaktif gücü üretmek için temel frekansta gerekli olan kapasitif empedansı sağlarken, seçilen frekanslarda düşük empedans gösterip TCR'nin ürettiği harmonikleri sönmümler.

FC-TCR'nin olumsuz bir yönü, büyük indüktör akımı nedeniyle endüktif bölgede büyük güç kayıplarının olmasıdır. Ayrıca, sabit kapasitörlerin de arıza gibi büyük sistem bozulmaları altında güç sistem davranışı üzerine olumsuz etkileri olduğu bulunmuştur [161]. Şekil 4.16'da FC-TCR'nin reaktif güç çıkışına karşı kayıpları karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 4.16. FC-TCR'nin VAR çıkışı ile kayıp karakteristiği [164]

Şekil 4.17'te FC-TCR'nin reaktif güç çıkışı ile reaktif güç talebi karakteristiği gösterilmektedir.



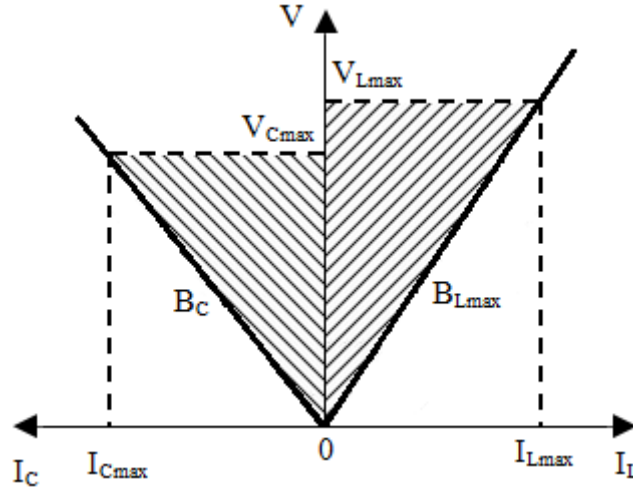
Şekil 4.17. FC-TCR'nin VAR çıkışı ile VAR talebi karakteristiği [165]

Sabit kapasitörün sağladığı sabit kapasitif reaktif güç üretimi ( $Q_C$ ), TCR'nin sağladığı değişken endüktif reaktif güç üretimine ( $Q_L$ ) zıttır. Maksimum kapasitif reaktif güç çıkışı TCR devrede değilken olur ( $\alpha = 90^\circ$ ). Kapasitif çıkışı azaltmak için reaktör akımı,  $\alpha$ 'nın azaltılmasıyla artırılır. Reaktif güç çıkışının sıfır olduğu durumda kapasitif ve endüktif akımlar birbirine eşittir ve tamamen kapasitif ve endüktif çıkışlar birbirini yok eder. Tetikleme açısının daha da azaltılmasıyla endüktif akım kapasitif akımdan daha büyük olur ki bu da endüktif reaktif güç çıkışıyla sonuçlanır. Tetikleme açısının sıfır olması durumunda en yüksek endüktif çıkış elde edilir ve sisteme verilen reaktif güç, kondansatörün kapasitif gücü ile tam iletimdeki reaktörün endüktif gücü arasındaki farktır [165].

Kapasitör, reaktör ve tristör gibi ana güç elemanlarının gerilim ve akım değerlerinin belirlediği, ulaşılabilecek maksimum kapasitif ve endüktif admitans değerlerine göre



FC-TCR'ye ait gerilim-akım çalışma bölgesi karakteristiği şekil 4.18'de gösterilmektedir.



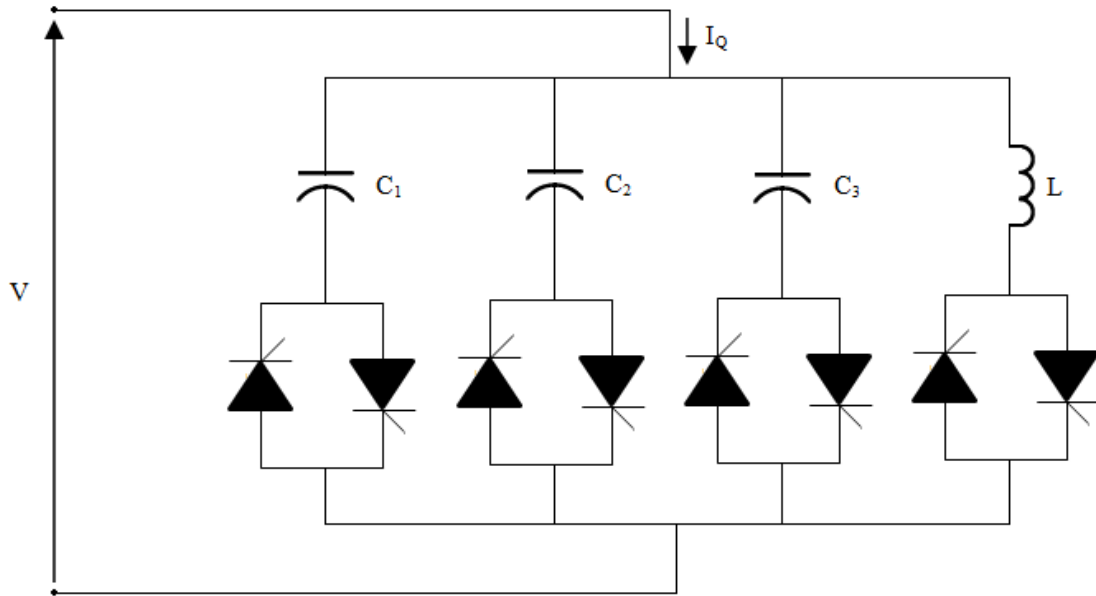
Şekil 4.18. FC-TCR'ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği [133]

#### 4.4.1.4. Tristör kontrollü reaktör ile tristör anahtarlama kapasitör (TCR-TSC)

TCR-TSC tip SVC, bekleme anındaki kayıpları azaltarak ve artan esnek çalışma sağlayarak güç iletim sistemlerinin dinamik kompanzasyonu için geliştirilmiştir.

Şekil 4.19'da gösterildiği gibi TCR-TSC, tristör kontrollü reaktör ile n adet paralel bağlı tristör anahtarlama kapasitörden oluşur. n sayısı çalışma gerilim seviyesi, maksimum reaktif güç çıkışı, tristörlerin akım derecesi, bara işçiliği ve kurulum maliyetleri gibi pratik değerlendirmelerle saptanır [164]. TCR'nin değeri, SVC'nin toplam reaktif gücünün  $1/n$  değerinde olacak şekilde seçilir. Her adım aralığında reaktif gücün sürekli kontrolü TCR tarafından sağlandığı için, kapasitörler ayrı adımlarla anahtarlanabilir. TCR'nin boyutu küçük olduğundan, harmonik üretimi de büyük ölçüde azdır [136].

TCR-TSC'ler; sürekli kontrol edilebilme, TSC kontrolüyle harmonikleri yok etme, düşük kayıplara sahip olma, yedekleme, esnek kontrol ve işletme koşulları gibi özellikleri olan cihazlardır [154,166,167].

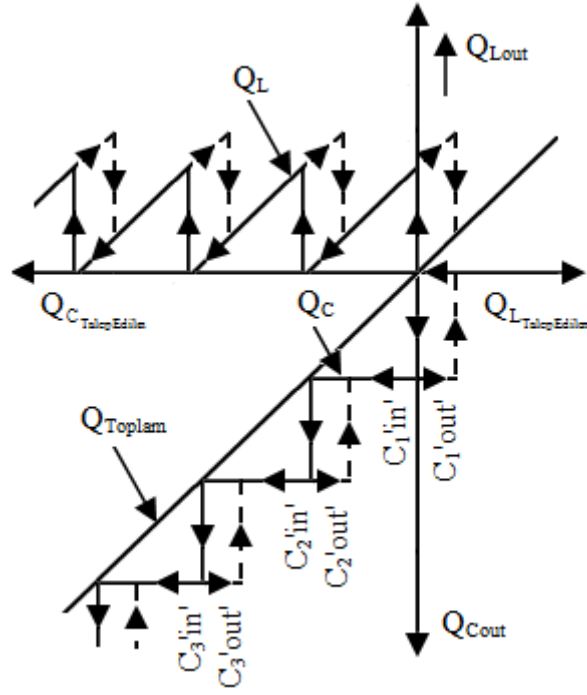


Şekil 4.19. Temel TCR-TSC devresi

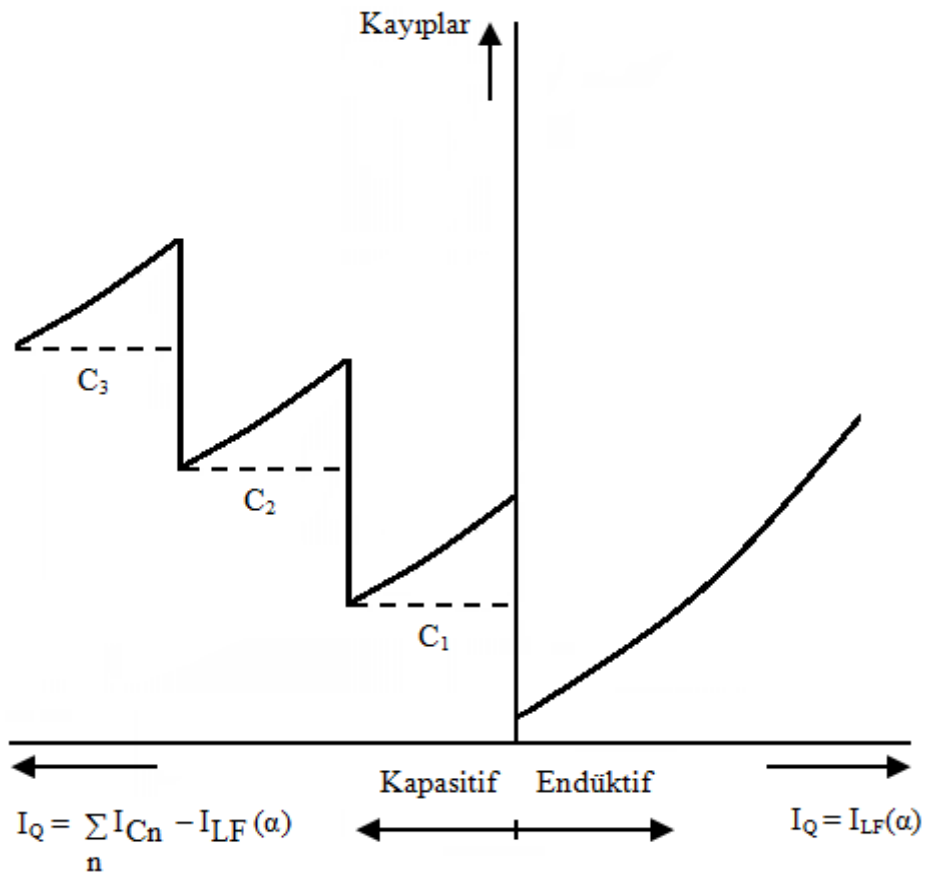
Toplam kapasitif çıkış  $n$  adet aralığa bölünmüştür.  $Q_{Cmax}$  tüm TSC'lerin sağladığı toplam güç olmak üzere, ilk aralıkta çıkış sıfır ile  $Q_{Cmax} / n$  arasında değiştirilebilir. Bu aralıkta bir adet kapasitör devrede olup TSC negatif bir reaktif güç sağlarken, uygun tetikleme açısı ile kontrol edilen TCR pozitif reaktif güç sağlar. Her ikisinin toplamı istenilen kapasitif çıkışa eşittir. İkinci, üçüncü, ... ve  $n$ . aralıklarda da çıkış;  $Q_{Cmax} / n$ 'den  $2Q_{Cmax} / n$ 'e kadar,  $2Q_{Cmax} / n$ 'den  $3Q_{Cmax} / n$ 'e kadar, ... ve  $(n-1)$   $Q_{Cmax} / n$ 'den  $Q_{Cmax}$ 'a kadar ikinci, üçüncü, ... ve  $n$ . kapasitörleri devreye sokarak ve artık kapasitif reaktif gücü sönmleyen TCR devreye alınarak kontrol edilebilir [164,168].

TCR-TSC'nin reaktif güç çıkışı ile reaktif güç talebi karakteristiği şekil 4.20'de görülmektedir.  $Q_{Cout}$  kapasitif reaktif güç çıkışı adimsal olarak değişir ve talebi karşılayacak şekilde devreye alınır.  $Q_{Lout}$  endüktif reaktif güç çıkışı ise aşırı reaktif gücü sönmlemek için kontrollü olarak ayarlanır. Toplam reaktif güç çıkışı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Q_{Toplam} = V(\sum I_{Cn} - I_{LF}(\alpha)) \quad (4.22)$$



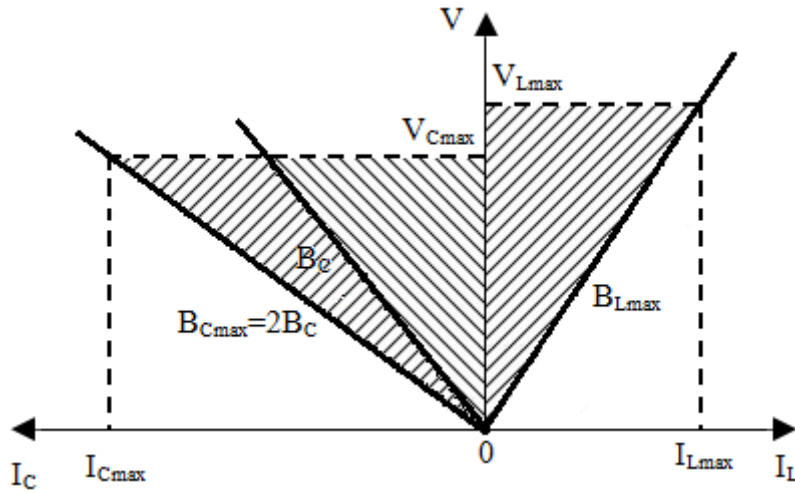
Şekil 4.20. TCR-TSC'nin VAR çıkışı ile VAR talebi karakteristiği [164]



Şekil 4.21. TCR-TSC'nin VAR çıkışı ile kayıp karakteristiği [164]

Şekil 4.19’da verilen TCR-TSC’nin temel çalışma devresinden şekil 4.21’de gösterilen TCR-TSC’nin reaktif güç çıkışı ile kayıp karakteristiği ortaya çıkar. Devreye alınan TSC’lerin sayısı ile kapasitif çıkış artarken, fazla kapasitif güçler TCR tarafından yok edilir. Kayıplar, her bir TSC’nin anahtarlanmasıyla sabit bir miktar artar. Bu sabit kayıpta TSC’lerin ardışık anahtarlanmasıyla maksimumdan sıfıra değişen TCR’nin eklenen kayıpları vardır. Genel olarak, TCR-TSC’nin ortalama kayıpları reaktif güç çıkışı ile orantılı olarak değişir.

Şekil 4.22’de TCR-TSC’ye ait gerilim-akım çalışma bölgesi karakteristiği verilmiştir. Bu karakteristik ile FC-TCR’ye ait gerilim-akım çalışma bölgesi karakteristiğinin benzer olduğu görülmektedir. Yalnız TCR-TSC’ye ait karakteristikte kapasitif akım sınırı daha yüksektir.



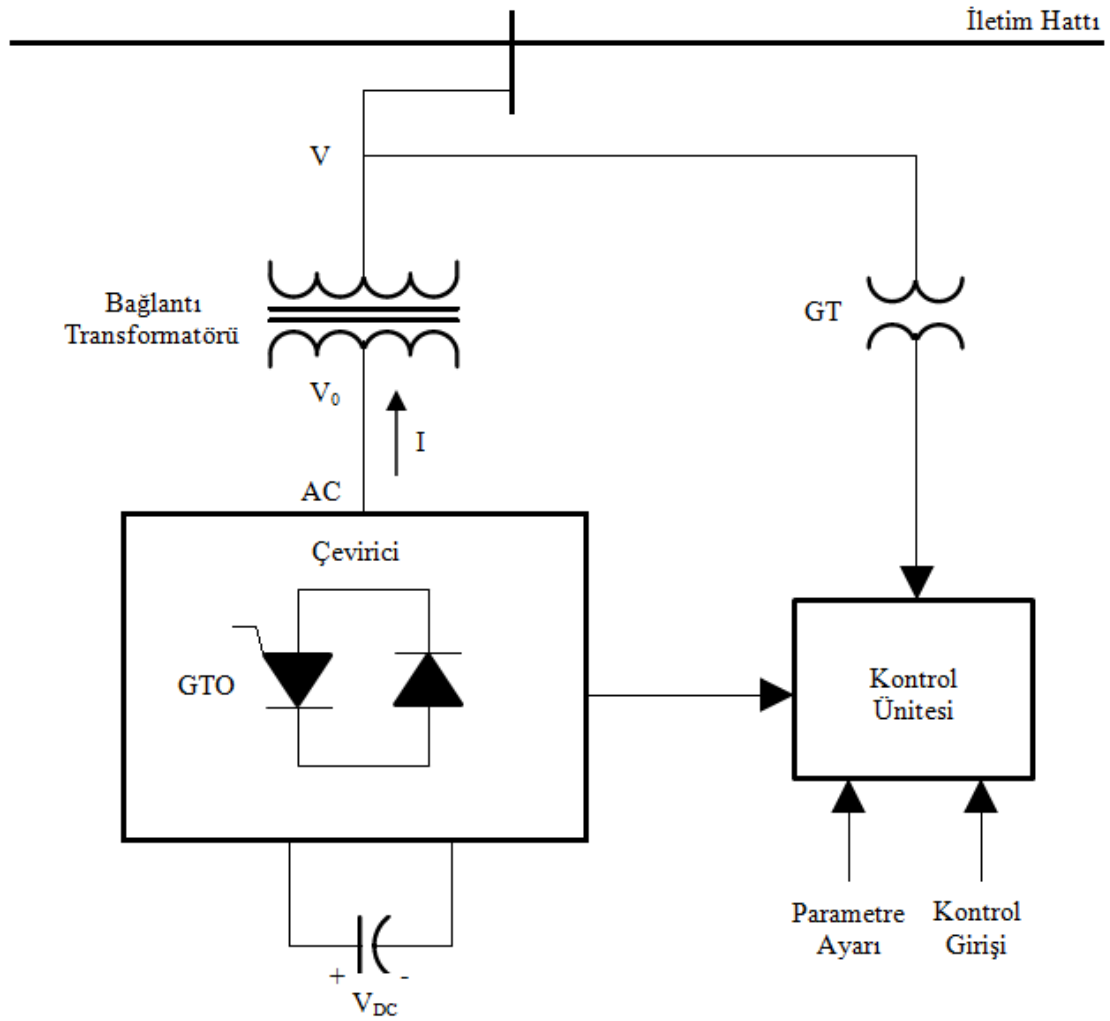
Şekil 4.22. İki TSC’li TCR-TSC’ye ait V-I çalışma bölgesi karakteristiği [133]

#### 4.4.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)

STATCOM iletim hattına paralel olarak bağlanan, ikinci grup, güç elektroniği tabanlı ve Gerilim Kaynaklı Çevirici (Voltage Source Converter – VSC) temeline dayanan bir FACTS cihazıdır. STATCOM başlangıçta Gelişmiş SVC (Advanced Static VAR Compensator – ASVC) olarak adlandırılmış, daha sonra ise Statik Kondenser (Static Condenser – STATCON) olarak literatüre geçmiştir [160].

STATCOM, paralel tepkin güç kompanzatoru olarak çalışması ve performans karakteristiğinin ideal senkron makine ile benzerlik göstermesi nedeniyle statik senkron kompanzator olarak adlandırılır. Temel frekansta üç fazlı sinüzoidal gerilimi, genlik ve faz açısının kontrolüyle ayarlanabilir. Kapasitif ve endüktif olarak reaktif güç üretebilirler. Ayrıca güç sistemlerinde kararlılık, gerilim regülasyonu, aktif ve reaktif güç kontrolü, güç salınımlarının sönümlenmesi ve güç faktörünün düzeltilmesi içinde kullanılmaktadırlar [136].

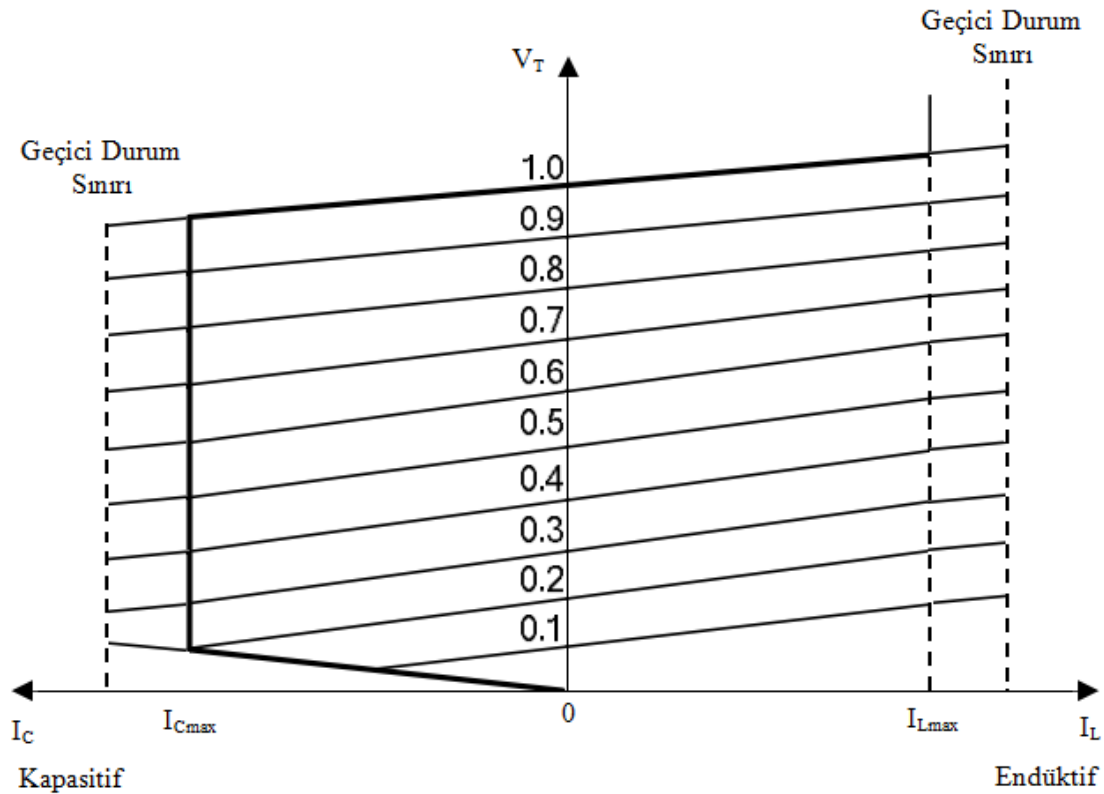
Şekil 4.23'te STATCOM devre yapısı gösterilmektedir. STATCOM genel olarak gerilim kaynaklı çevirici, bağlantı transformatörü ve bir DC kapasitörden oluşmaktadır.



Şekil 4.23. STATCOM genel bağlantı yapısı [141]

Kapasitör çevirici için gerekli olan DC gerilimi karşılar. Kapasitör çevirici çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak şarj veya deşarj olur. Sürekli durumda çevirici çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak transformatör ve çevirici kayıpları, sistemden çekilen aktif güç ile karşılanır [141,169]. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü ( $V_0$ ), AC sistem gerilimini ( $V$ ) geçerse,  $I$  akımı transformatör reaktansı yolu ile STATCOM'dan AC sisteme akar ve cihaz iletim hattı için reaktif güç üretir. Bu durumda STATCOM kapasitif biçimde çalışır. Tersisi olursa akım transformatör reaktansı yolu ile AC sistemden STATCOM'a akar ve cihaz iletim hattından reaktif güç tüketir. Bu durumda ise STATCOM endüktif biçimde çalışır [141].

STATCOM'un gerilim-akım karakteristiği şekil 4.24'te verilmiştir. Bu karakteristik bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve çeviricinin çıkış gerilimine bağlıdır.



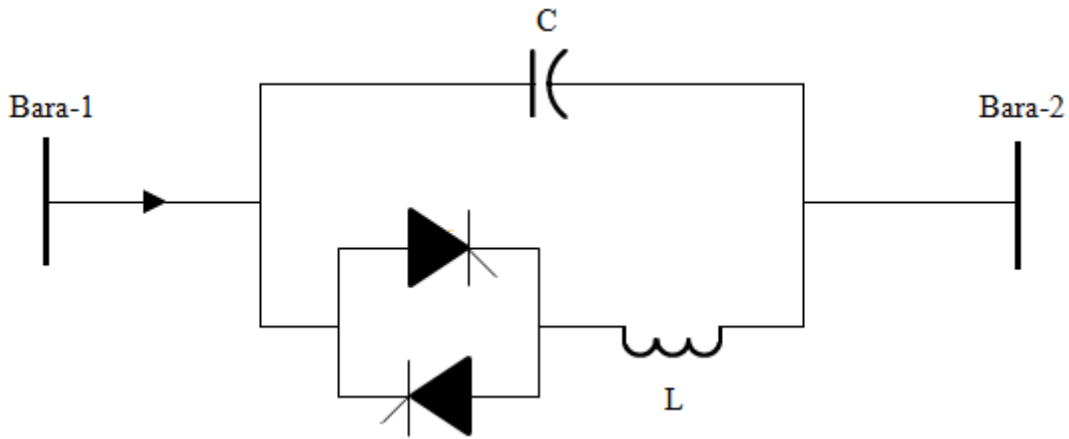
Şekil 4.24. STATCOM V-I karakteristiği [170]

Şekil 4.24'ten STATCOM'un tipik olarak yaklaşık 0.2 pu, hatta çok daha düşük sistem gerilimi düzeylerinde, tam çıkış akımı aralığı üzerinde, çalışabildiği

görülmektedir. Yani STATCOM herhangi bir sistem gerilimi değerinde maksimum kapasitif veya maksimum endüktif çıkış akımını AC sistem geriliminden bağımsız olarak sağlayabilir. Ayrıca STATCOM'un maksimum reaktif güç üretimi veya tüketimi AC sistem gerilimi ile doğrusal olarak değişir [141].

#### 4.4.3. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)

TCSC iletim hattına seri bağlanan, tristör kontrollü reaktör ve buna paralel bağlı seri kapasitörden oluşan bir FACTS cihazıdır. Ayrıca, aşırı gerilimlerden hattı korumak için C kapasitörüne paralel bir metal-oksit varistör yerleştirilir [171]. Şekil 4.25'te TCSC'ye ait genel bağlantı yapısı verilmiştir.



Şekil 4.25. TCSC genel bağlantı yapısı [172]

Şekilden de görüldüğü gibi TCSC, yapı olarak FC-TCR tipi SVC yapısı ile aynıdır. Fakat iletim hatlarına seri ve transformatör kullanılmadan doğrudan bağlanırlar. TCSC'nin asıl amacı, seri kapasitöre bağlı olarak hattın empedansını kontrol etmektir. Hızlı ve esnek düzenleme yeteneğinden dolayı güç sisteminin dinamik performansını artırır. Bununla birlikte, geçici kararlılık analizinin iyi olması da bir diğer önemli özelliğidir.

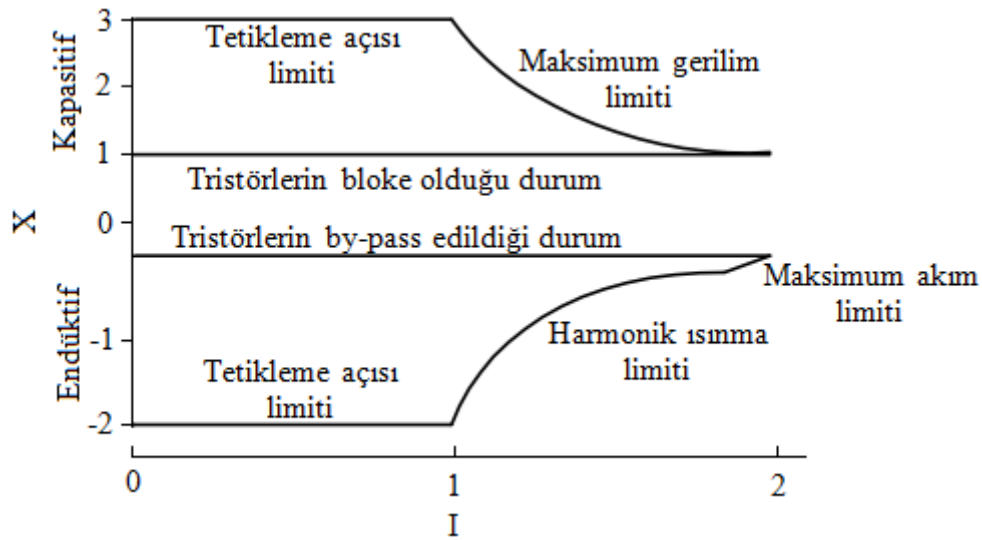
TCSC'ler, tristörlerin tetikleme açısına bağlı olarak tristörlerin by-pass edildiği mod, tristörlerin bloke olduğu mod ve verniyer modu olmak üzere üç çalışma moduna sahiptir [173-176]:

a) Tristörlerin by-pass edildiği modda, tristörler sürekli olarak iletimdedir. TCSC indüktör ve kapasitörün paralel eşdeğerinden oluşur. Bu modda hat akımının büyük bir bölümü TCR üzerinden akar ve TCSC küçük bir net endüktif empedansa sahiptir.

b) Tristörlerin bloke olduğu modda, TCSC bir seri kapasitör olarak çalışmaktadır. Bu modda TCSC empedansı sadece kapasitör reaktansıdır.

c) Verniyer modu, yukarıda verilen iki mod arasındadır. TCSC kapasitif veya endüktif olarak çalıştırılabilir. Bu modda tristörlerin tetikleme açısının sürekli değişimi ile TCSC'nin dinamik çalışması sağlanır.

Şekil 4.26'da TCSC'ye ait reaktans-akım karakteristiği görülmektedir. Genel olarak TCSC, kararlılık ve sönümlenme kontrolü için kapasitif bölgede çalıştırılır.



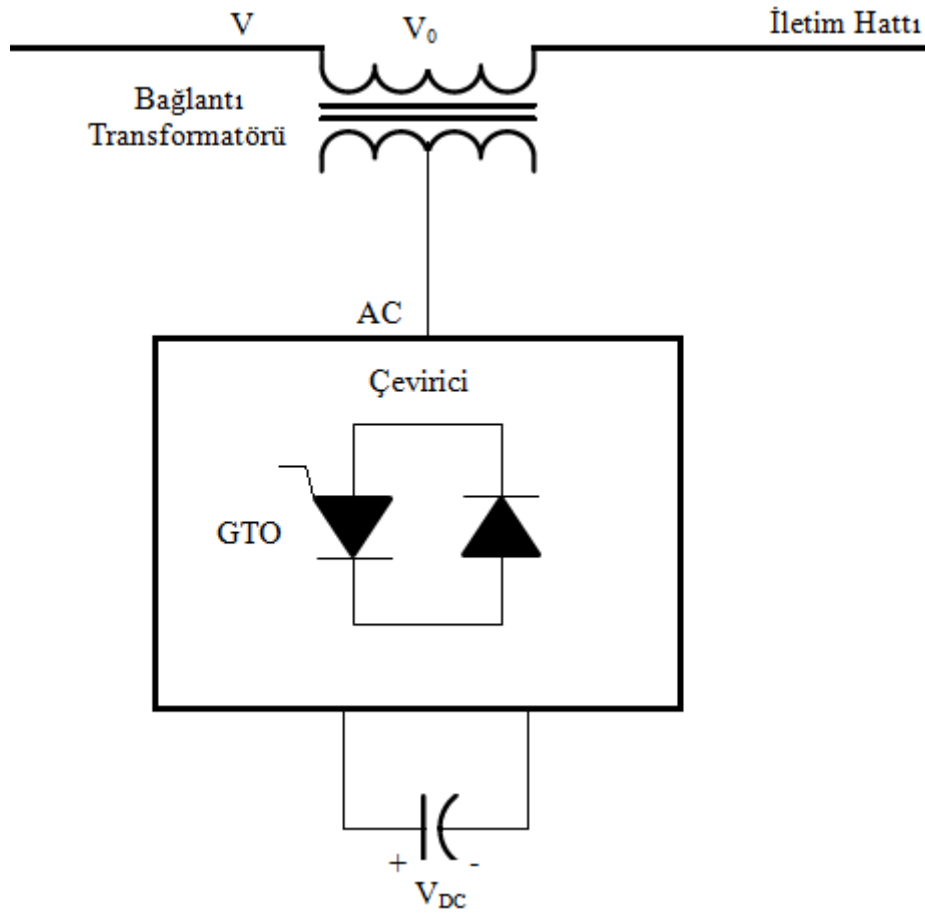
Şekil 4.26. TCSC X-I karakteristiği [171]

TCSC'nin ana sakıncalarından biri seri kapasitör eklenmesinden dolayı hat empedansı ile arasında rezonans durumunun oluşmasıdır. Bu durum mekanik arızaların ortaya çıkmasına ve generatör senkronizasyonunun bozulmasına neden olmaktadır. Bu gibi sorunların ortadan kaldırılması için alt senkronizasyon rezonans söndürücüleri kullanılmaktadır. Ayrıca, TCSC'ler harmonik oluşmasına neden olurlar.



#### 4.4.4. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)

SSSC, STATCOM devre yapısına benzemekle birlikte iletim hattına seri olarak bağlanır. STATCOM'da olduğu gibi genel olarak gerilim kaynaklı çevirici, bağlantı transformatörü ve bir DC kapasitörden oluşmaktadır. Şekil 4.27'de SSSC'ye ait genel bağlantı yapısı görülmektedir.

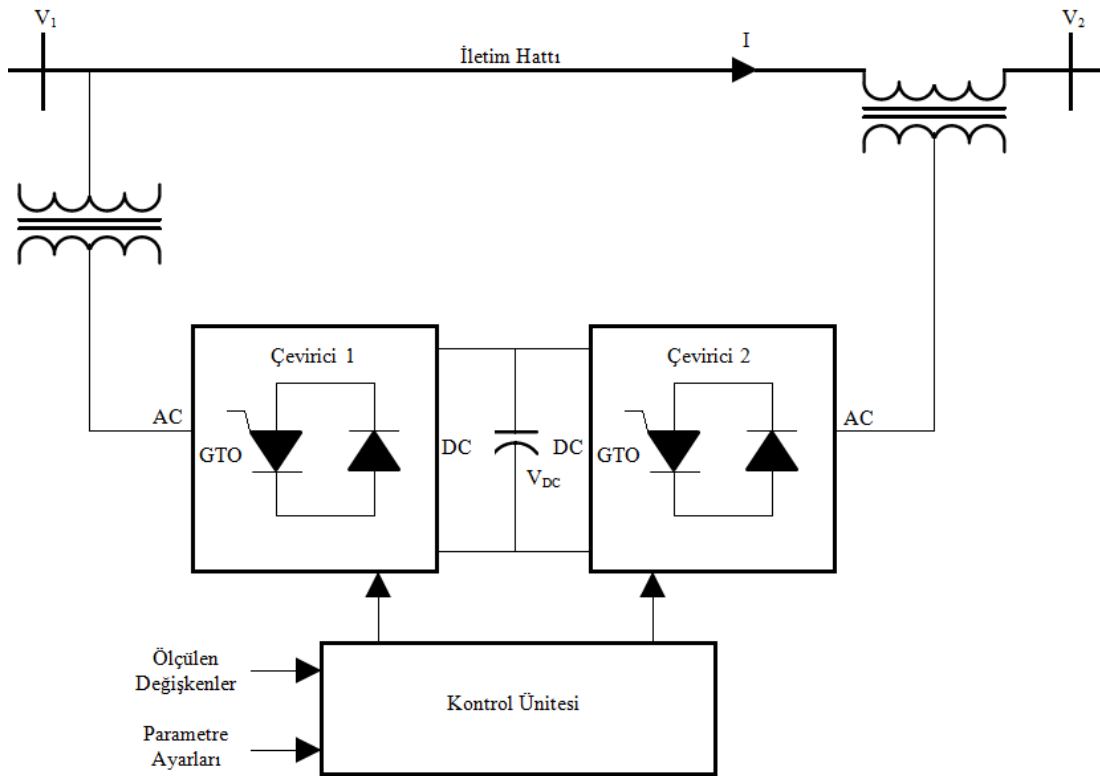


Şekil 4.27. SSSC genel bağlantı yapısı [177]

SSSC, sistemin kapasitif ve endüktif durumlarına göre, seri gerilim enjeksiyonunun kontrolünü sağlar. SSSC ile hat akımı doğrudan kontrol edilebilir. Endüktif ve kapasitif olarak çalışabilmektedir. Kapasitif çalışma durumlarında iletilen aktif güç artmaktadır. Endüktif çalışma durumlarında ise iletilen aktif güç aynı oranda azalmaktadır. Kararlılık yönünden SSSC, rotor açısı salınımlarının bastırılmasında etkili olmaktadır [178]. DC bir güç kaynağı eklendiğinde, hat rezistansını veya reaktansını kompanse edebilir. Böylece,  $X/R$  oranı yüksek tutulabilir [179,180].

#### 4.4.5. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)

UPFC, iletim hattının empedansını, gerilimini ve faz açısını kontrol edebilen bir FACTS cihazıdır. Şu anda en gelişmiş güç akış denetleyicisi ve en pahalı FACTS cihazı olarak kabul edilmektedir [181]. UPFC, ortak bir DC kapasitörden çalışan bir STATCOM ve bir SSSC'nin birleşiminden oluşur. İletim hattına seri bağlantısında SSSC, paralel bağlantısında ise STATCOM olarak kullanılır. UPFC'ye ait genel bağlantı yapısı şekil 4.28'de verilmiştir. Şekilde STATCOM Çevirici 1, SSSC ise Çevirici 2 olarak adlandırılmıştır [182].



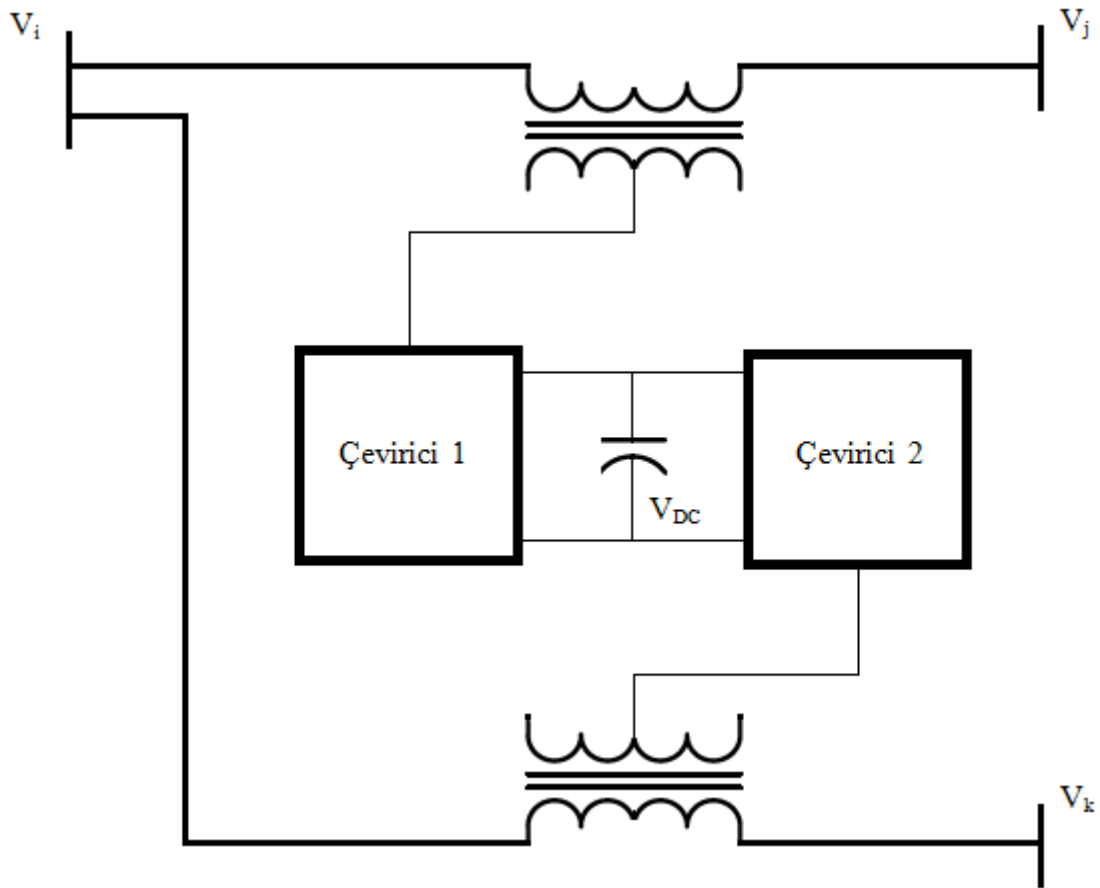
Şekil 4.28. UPFC genel bağlantı yapısı [181,182]

Şekilden de görüldüğü gibi, UPFC GTO gibi yarı iletken güç elektroniği elemanlarının kullanıldığı iki çevirici içermektedir. Birbirlerinden bağımsız olan bu iki çevirici, sistemden reaktif güç çekmeyi veya sisteme reaktif güç vermeyi sağlarlar. İhtiyaç duydukları gerilimi ise DC kapasitörden almaktadırlar [181]. UPFC'nin AC ucundaki reaktif güç değişimi bağlı olduğu çevirici ile sağlanır. AC girişteki aktif güç DC hattın güç talebini karşılamak için çevirici 1 tarafından DC

güce dönüştürülür. Çevirici 1, çevirici 2'nin güç talebini karşılamak üzere AC sistemde güç çekme veya AC sisteme güç verme amacıyla kullanılır. Gerilimin tekrar AC gerilime dönüştürülmesiyle DC hattın gücü AC güce dönüştürülür. Çevirici 1 AC sistemden reaktif güç çekerek veya sisteme reaktif güç vererek reaktif güç kompanzasyonu da yapmış olur [182].

#### 4.4.6. Hatlararası güç akış kontrolörü (IPFC)

Gyugyi ve arkadaşları tarafından 1999 yılında önerilen IPFC, bir trafo merkezinin çoklu hatları arasındaki eşsiz güç akış yönetimi yeteneğiyle seri kompanzasyon için kullanılan bir FACTS cihazıdır [183]. Diğer FACTS cihazları gibi IPFC'ler de küçük veya büyük bozucu etkilere karşı güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi için kullanılabilir. Şekil 4.29'da IPFC'ye ait genel bağlantı yapısı görülmektedir.



Şekil 4.29. İki çeviricili IPFC genel bağlantı yapısı [184]

IPFC, DC terminalleri birbirine bağlanmış iki veya daha fazla SSSC'den oluştuğundan UPFC gibi birleştirilmiş kompanzator olarak adlandırılabilir [184]. Her bir çevirici (SSSC), kendi hattı için seri reaktif kompanzasyonu sağlar. Bununla birlikte, çeviriciler ve dolayısıyla hatlar arasında, ortak DC terminalleri aracılığıyla, aktif gücün transferi de sağlanır. Aktif gücün farklı hatlar arasındaki transferi; hatlar arasında aktif ve reaktif güç akışını eşitler, hatların aşırı yükünü azaltır, rezistif hat gerilim düşümlerine karşı ve reaktif güç talebine karşılık kompanzasyon sağlar ve dinamik bozucu etkiler için tüm kompanzasyon sisteminin etkinliğini artırır [185]. Ayrıca, IPFC, bazı hatlar için aktif ve reaktif kompanzasyon sağlayarak tüm iletim hattının en iyi şekilde kullanımını mümkün kılar [186].

#### **4.5. FACTS Cihazlarının Olumlu ve Olumsuz Etkileri**

Günümüzde gelişen, güç elektroniği elemanları tabanlı FACTS cihazları elektrik güç sistemlerinde büyük bir kullanım alanı bulmaktadır. FACTS cihazlarının güç sistemlerinin işletilmesi ve kontrolünde sağladığı bazı yararlar aşağıda sıralanmıştır[133,137,187-189]:

- a) FACTS'ler gerilim ve/veya akım kapasitelerini arttırarak mevcut iletim sistemlerinden daha iyi yararlanmayı sağlayabilirler. Böylece, daha verimli enerji iletimi sağlanmış olur.
- b) FACTS cihazları yüksek güç transfer kapasitesi ile hattın devre dışı kalmasını engelleyerek sistem kararlılığının devamını sağlarlar. Geçici hal kararlılık sınırlarını yükselterek, kısa devre akımlarını ve aşırı yüklenmeleri sınırlandırarak sistemin güvenliğini ve güvenilirliğini arttırmaktadırlar.
- c) FACTS'lerin kullanılmasıyla enerji kalitesinin verimliliği de arttırılmış olur. Bu sayede, daha az dalgalanmalı gerilim ve istenilen frekans sağlanır.
- d) FACTS'lerin üstün ve hızlı kontrol özellikleri sayesinde kontrollü güç akışı yapılabilmektedir. Böylece, kontrolsüz paralel ve döngüsel güç akışları kontrollü bir şekilde düzenlenebilir.

Kararlı hal çalışma problemlerinin çözümünde FACTS cihazlarının işlevlerinin bir özeti tablo 4.3'te verilmiştir [155].

Tablo 4.3. Güç sisteminin çalışmasında FACTS cihazlarının rolü

| Konu              | Çalışma Sorunu                   | Düzeltilici Eylem  | FACTS Cihazı      |
|-------------------|----------------------------------|--|-------------------|
| Gerilim Sınırları | Aşırı yükte düşük gerilim        | Hatta reaktif güç vermek   | STATCOM, SVC      |
|                   | Zayıf yükte yüksek gerilim       | Hattan reaktif güç çekmek  | STATCOM, SVC, TCR |
|                   | Kesinti sonrası yüksek gerilim   | Hattan reaktif güç çekmek;<br>Aşırı yüklenmeyi önlemek             | STATCOM, SVC, TCR |
|                   | Kesinti sonrası alçak gerilim    | Hatta reaktif güç vermek;<br>Aşırı yüklenmeyi önlemek              | STATCOM, SVC      |
| Termal Sınırlar   | İletimde aşırı yüklenme          | Aşırı yükün azaltılması  | TCSC, SSSC, UPFC  |
|                   | Paralel devrelerde açma          | Devre yükünün sınırlanması   | TCSC, SSSC, UPFC  |
| Döngüsel Akış     | Paralel hatlarda yük paylaşımı   | Seri reaktansın ayarlanması  | SSSC, UPFC, TCSC  |
|                   | Hata sonrası güç akışı paylaşımı | Şebekenin yeniden düzenlenmesi veya termal sınırların kullanılması | TCSC, SSSC, UPFC  |
|                   | Ters yönlü güç akışı             | Faz açısının ayarlanması   | SSSC, UPFC        |

e) Yeni iletim hatlarının kurulması ciddi bir çevresel yıkıma neden olabilmektedir. FACTS cihazları mevcut güç sistemlerinin yüklenme kapasitesinde sağladığı artış ile yeni iletim hatlarının eklenmesine olan gereği ortadan kaldırarak tüketicilerin artan talepleri karşılanabilir. Ayrıca herhangi bir atık veya tehlikeli madde üretmediğinden çevreyi kirletmezler.

f) FACTS cihazlarının maliyetleri yüksek olmasına rağmen yeni iletim hatlarının kurulumu, kamulaştırma bedelleri, kurulum süresi, devreye alma süreci ve çevresel

yıkımlar daha yüksek maliyetler ortaya çıkarmaktadır. İletim hatlarındaki problemleri FACTS cihazları ile çözmek alternatif yöntemlere göre daha ekonomik bir yöntem olacaktır.

FACTS cihazlarının sayılan bu üstünlüklerine rağmen olumsuz yönleri de yok değildir. Bunların birkaçı aşağıda belirtilmiştir [190,191]:

a) FACTS’lerde kullanılan elemanlar pahalıdır ve ithalatla sağlanabilir. Tablo 4.4’te geleneksel cihazlar ile FACTS cihazlarının maliyet karşılaştırması verilmiştir [136].

Tablo 4.4. Geleneksel cihazlar ile FACTS cihazlarının maliyet karşılaştırması

| Cihaz                | Maliyet (US \$)                |
|----------------------|--------------------------------|
| Paralel Kapasitör    | 8 \$ / kVAr                    |
| Seri Kapasitör       | 20 \$ / kVAr                   |
| SVC                  | 40 \$ / kVAr – kontrollü bölüm |
| TCSC                 | 40 \$ / kVAr – kontrollü bölüm |
| STATCOM              | 50 \$ / kVAr                   |
| UPFC – seri kısmı    | 50 \$ / kVAr – seri güç akışı  |
| UPFC – paralel kısmı | 50 \$ / kVAr – kontrollü bölüm |

b) Sistemlerin tasarımını, bakım ve onarımını yapabilecek yetişmiş eleman sayısı azdır.

c) Güç elektroniği tabanlı olduklarından sistemde kayıplar oluşur. Bu da elemanların ısınmasına sebep olur.

d) FACTS’leri oluşturan yarı iletken elemanların tetiklenmesi için ilave elektronik devrelere ihtiyaç duyarlar.

e) FACTS cihazları yüksek gerilimlerde kullanıldıklarından elemanların yalıtımı sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden, hat ve yük tam olarak birbirinden yalıtılamaz.

## **BÖLÜM 5. ENERJİ FONKSİYONU ANALİZİ**

### **5.1. Giriş**

Enerji fonksiyonu analizi gerilim kararlılığına farklı bir açıdan bakmayı sağlar. Bu analizde, bir güç sisteminin çalışma kararlılığı bir çukurun dibinde duran bir topa benzetilebilir. Kararlılık, bu anlamda bir bozucu etki sonrası topun tekrar çukurun dibine yuvarlanması olarak yorumlanabilir. Güç sisteminde değişiklikler olduğu gibi çukuru çevreleyen tepelerin yüzeyinde ve tepe geçişlerinde de değişiklikler olabilir. Bir küçük bozucu etki ile tepe geçişinin çok azalması bir gerilim çökmesi olarak kabul edilirse, top çukurun dibinden tepe geçişinin diğer tarafına doğru yuvarlanabilir. Düşük tepe geçişinin yüksekliği hesaplanabilir ve gerilim kararsızlığına yakınlığını gözlemek için bir belirti olarak kullanılabilir.

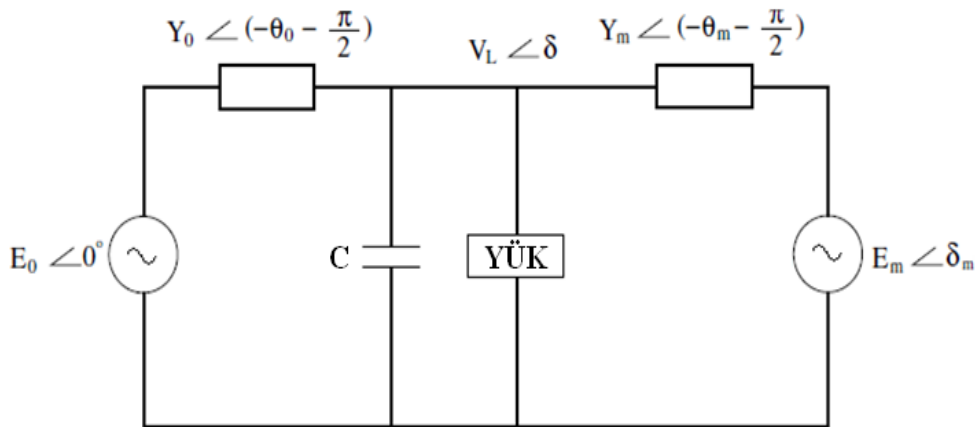
Lyapunov'un ikinci metodu dinamik bir sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü elde etmeksizin denklemin biçiminden dinamik sistemin kararlı olup olmadığının belirlenmesini sağlar. Lyapunov, sistemin içinde biriktirilen enerji ile sistemin dinamiği arasında bağıntı kuracak bir fonksiyon tanımlamıştır. Bu fonksiyon enerji kavramı göz önüne alınarak verilmiştir. Bir sistemin enerjisi sistem denge durumuna ulaşıncaya kadar sürekli olarak azalır, bu sistem kararlıdır. Fiziksel sistemler için yazılan enerji fonksiyonları pozitif ve belirli fonksiyonlardır. Toplam enerjisi sürekli olarak azalan bir sistemde ise enerji fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olur. Lyapunov, enerji fonksiyonunun pozitif belirli olma özelliğinden ve kararlı sistemin enerji fonksiyonunun işte bu özelliğinden yararlanarak ikinci metodu vermiştir [115]. Enerji fonksiyonları Lyapunov fonksiyonlarının özel bir formudur.

Tezin analiz kısmını oluşturan bu bölümde sırasıyla tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve son

olarak dört baralı güç sistemlerinin enerji fonksiyonu analizleri gösterilecektir. Genellikle, enerji fonksiyonu analizleri kontrol cihazlarının etkisini dikkate almadan bir güç sisteminin kararlılığını incelemek için kullanılmıştır. Bu tezle, yukarıda sayılan güç sistemlerinin SVC'li durumları da değişken gradiyent metotla oluşturulan enerji fonksiyonları yardımıyla incelenebilecektir. SVC'li ve SVC'siz durumlarının karşılaştırmaları verilecektir. Tek makine sonsuz bara ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerinin enerji fonksiyonu analizleri için sayısal simülasyon çalışmaları MATHCAD programı, indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistem modellerinin enerji fonksiyonu analizleri için ise sayısal simülasyon çalışmaları MACSYMA programı kullanılarak yapılmıştır.

## 5.2. SVC'siz ve SVC'li Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi

Dobson ve arkadaşları [8] gerilim çökme çalışmaları için bir işletme yükünü ifade eden asenkron motora paralel sabit P-Q yükü ve sabit empedans yükünden oluşan yük modelini önermektedirler. İncelenen güç sistemi modelinde, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi bir generatör, sonsuz güçlü bir bara, lineer olmayan yükler ve bu yüklere bağlı paralel bir kondansatör bulunmaktadır. Yük barası, sabit empedansının bir parçası olarak gerilim genliğini belli değerlerde tutmak için kapasite içermektedir.



Şekil 5.1. Tek makine sonsuz bara güç sistemi

Generatör modeli aşağıdaki şekilde verilebilir:



$$\dot{y}(t) = g(y(t), z(t)) \quad (5.1)$$

Burada  $y(t)$ , generatör açısı ( $\delta_m$ ) ve açısal hız ( $\omega_m$ ) gibi generatör durum değişkenlerini ifade eden vektördür.  $z(t)$  ise yük barasının gerilimi ( $V$ ) ve yük açısı ( $\delta$ ) gibi yüke ait durum değişkenlerini ifade eden vektördür. Generatöre ait salınım denkleminin dinamiği aşağıdaki gibi gösterilir:

$$M\ddot{\delta}_m + D\dot{\delta}_m = P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (5.2)$$

Burada  $M$ ,  $D$  ve  $P_m$  sırasıyla generatör moment ataleti, generatör sönümleme katsayısı ve generatör mekanik gücü olarak ifade edilir.

Yük modeli aşağıdaki ifadelerle verilmektedir [192]:

$$P_d = P_0 + P_1 + K_{pw} \dot{\delta} + K_{pv} (V + TV) \quad (5.3)$$

$$Q_d = Q_0 + Q_1 + K_{qw} \dot{\delta} + K_{qv} V + K_{qv2} V^2 \quad (5.4)$$

Burada  $K_{pw}$ ,  $K_{pv}$ ,  $K_{qw}$ ,  $K_{qv}$ ,  $K_{qv2}$  ifadeleri asenkron motorun dinamiğinden gelen ifadelerdir ve sabit kabul edilmiştir.  $P_0$  ve  $Q_0$  asenkron motorun sabit aktif ve reaktif yüklerini,  $P_1$  ve  $Q_1$  ise sabit P-Q yükünü ifade etmektedir.

Şekil 5.1'deki sistemin Thevenin eşdeğeri alındığında aşağıdaki ifadeler bulunur:

$$V_0' = \frac{V_0}{(1 + C^2 Y_0^{-2} - 2C Y_0^{-1} \cos \theta_0)^{1/2}} \quad (5.5)$$

$$Y_0' = Y_0 (1 + C^2 Y_0^{-2} - 2C Y_0^{-1} \cos \theta_0)^{1/2} \quad (5.6)$$

$$\theta_0' = \theta_0 + \tan^{-1} \left( \frac{C Y_0^{-1} \sin \theta_0}{1 - C Y_0^{-1} \cos \theta_0} \right) \quad (5.7)$$

Yüke iletilen aktif ve reaktif güçler şunlardır:

$$P = -E_0' V Y_0' \sin(\delta + \theta_0') - E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) + (Y_0' \sin \theta_0' + Y_m \sin \theta_m) V^2 \quad (5.8)$$

$$Q = E_0' V Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + E_m V Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos \theta_0' + Y_m \cos \theta_m) V^2 \quad (5.9)$$

Denklem (5.3)'te  $K_{pv} \dot{TV}$  çekilirse şu denklem elde edilir:

$$K_{pv} \dot{TV} = -K_{pv} V - K_{pw} \dot{\delta} - P_0 - P_1 + P_d \quad (5.10)$$

Bu denklemin her iki yanını  $K_{qw}$  ile çarpılırsa (5.14) denklemini elde edilir. (5.4) denkleminde  $K_{qw} \dot{\delta}$  çekilirse (5.13) denklemini elde edilir.

Bu denklemler, tek makine sonsuz bara güç sisteminin durum denklemlerini gösteren 4 adet 1. dereceden diferansiyel denklem şeklinde ifade edilir [10].

$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.11)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (5.12)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv} V - K_{qv2} V^2 + Q - Q_0 - Q_1 \quad (5.13)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P) \quad (5.14)$$

(5.11), (5.12), (5.13) ve (5.14) ile verilen diferansiyel denklemler, yüksek gerilim çalışma noktasında oldukça karmaşık yük modellemesini içeren basit sistem modelinin tanımıdır.

Yukarıda verilen denklemler generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_1$ ) koşulu altında yeniden yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2} M\omega - \frac{1}{M} a(\delta, \delta_m, V) \quad (5.15)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} M\omega \quad (5.16)$$

$$\dot{\delta} = -b(\delta, \delta_m, V) \quad (5.17)$$

$$\dot{V} = -c(\delta, \delta_m, V) \quad (5.18)$$

Burada  $a(\delta, \delta_m, V)$ ,  $b(\delta, \delta_m, V)$  ve  $c(\delta, \delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)) \quad (5.19)$$

$$b(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q - Q_0 - Q_1) \quad (5.20)$$

$$c(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{qw} K_{pv}} (K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) \dots - K_{qw} (P_0 + P_1 - P)) \quad (5.21)$$

Şekil 5.1'de verilen güç sistemi için enerji fonksiyonunun elde edilmesinde (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, \delta, V) \\ M\omega \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

(5.11), (5.12), (5.13) ve (5.14) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.22) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

$(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.22) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.22) denkleminin sağ tarafında görülen (4x1) gradyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, \delta, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(\omega, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, \delta, V) \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.23) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.1) denklemi gibi ortaya çıkar. Tek makine sonsuz bara sisteminin bir enerji fonksiyonu olan Ek A'da verilen (A.1) denklemi sistem frekansı, yükün aktif ve reaktif gücü, yük gerilimi, yük açısı, generatör açısı, sabit parametreler ( $K_{pw}$ ,  $K_{pv}$ ,  $K_{qw}$ ,  $K_{qv}$ ,  $K_{qv2}$ , vs.) ile alakalı tüm parametreleri içerir ve sistem frekansı, gerilim, aktif ve reaktif güç ile Şekil 5.1'de verilen güç sisteminin Thevenin eşdeğerine yerleştirilen kapasite (C) arasındaki ilişkileri ifade eder.

Tek makine sonsuz bara güç sistemine ait şebeke, yük ve generatör parametreleri aşağıdaki gibidir. Açılar radyan, diğer parametreler birim değer cinsindedir.

Yük parametre değerleri:

$$K_{pw} = 0.4, K_{pv} = 0.3, K_{qw} = -0.03, K_{qv} = -2.8, K_{qv2} = 2.1, T = 8.5, P_0 = 0.6, Q_0 = 1.3, P_1 = 0.0, Q_1 = 0.0$$

Şebeke ve generatör parametre değerleri:

$$Y_0 = 20, \theta_0 = -5.0, E_0 = 1.0, C = 12.0, Y_0' = 8.0, \theta_0' = -12.0, E_0' = 2.5, Y_m = 5.0, \theta_m = -5.0, E_m = 1.0, P_m = 1.0, D = 0.05, M = 0.3$$

Yukarıda verilen parametre değerleri indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemleri için yapılan analizlerde de aynen kullanılacaktır.

Sistem dinamiğinin incelenmesi aslında durum değişkenlerinin zamanla nasıl değiştiklerinin incelenmesidir [193,194]. Matematikte bu birinci dereceden diferansiyel denklemlerle yapılmaktadır ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\dot{x} = f(x) \tag{5.24}$$

Bir sistemin dinamik davranışı incelenirken ilk koşullardan başlayan eğrinin hesaplanması gerekir [195-197]. Genellikle bütün eğrileri hesaplamaya gerek yoktur. (4.24) ile gösterilen eşitlikte sol kısım durum değişkenlerinin değişim hızını göstermektedir. Bu, durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilen bir vektördür. O halde bu eşitlik durum uzayının her noktasında bir vektöre karşılık gelir. Bu sistemin özellikleri vektör alanı incelenerek elde edilebilir.

$\dot{x} = 0$  olan noktalara denge noktaları denir. Vektör alanının davranışı durum uzayında bölgeden bölgeye fark edebilir ve birden fazla denge noktaları olabilir. Bu durumda vektör alanı lokal olarak incelenir. Yani vektör alanı doğrusal bölgelere bölünür ve her bir bölüm ayrı ayrı incelenir. Ayrıca global özelliklerde vardır. Lokal özellikler incelenirken sistem denge noktaları civarında doğrusallaştırılır. Bu yapılırken sistemin jakobiyen matrisinden yararlanır. Vektör alanının özellikleri jakobiyen matrisinin denge noktalarındaki özdeğerleri incelenerek yapılır.

Örneğin şu şekilde bir sistem olsun:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f_1(x, y) \\ \dot{y} &= f_2(x, y)\end{aligned}\tag{5.25}$$

Bu sistemin denge noktaları  $x^*$  ve  $y^*$  olsun. Sistemin denge noktalarında jakobiyen matrisi şu şekildedir:

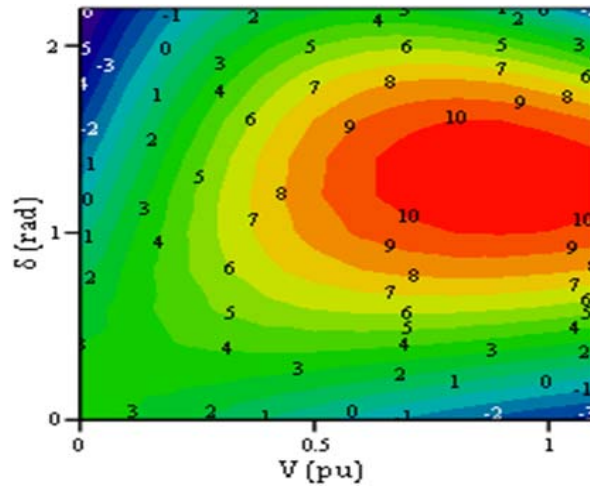
$$F(x^*, y^*) = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x} & \frac{\delta f_1}{\delta y} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x} & \frac{\delta f_2}{\delta y} \end{pmatrix}\tag{5.26}$$

Sistem özdeğerlerinin reel kısmı negatif ise sistem kararlı, pozitif ise sistem kararsızdır. Bazı özdeğerler reel ve negatif iken bazıları reel ve pozitif ise sistem özdeğerleri negatif ve reel olan bölgelerde kararlı, diğer yerlerde kararsızdır. Fakat global olarak sistem kararsızdır. Özdeğerlerin reel kısımları yok, sadece imajiner kısımları varsa sistem sönümlenme yapmadan salınım yapar. Tek makine sonsuz bara güç sistemi için,  $(\delta_m^*, w^*, \delta^*, V^*) = (0.7855, 0.0, 0.2, 1)$  denge noktası olarak seçilmiştir.

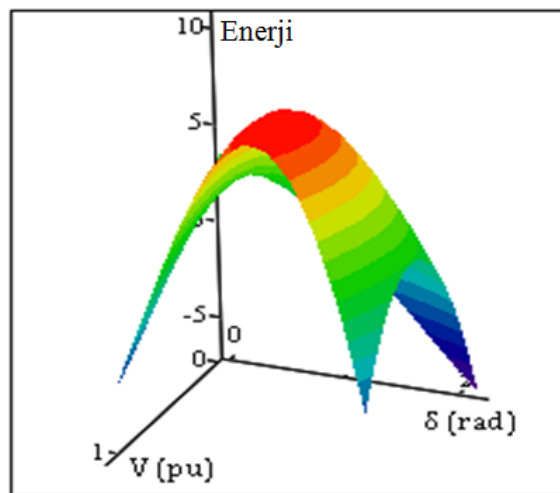
SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir. Bu analizde sistem frekansı ( $\omega$ ), generatör rotor açısı ( $\delta_m$ ), yük açısı ( $\delta$ ) ve yük gerilimi ( $V$ ) olmak üzere dört adet durum değişkeni vardır. Bu analizin asıl amacı, güç sisteminin tüm enerjisi üzerinde yükün ne çeşit etkilere sahip olabileceğinin araştırılmasıdır.

### 5.2.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.2.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.2'den ve Tablo 5.1'den görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.6$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 9.2 ve 11 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.1'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

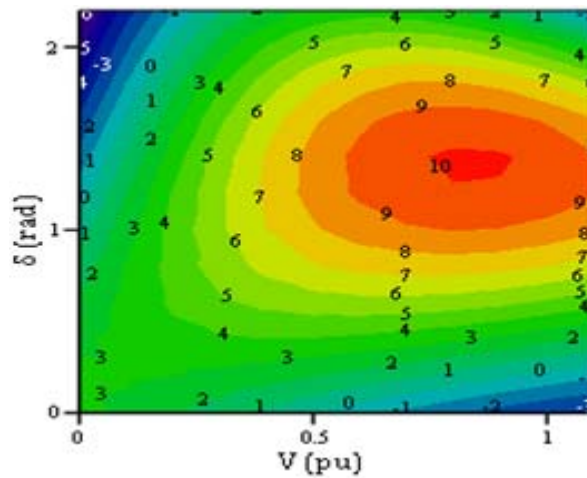
Tablo 5.1.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 3,7           | 3,1        | 2,4        | 1,7        | 1,0        | 0,2        | -0,5       | -1,2       | -1,8       | -2,4       | -3,0     |  |
| <b>0,2</b> | 3,4           | 3,4        | 3,3        | 3,0        | 2,7        | 2,4        | 2,0        | 1,5        | 1,0        | 0,5        | 0,0      |  |
| <b>0,4</b> | 3,0           | 3,6        | 4,0        | 4,2        | 4,4        | 4,4        | 4,3        | 4,1        | 3,8        | 3,5        | 3,1      |  |
| <b>0,6</b> | 2,4           | 3,5        | 4,4        | 5,2        | 5,7        | 6,1        | 6,3        | 6,4        | 6,3        | 6,2        | 5,9      |  |
| <b>0,8</b> | 1,5           | 3,2        | 4,6        | 5,8        | 6,8        | 7,5        | 8,0        | 8,3        | 8,5        | 8,4        | 8,2      |  |
| <b>1</b>   | 0,6           | 2,7        | 4,6        | 6,1        | 7,4        | 8,4        | 9,2        | 9,7        | 10,0       | 10,1       | 10,0     |  |
| <b>1,2</b> | -0,5          | 2,0        | 4,2        | 6,1        | 7,6        | 8,9        | 9,8        | 10,5       | 10,8       | 11,0       | 10,9     |  |
| <b>1,4</b> | -1,7          | 1,1        | 3,6        | 5,6        | 7,4        | 8,7        | 9,8        | 10,5       | 10,9       | 11,0       | 10,8     |  |
| <b>1,6</b> | -3,0          | 0,1        | 2,7        | 4,9        | 6,6        | 8,0        | 9,1        | 9,7        | 10,0       | 10,0       | 9,6      |  |
| <b>1,8</b> | -4,2          | -1,1       | 1,5        | 3,7        | 5,5        | 6,8        | 7,7        | 8,2        | 8,3        | 8,0        | 7,4      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Tablo 5.1, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

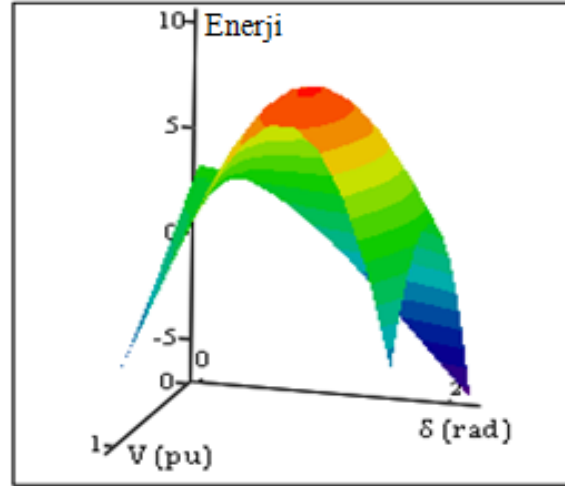
### 5.2.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.3.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.3. (Devamı)

Şekil 5.3 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.3'ten ve Tablo 5.2'den, enerji yoğunluğunun  $0.7 \leq V \leq 0.9$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 9.7 ve 10.1 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.2'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda en yüksek enerji yoğunluğu 11 iken,  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde ise en yüksek enerji yoğunluğunun 10.1 olması enerji yoğunluğunun, generatör açısı arttıkça azalacağını bir göstergesidir.

Tablo 5.2.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

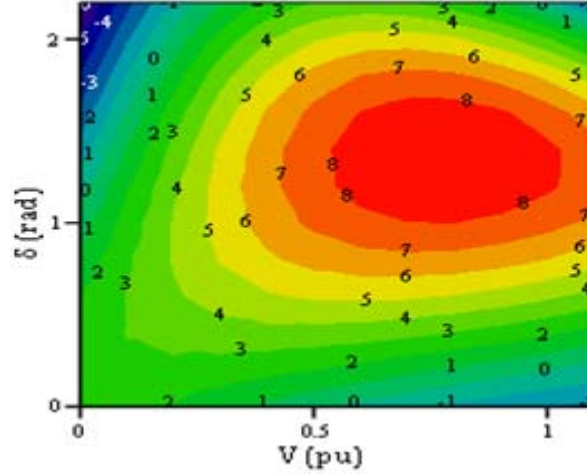
| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 3,4           | 2,8        | 2,1        | 1,5        | 0,8        | 0,1        | -0,6       | -1,2       | -1,8       | -2,4       | -2,9     |  |
| <b>0,2</b> | 3,2           | 3,2        | 3,0        | 2,8        | 2,4        | 2,1        | 1,6        | 1,2        | 0,7        | 0,2        | -0,4     |  |
| <b>0,4</b> | 2,8           | 3,3        | 3,7        | 3,9        | 4,0        | 3,9        | 3,8        | 3,5        | 3,2        | 2,8        | 2,3      |  |
| <b>0,6</b> | 2,3           | 3,3        | 4,2        | 4,8        | 5,3        | 5,6        | 5,7        | 5,7        | 5,5        | 5,2        | 4,8      |  |
| <b>0,8</b> | 1,5           | 3,1        | 4,4        | 5,5        | 6,3        | 6,9        | 7,3        | 7,5        | 7,5        | 7,3        | 7,0      |  |
| <b>1</b>   | 0,6           | 2,7        | 4,4        | 5,8        | 7,0        | 7,9        | 8,5        | 8,9        | 9,0        | 9,0        | 8,7      |  |
| <b>1,2</b> | -0,4          | 2,0        | 4,1        | 5,8        | 7,3        | 8,4        | 9,2        | 9,7        | 9,9        | 9,9        | 9,6      |  |
| <b>1,4</b> | -1,6          | 1,2        | 3,5        | 5,5        | 7,1        | 8,4        | 9,3        | 9,9        | 10,1       | 10,1       | 9,7      |  |
| <b>1,6</b> | -2,8          | 0,2        | 2,7        | 4,8        | 6,5        | 7,9        | 8,8        | 9,3        | 9,5        | 9,4        | 8,9      |  |
| <b>1,8</b> | -4,1          | -1,0       | 1,7        | 3,8        | 5,5        | 6,8        | 7,6        | 8,1        | 8,1        | 7,8        | 7,0      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Tablo 5.2, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

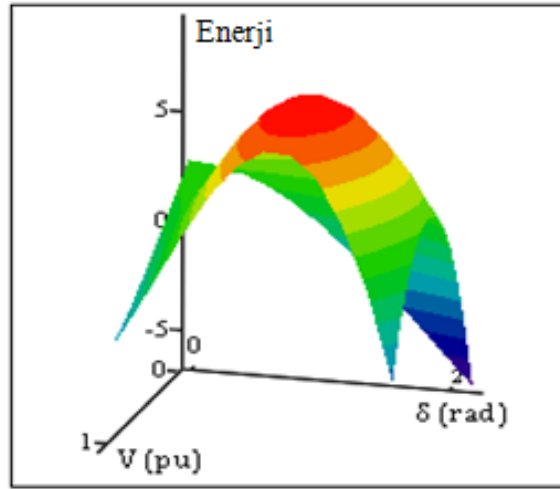


### 5.2.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.4.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.4 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.6$  arasında değiştiği Şekil 5.4'ten ve Tablo 5.3'ten görülmektedir. Bu noktalar arasında enerji yoğunluğunun 7.3 ve 8.9 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.3'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.3.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

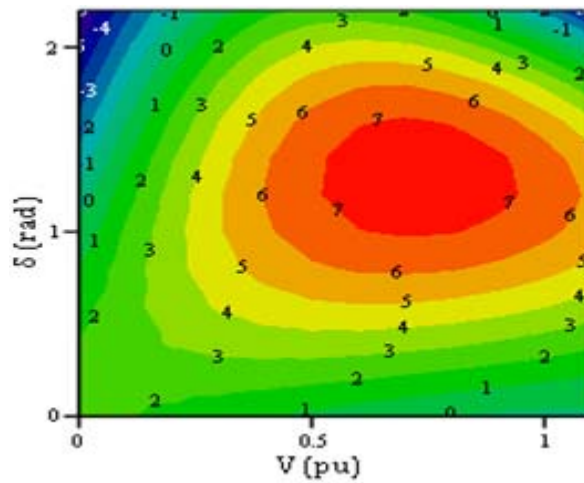
| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 2,9           | 2,4        | 1,9        | 1,4        | 0,8        | 0,3        | -0,3       | -0,8       | -1,3       | -1,7       | -2,1     |  |
| <b>0,2</b> | 2,8           | 2,8        | 2,7        | 2,6        | 2,3        | 2,0        | 1,6        | 1,2        | 0,8        | 0,3        | -0,1     |  |
| <b>0,4</b> | 2,5           | 3,0        | 3,4        | 3,6        | 3,7        | 3,6        | 3,5        | 3,2        | 2,9        | 2,5        | 2,0      |  |
| <b>0,6</b> | 2,0           | 3,1        | 3,9        | 4,5        | 4,9        | 5,1        | 5,2        | 5,1        | 4,9        | 4,5        | 4,1      |  |
| <b>0,8</b> | 1,4           | 2,9        | 4,1        | 5,1        | 5,8        | 6,3        | 6,6        | 6,7        | 6,6        | 6,3        | 5,9      |  |
| <b>1</b>   | 0,5           | 2,5        | 4,1        | 5,4        | 6,5        | 7,2        | 7,7        | 7,9        | 7,9        | 7,7        | 7,2      |  |
| <b>1,2</b> | -0,4          | 1,9        | 3,8        | 5,4        | 6,7        | 7,7        | 8,3        | 8,7        | 8,7        | 8,5        | 8,0      |  |
| <b>1,4</b> | -1,5          | 1,1        | 3,3        | 5,2        | 6,6        | 7,7        | 8,4        | 8,8        | 8,9        | 8,7        | 8,1      |  |
| <b>1,6</b> | -2,7          | 0,2        | 2,6        | 4,5        | 6,1        | 7,3        | 8,0        | 8,4        | 8,4        | 8,0        | 7,3      |  |
| <b>1,8</b> | -3,9          | -0,9       | 1,6        | 3,6        | 5,2        | 6,3        | 7,0        | 7,3        | 7,1        | 6,6        | 5,6      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.3, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

#### 5.2.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

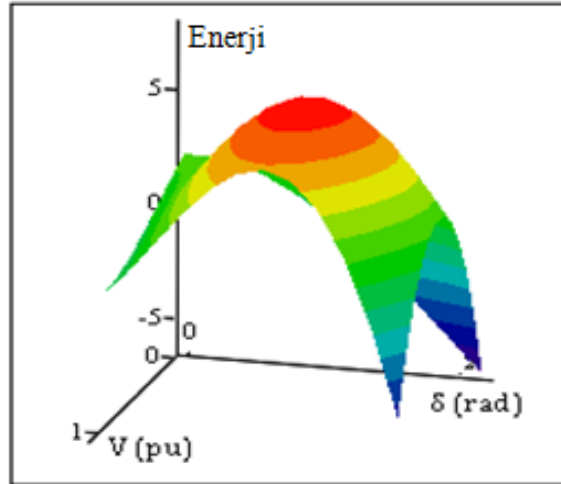
Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.

Şekil 5.5'ten ve Tablo 5.4'ten görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.6 \leq V \leq 0.9$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.6$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 6.3 ve 7.6 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.



(a)

Şekil 5.5.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.5. (Devamı)

Şekil 5.5 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.4'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

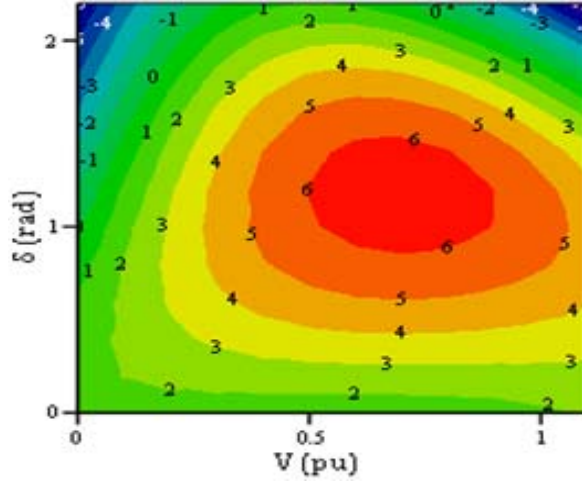
Tablo 5.4.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 2,4           | 2,1        | 1,8        | 1,4        | 1,1        | 0,7        | 0,4        | 0,1        | -0,1       | -0,3       | -0,4     |
| <b>0,2</b> | 2,3           | 2,4        | 2,5        | 2,5        | 2,4        | 2,2        | 2,0        | 1,8        | 1,5        | 1,2        | 1,0      |
| <b>0,4</b> | 2,1           | 2,7        | 3,1        | 3,4        | 3,5        | 3,6        | 3,5        | 3,4        | 3,1        | 2,8        | 2,5      |
| <b>0,6</b> | 1,7           | 2,7        | 3,5        | 4,1        | 4,6        | 4,8        | 4,9        | 4,9        | 4,7        | 4,4        | 3,9      |
| <b>0,8</b> | 1,1           | 2,5        | 3,7        | 4,7        | 5,4        | 5,8        | 6,1        | 6,2        | 6,0        | 5,7        | 5,2      |
| <b>1</b>   | 0,3           | 2,2        | 3,7        | 4,9        | 5,9        | 6,5        | 6,9        | 7,1        | 7,0        | 6,7        | 6,1      |
| <b>1,2</b> | -0,6          | 1,6        | 3,4        | 4,9        | 6,1        | 6,9        | 7,4        | 7,6        | 7,5        | 7,2        | 6,5      |
| <b>1,4</b> | -1,6          | 0,9        | 2,9        | 4,6        | 5,9        | 6,8        | 7,4        | 7,6        | 7,5        | 7,1        | 6,3      |
| <b>1,6</b> | -2,7          | 0,0        | 2,2        | 4,0        | 5,4        | 6,3        | 6,9        | 7,1        | 6,9        | 6,3        | 5,4      |
| <b>1,8</b> | -3,9          | -1,1       | 1,3        | 3,1        | 4,5        | 5,4        | 5,9        | 5,9        | 5,6        | 4,8        | 3,6      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

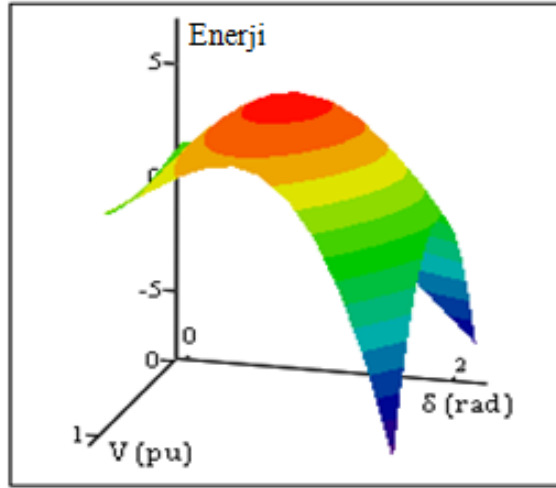
Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.4, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.2.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.6.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.6 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.6'dan ve Tablo 5.5'ten, enerji yoğunluğunun  $0.5 \leq V \leq 0.8$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 5.8 ve 6.5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Güç üretim seviyesi  $\delta_m=0$  radyandan  $\delta_m=1.6$  radyana tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 11'dir (Bkz. Tablo 5.1).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji

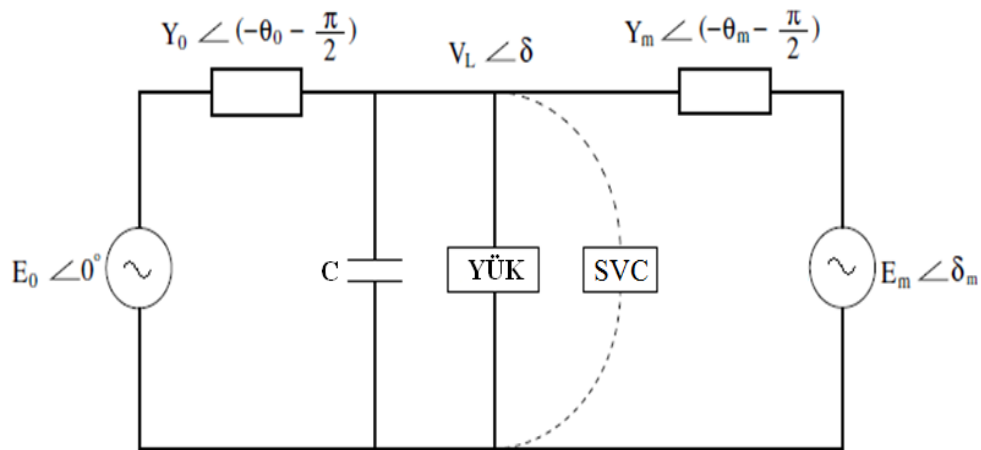
yoğunluğu 5.9'dur (Bkz. Tablo 5.5).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunu gösteren tablo aşağıdadır:

Tablo 5.5.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 1,7           | 1,7        | 1,6        | 1,5        | 1,4        | 1,4        | 1,3        | 1,3        | 1,4        | 1,5        | 1,7      |
| <b>0,2</b> | 1,7           | 2,0        | 2,3        | 2,4        | 2,5        | 2,6        | 2,6        | 2,6        | 2,6        | 2,5        | 2,5      |
| <b>0,4</b> | 1,5           | 2,2        | 2,8        | 3,2        | 3,5        | 3,7        | 3,8        | 3,8        | 3,8        | 3,6        | 3,4      |
| <b>0,6</b> | 1,1           | 2,2        | 3,1        | 3,8        | 4,3        | 4,7        | 4,9        | 4,9        | 4,8        | 4,6        | 4,3      |
| <b>0,8</b> | 0,6           | 2,1        | 3,3        | 4,2        | 4,9        | 5,4        | 5,7        | 5,8        | 5,7        | 5,4        | 5,0      |
| <b>1</b>   | -0,1          | 1,7        | 3,2        | 4,4        | 5,3        | 5,9        | 6,3        | 6,4        | 6,2        | 5,9        | 5,3      |
| <b>1,2</b> | -0,9          | 1,2        | 2,9        | 4,3        | 5,3        | 6,0        | 6,4        | 6,5        | 6,4        | 5,9        | 5,2      |
| <b>1,4</b> | -1,8          | 0,5        | 2,4        | 3,9        | 5,0        | 5,8        | 6,2        | 6,3        | 6,0        | 5,4        | 4,5      |
| <b>1,6</b> | -2,8          | -0,4       | 1,6        | 3,2        | 4,4        | 5,2        | 5,5        | 5,5        | 5,1        | 4,3        | 3,2      |
| <b>1,8</b> | -3,9          | -1,4       | 0,7        | 2,3        | 3,5        | 4,2        | 4,4        | 4,2        | 3,6        | 2,6        | 1,1      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

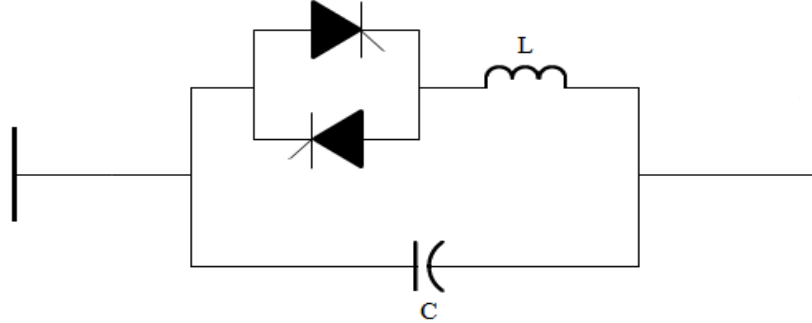
Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.5, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

SVC'siz analizleri yapılan tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenerek tekrar enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. Yük tarafına bir SVC cihazı bağlanmasıyla sistemin gerilim kararlılığı sınırlarının artırılması hedeflenmiştir. Şekil 5.7'de SVC bağlı tek makine sonsuz bara güç sistemi modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.7. SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistemi

Şekil 5.8’de gösterildiği üzere tasarlanan SVC’de sabit değerli bir kondansatör tristör kontrollü seri reaktöre paralel bağlıdır.

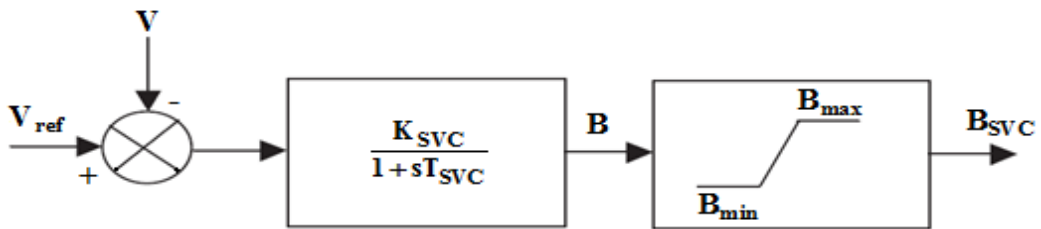


Şekil 5.8. SVC modeli

Bu çalışmada kullanılan SVC’nin matematiksel modeli birinci mertebeden adi bir diferansiyel denklem formunda olup, aşağıda verilmiştir:

$$\left. \begin{aligned} \dot{B} &= \frac{1}{T_{SVC}} (K_{SVC} (V_{ref} - V) - B) \\ B_{min} &\leq B \leq B_{max} \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

Burada B, SVC’nin süseptans değeri olup  $K_{SVC}$  SVC’nin kazancı,  $T_{SVC}$  SVC’nin zaman sabiti ve  $V_{ref}$  referans gerilimidir. Birinci dereceden zaman gecikmeli SVC blok diyagramı Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. SVC blok diyagramı

SVC’nin sınırları tanh fonksiyonu kullanılarak belirlenir.  $\pm B_{LIMIT}$  ile sınırlanmış bir süseptans B için, sınırlayıcı çıkışı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$B_{SVC} = B_{LIMIT} \tanh\left(\frac{B}{B_{LIMIT}}\right) \quad (5.28)$$

SVC'nin ürettiği reaktif güç ifadesi, süseptans ve SVC'nin bağlı olduğu yük barası gerilimine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$Q_{SVC} = BV^2 \quad (5.29)$$

SVC tarafından karşılanan reaktif gücün dinamik güç sistemi modeline eklenmesi yük durum denklemlerindeki yük açısı ve yük gerilimi denklemlerine  $Q_{SVC}$  reaktif güç ilavesi yapılmasıyla tamamlanır. SVC'li tek makine sonsuz bara güç sistem modelinin durum denklemlerini gösteren 4 adet 1. dereceden diferansiyel denklem aşağıdaki gibi ifade edilir [27]:

$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.30)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (5.31)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv} V - K_{qv2} V^2 + Q - Q_0 + Q_{SVC} - Q_1 \quad (5.32)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 - Q_{SVC} + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P) \quad (5.33)$$

(5.30), (5.31), (5.32) ve (5.33) ile verilen diferansiyel denklemler generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m = P_1$ ) koşulu altında tekrar yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2} M\omega - \frac{1}{M} a(\delta, \delta_m, V) \quad (5.34)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} M\omega \quad (5.35)$$

$$\dot{\delta} = -b(\delta, \delta_m, V) \quad (5.36)$$

$$\dot{V} = -c(\delta, \delta_m, V) \quad (5.37)$$

Burada  $a(\delta, \delta_m, V)$ ,  $b(\delta, \delta_m, V)$  ve  $c(\delta, \delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)) \quad (5.38)$$

$$b(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q - Q_0 + Q_{SVC} - Q_1) \quad (5.39)$$

$$c(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{qw}K_{pv}} (K_{pw}K_{qv2}V^2 + (K_{pw}K_{qv} - K_{qw}K_{pv})V + K_{pw}(Q_0 - Q_{SVC} + Q_1 - Q) - K_{qw}(P_0 + P_1 - P)) \quad (5.40)$$

Şekil 5.7’de görülen sistem için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (5.34), (5.35), (5.36) ve (5.37) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, \delta, V) \\ M\omega \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

(5.30), (5.31), (5.32) ve (5.33) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.41) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

$(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ ’ın bir denge noktası için, (5.41) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.41) denkleminin sağ tarafında görülen (4x1) gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, \delta, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(\omega, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, \delta, V) \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

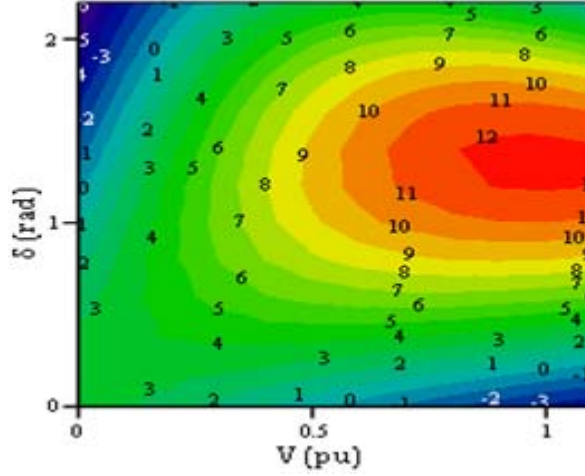
$a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.42) denkleminde yerine konulursa, SVC’li güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A’da görülen (A.2) denklemi gibi ortaya çıkar.

SVC’li tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir. Bu analizlerle SVC’nin güç sisteminin gerilim kararlılığına etkileri incelenecektir.

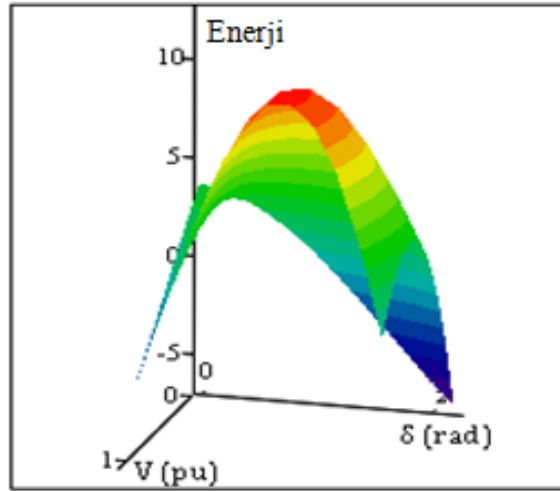


### 5.2.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.10.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.10 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.10'dan ve Tablo 5.6'dan, enerji yoğunluğunun  $0.8 \leq V \leq 1$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 11.8 ve 12.4 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.6'dan belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.6.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

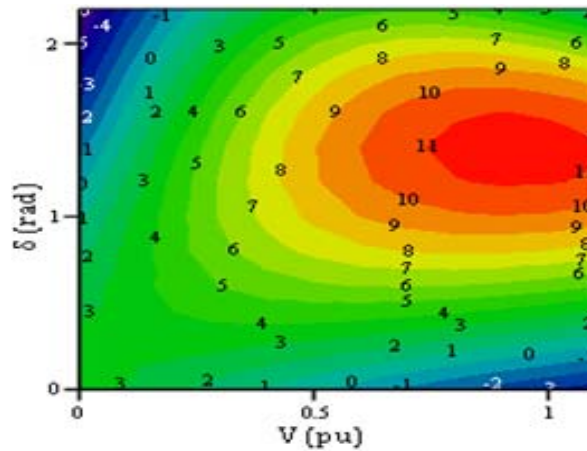
| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 0        | 3,9           | 3,2  | 2,5 | 1,8 | 1,1 | 0,3 | -0,4 | -1,2 | -1,9 | -2,6 | -3,2 |
| 0,2      | 3,6           | 3,6  | 3,4 | 3,2 | 2,9 | 2,5 | 2,1  | 1,6  | 1,1  | 0,6  | 0,1  |
| 0,4      | 3,2           | 3,7  | 4,1 | 4,4 | 4,6 | 4,6 | 4,5  | 4,3  | 4,1  | 3,8  | 3,4  |
| 0,6      | 2,5           | 3,7  | 4,6 | 5,4 | 6,0 | 6,4 | 6,7  | 6,8  | 6,8  | 6,7  | 6,4  |
| 0,8      | 1,7           | 3,4  | 4,8 | 6,0 | 7,0 | 7,8 | 8,4  | 8,8  | 9,1  | 9,1  | 9,1  |
| 1        | 0,7           | 2,9  | 4,8 | 6,4 | 7,7 | 8,8 | 9,7  | 10,3 | 10,8 | 11,0 | 11,0 |
| 1,2      | -0,4          | 2,2  | 4,4 | 6,4 | 8,0 | 9,3 | 10,4 | 11,2 | 11,8 | 12,1 | 12,2 |
| 1,4      | -1,5          | 1,3  | 3,8 | 6,0 | 7,8 | 9,3 | 10,5 | 11,4 | 12,0 | 12,3 | 12,4 |
| 1,6      | -2,8          | 0,3  | 2,9 | 5,2 | 7,1 | 8,7 | 9,9  | 10,7 | 11,3 | 11,5 | 11,5 |
| 1,8      | -4,1          | -0,9 | 1,8 | 4,1 | 5,9 | 7,4 | 8,6  | 9,3  | 9,7  | 9,8  | 9,5  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |

Tablo 5.6, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 11'dir (Bkz. Tablo 5.1). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 12.4'tür (Bkz. Tablo 5.6). Bu sonuç SVC'nin sisteme etkisinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

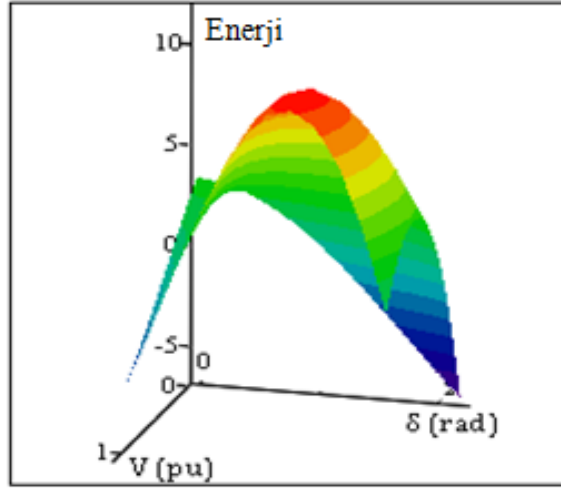
### 5.2.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.11.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim  
b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.11. (Devamı)

Şekil 5.11'den ve Tablo 5.7'den, enerji yoğunluğunun  $0.8 \leq V \leq 1$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 10.9 ve 11.4 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. SVC'li güç sistem analizlerinin iki sonucu ortaya çıkmaktadır. Birincisi enerji ölçümünün, çalışma noktasının kararsızlık bölgesine yakınlığını gösterdiği, ikincisi ise SVC'nin sistemin kararlılığına etkisidir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.7'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

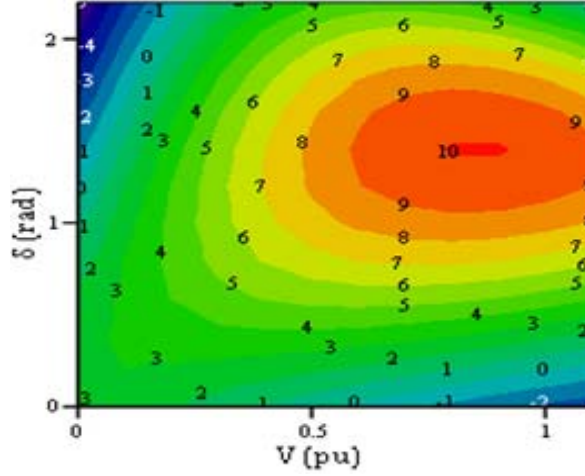
Tablo 5.7.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 3,6           | 2,9        | 2,3        | 1,6        | 0,9        | 0,2        | -0,5       | -1,2       | -1,9       | -2,6       | -3,1     |  |
| <b>0,2</b> | 3,4           | 3,3        | 3,2        | 2,9        | 2,6        | 2,2        | 1,8        | 1,3        | 0,8        | 0,2        | -0,3     |  |
| <b>0,4</b> | 3,0           | 3,5        | 3,9        | 4,1        | 4,2        | 4,1        | 4,0        | 3,8        | 3,4        | 3,0        | 2,6      |  |
| <b>0,6</b> | 2,4           | 3,5        | 4,4        | 5,0        | 5,5        | 5,8        | 6,0        | 6,0        | 5,9        | 5,7        | 5,4      |  |
| <b>0,8</b> | 1,7           | 3,3        | 4,6        | 5,7        | 6,6        | 7,3        | 7,7        | 8,0        | 8,1        | 8,0        | 7,8      |  |
| <b>1</b>   | 0,8           | 2,8        | 4,6        | 6,1        | 7,3        | 8,3        | 9,0        | 9,5        | 9,8        | 9,9        | 9,7      |  |
| <b>1,2</b> | -0,3          | 2,2        | 4,3        | 6,1        | 7,6        | 8,9        | 9,8        | 10,5       | 10,9       | 11,0       | 11,0     |  |
| <b>1,4</b> | -1,4          | 1,4        | 3,8        | 5,8        | 7,5        | 8,9        | 10,0       | 10,8       | 11,2       | 11,4       | 11,3     |  |
| <b>1,6</b> | -2,6          | 0,4        | 3,0        | 5,2        | 7,0        | 8,5        | 9,6        | 10,4       | 10,8       | 10,9       | 10,8     |  |
| <b>1,8</b> | -3,9          | -0,8       | 1,9        | 4,2        | 6,0        | 7,5        | 8,5        | 9,2        | 9,5        | 9,5        | 9,1      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

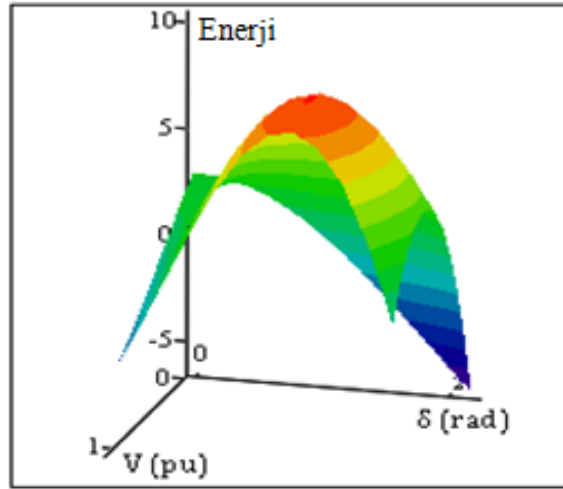
Tablo 5.7, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.2.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.12.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim  
b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.12 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğunun  $0.8 \leq V \leq 0.9$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.6$  arasında değiştiği Şekil 5.12'den ve Tablo 5.8'den görülmektedir. Bu noktalar arasında enerji yoğunluğunun 9.7 ve 10.1 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.8'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.8.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

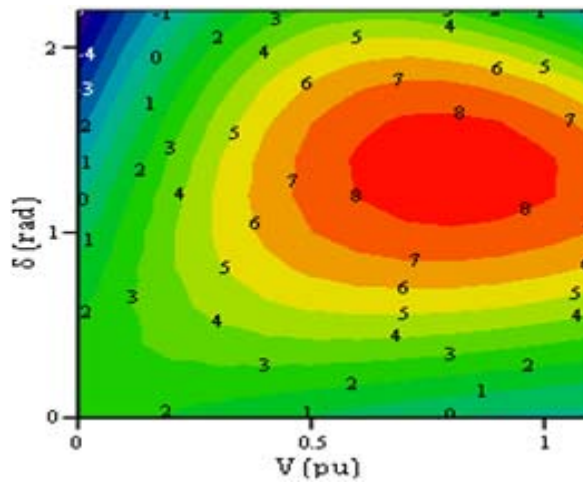
| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 3,1           | 2,6        | 2,1        | 1,5        | 1,0        | 0,4        | -0,2       | -0,7       | -1,3       | -1,7       | -2,2     |
| <b>0,2</b> | 3,0           | 3,0        | 2,9        | 2,7        | 2,5        | 2,2        | 1,8        | 1,4        | 1,0        | 0,5        | 0,1      |
| <b>0,4</b> | 2,7           | 3,2        | 3,6        | 3,8        | 3,9        | 3,9        | 3,8        | 3,5        | 3,2        | 2,9        | 2,4      |
| <b>0,6</b> | 2,2           | 3,2        | 4,1        | 4,7        | 5,1        | 5,4        | 5,6        | 5,5        | 5,4        | 5,1        | 4,7      |
| <b>0,8</b> | 1,6           | 3,1        | 4,3        | 5,3        | 6,1        | 6,7        | 7,1        | 7,3        | 7,3        | 7,1        | 6,8      |
| <b>1</b>   | 0,7           | 2,7        | 4,3        | 5,7        | 6,8        | 7,6        | 8,2        | 8,6        | 8,8        | 8,7        | 8,5      |
| <b>1,2</b> | -0,3          | 2,1        | 4,1        | 5,7        | 7,1        | 8,2        | 9,0        | 9,5        | 9,7        | 9,7        | 9,5      |
| <b>1,4</b> | -1,3          | 1,3        | 3,6        | 5,5        | 7,0        | 8,3        | 9,2        | 9,8        | 10,1       | 10,1       | 9,8      |
| <b>1,6</b> | -2,5          | 0,3        | 2,8        | 4,9        | 6,6        | 7,9        | 8,8        | 9,4        | 9,7        | 9,7        | 9,3      |
| <b>1,8</b> | -3,7          | -0,7       | 1,8        | 4,0        | 5,7        | 7,0        | 7,9        | 8,5        | 8,6        | 8,4        | 7,9      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.8, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.2.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

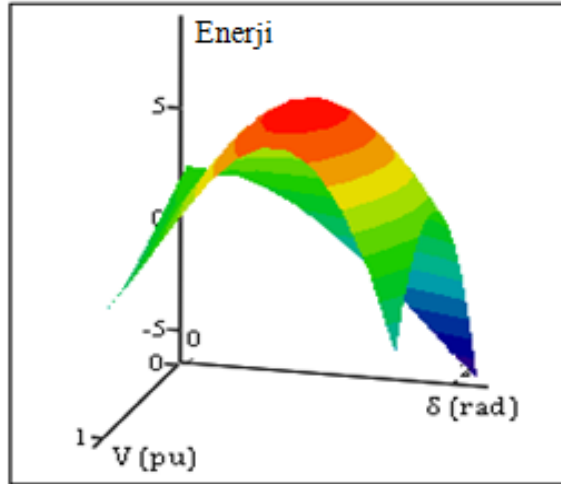
Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.

Şekil 5.13'ten ve Tablo 5.9'dan görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.6$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 7.3 ve 8.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.



(a)

Şekil 5.13.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.13. (Devamı)

Şekil 5.13 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.9'dan belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

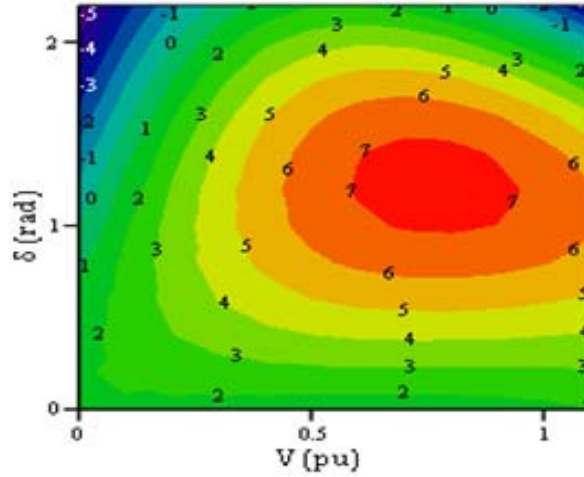
Tablo 5.9.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 2,5           | 2,2        | 1,9        | 1,6        | 1,2        | 0,9        | 0,5        | 0,2        | -0,1       | -0,3       | -0,5     |
| <b>0,2</b> | 2,5           | 2,6        | 2,7        | 2,6        | 2,5        | 2,4        | 2,2        | 1,9        | 1,7        | 1,4        | 1,1      |
| <b>0,4</b> | 2,2           | 2,8        | 3,3        | 3,6        | 3,8        | 3,8        | 3,8        | 3,7        | 3,5        | 3,2        | 2,9      |
| <b>0,6</b> | 1,8           | 2,9        | 3,7        | 4,3        | 4,8        | 5,1        | 5,3        | 5,3        | 5,2        | 5,0        | 4,6      |
| <b>0,8</b> | 1,2           | 2,7        | 3,9        | 4,9        | 5,7        | 6,2        | 6,5        | 6,7        | 6,7        | 6,5        | 6,2      |
| <b>1</b>   | 0,5           | 2,3        | 3,9        | 5,2        | 6,2        | 7,0        | 7,5        | 7,8        | 7,8        | 7,7        | 7,3      |
| <b>1,2</b> | -0,4          | 1,8        | 3,6        | 5,2        | 6,4        | 7,4        | 8,0        | 8,4        | 8,5        | 8,4        | 8,0      |
| <b>1,4</b> | -1,4          | 1,1        | 3,2        | 4,9        | 6,3        | 7,4        | 8,1        | 8,5        | 8,7        | 8,5        | 8,0      |
| <b>1,6</b> | -2,5          | 0,2        | 2,4        | 4,3        | 5,8        | 7,0        | 7,7        | 8,1        | 8,2        | 7,9        | 7,3      |
| <b>1,8</b> | -3,7          | -0,9       | 1,5        | 3,5        | 5,0        | 6,1        | 6,8        | 7,1        | 7,1        | 6,6        | 5,9      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

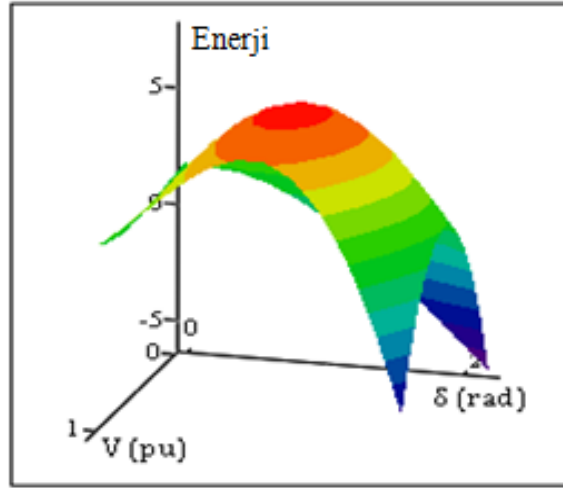
Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.9, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

#### 5.2.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.14.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.14 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.14'ten ve Tablo 5.10'dan, enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 0.9$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 6.8 ve 7.4 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Güç üretim seviyesi  $\delta_m=0$  radyandan  $\delta_m=1.6$  radyana değiştirildiğinde sistemin tüm depolanan enerjisinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=1$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 12.4'tür (Bkz. Tablo 5.6).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde en yüksek

enerji yoğunluğu 6.2'dir (Bkz. Tablo 5.10).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunu gösteren tablo aşağıdadır:

Tablo 5.10.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 1,9           | 1,9        | 1,8        | 1,7        | 1,6        | 1,5        | 1,4        | 1,4        | 1,4        | 1,5        | 1,6      |
| <b>0,2</b> | 1,9           | 2,2        | 2,4        | 2,6        | 2,7        | 2,8        | 2,8        | 2,8        | 2,7        | 2,7        | 2,7      |
| <b>0,4</b> | 1,7           | 2,4        | 3,0        | 3,4        | 3,7        | 4,0        | 4,1        | 4,1        | 4,1        | 4,0        | 3,9      |
| <b>0,6</b> | 1,3           | 2,4        | 3,3        | 4,0        | 4,6        | 5,0        | 5,2        | 5,4        | 5,3        | 5,2        | 5,0      |
| <b>0,8</b> | 0,8           | 2,2        | 3,5        | 4,5        | 5,2        | 5,8        | 6,2        | 6,4        | 6,4        | 6,2        | 5,9      |
| <b>1</b>   | 0,1           | 1,9        | 3,4        | 4,6        | 5,6        | 6,3        | 6,8        | 7,0        | 7,1        | 6,9        | 6,5      |
| <b>1,2</b> | -0,7          | 1,4        | 3,1        | 4,6        | 5,7        | 6,5        | 7,1        | 7,3        | 7,4        | 7,1        | 6,6      |
| <b>1,4</b> | -1,7          | 0,7        | 2,6        | 4,2        | 5,4        | 6,3        | 6,9        | 7,2        | 7,2        | 6,8        | 6,2      |
| <b>1,6</b> | -2,7          | -0,2       | 1,9        | 3,6        | 4,9        | 5,8        | 6,3        | 6,5        | 6,4        | 5,9        | 5,1      |
| <b>1,8</b> | -3,8          | -1,2       | 1,0        | 2,7        | 4,0        | 4,8        | 5,3        | 5,4        | 5,1        | 4,4        | 3,4      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.10, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizinde  $\delta_m=0$  rad durumunda yük yavaşça değiştiğinden sistemin enerji seviyesinde bir artış meydana gelir. Bu çalışmada elde edilen maksimum enerji seviyesi 11 enerji birimidir. Bununla birlikte, eğer yük yüksek gerilimde kullanılsaydı (örneğin  $V=1$  pu) o zaman sistemin kararlılığını koruyabilmesi için sistemin mümkün olan maksimum enerjiye sahip olmasına imkan veren yük açısı  $\delta=1.2$  rad olacaktır. Bu noktada okunan enerji 10.9 enerji birimidir (Bkz. Tablo 5.1). Güç üretim seviyesi  $\delta_m=0$  radyandan  $\delta_m=1.6$  radyana değiştirildiğinde SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sistemine ait analizlerden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 11'dir (Bkz. Tablo 5.1). Aynı değerlerde  $\delta_m=0.4$  rad için 10.1 (Bkz. Tablo 5.2),  $\delta_m=0.8$  rad için 8.7 (Bkz. Tablo 5.3),  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde 7.1 (Bkz. Tablo 5.4) ve  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 5.4'tür (Bkz. Tablo 5.5). Sonuçlara bakıldığında açıkça görülmektedir ki yükteki herhangi bir değişim depolanan enerji seviyesini aşağılara düşürmeye devam edecektir. Yükteki bir değişimin depolanan



enerjide bir artışa sebep olduğu durumda, sistem kararsızlık noktasından uzaklaşma eğilimi göstermektedir.

SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 11'dir (Bkz. Tablo 5.1). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 12.4'tür (Bkz. Tablo 5.6). SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.4$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 10.1'dir (Bkz. Tablo 5.2). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 11.4'tür (Bkz. Tablo 5.7). SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.8$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.8$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.9'dur (Bkz. Tablo 5.3). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 10.1'dir (Bkz. Tablo 5.8). SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.2$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.7$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 7.6'dır (Bkz. Tablo 5.4). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 8.5'tir (Bkz. Tablo 5.9). SVC'siz tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.6$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.7$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 6.5'tir (Bkz. Tablo 5.5). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 7.3'tür (Bkz. Tablo 5.10). Sonuçlar açıkça göstermektedir ki SVC tek makine sonsuz bara güç sisteminin enerji yoğunluğunu, dolayısıyla gerilim kararlılığı sınırlarını arttırmaktadır. Sistemi kararsızlık noktasından uzaklaştırmaktadır.

### 5.3. SVC'siz ve SVC'li İndirgenmiş Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi

Şekil 5.1'deki güç sisteminin kararlılığının analizinde kullanılan (5.11), (5.12), (5.13) ve (5.14) durum denklemlerindeki en küçük hatalar bile sistemin kararlılığının bulunmasında önem arz eden büyük hatalara neden olabilir. Bunu önlemek amacıyla, bu analizde tek makine sonsuz bara modelinin boyutu  $\delta$  değişkeni kaldırılarak indirgenmiştir. Yeni durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [30]:

$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.43)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (5.44)$$

$$TK_{pv} \dot{V} = -K_{pv} V - P_0 - P_1 + P \quad (5.45)$$

Generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_l$ ) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2} M\omega - \frac{1}{M} a(\delta_m, V) \quad (5.46)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} M\omega \quad (5.47)$$

$$\dot{V} = -c(\delta_m, V) \quad (5.48)$$

Burada  $a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)) \quad (5.49)$$

$$c(\delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{pv}} (-K_{qv} V - P_0 - P_1 + P) \quad (5.50)$$

Şekil 5.1'de görülen sistemin indirgenmiş modeli için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (5.46), (5.47) ve (5.48) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, V) \\ M\omega \\ c(\delta_m, V) \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

(5.43), (5.44) ve (5.45) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.51) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

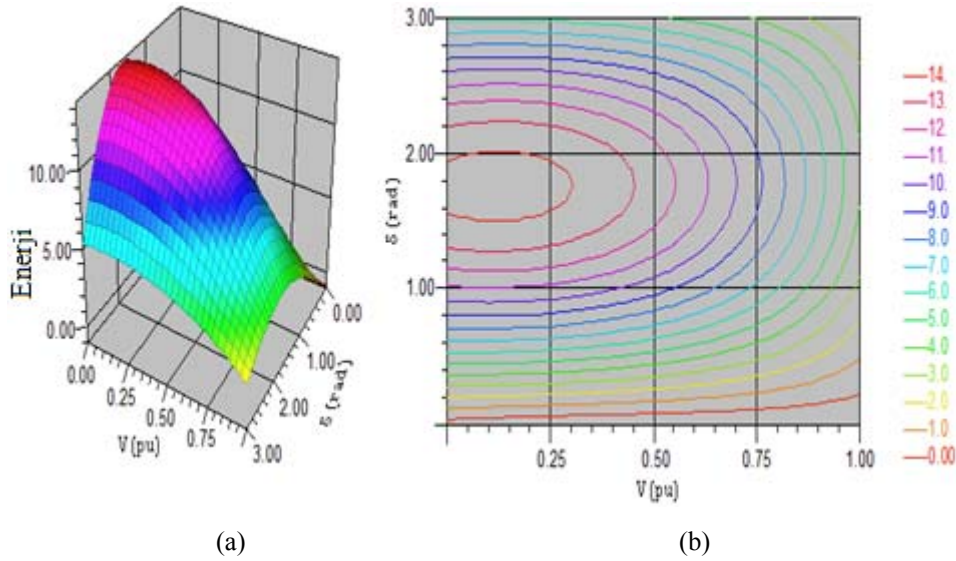
$(\omega_0, \delta_{m0}, V_0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.51) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.51) denkleminin sağ tarafında görülen (3x1) gradiyent

matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, V_0)}^{(\omega, \delta_m, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, V) \\ c(\delta_m, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

$a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  (5.52) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.3) denklemi gibi ortaya çıkar.  $(\delta_m^*, w^*, V^*) = (0.7855, 0.0, 1)$  denge noktası, SVC'li ve SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara sisteminin analizi için denge noktası olarak seçilmiştir. SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara modeli için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı  $\delta_m$  ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir.

### 5.3.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.15.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu ifade etmektedir. Şekil 5.15'te enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.5$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu

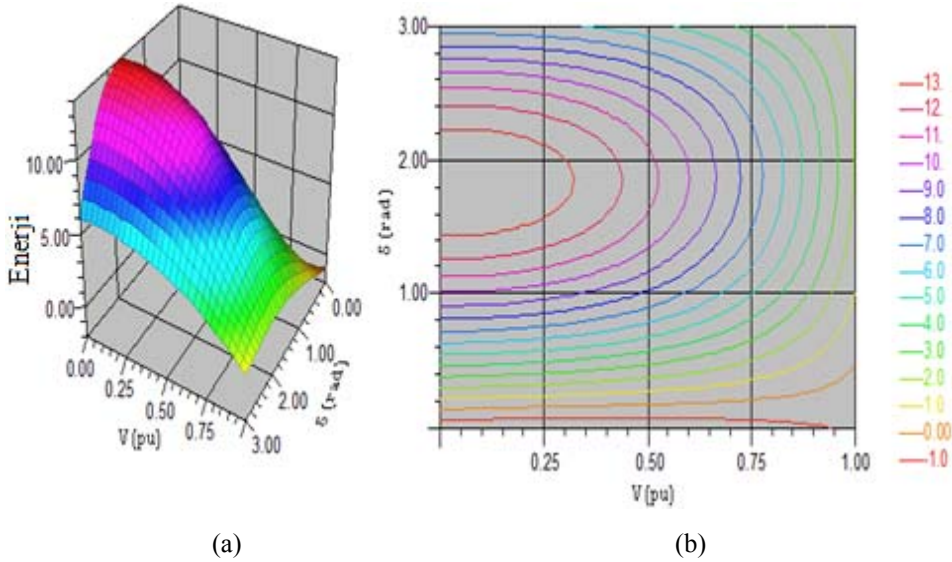
görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji kuvvetinin 10.8 ve 14.4 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 5.11.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0        | -0,5          | -0,7 | -0,8 | -0,9 | -1,0 | -1,0 | -1,0 | -1,0 | -0,9 | -0,9 | -0,9 | -0,9 |
| 0,2      | 1,9           | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,4  | 1,3  | 1,1  | 0,8  | 0,6  | 0,2  | -0,1 | -0,1 |
| 0,4      | 4,4           | 4,4  | 4,2  | 4,1  | 3,8  | 3,5  | 3,1  | 2,6  | 2,1  | 1,4  | 0,7  | 0,7  |
| 0,6      | 6,8           | 6,8  | 6,7  | 6,4  | 6,1  | 5,7  | 5,1  | 4,4  | 3,5  | 2,5  | 1,4  | 1,4  |
| 0,8      | 9,0           | 9,0  | 8,9  | 8,6  | 8,2  | 7,6  | 6,9  | 6,0  | 4,9  | 3,6  | 2,1  | 2,1  |
| 1        | 10,8          | 10,9 | 10,8 | 10,5 | 10,0 | 9,4  | 8,5  | 7,4  | 6,0  | 4,5  | 2,7  | 2,7  |
| 1,2      | 12,4          | 12,5 | 12,4 | 12,1 | 11,5 | 10,8 | 9,8  | 8,5  | 7,0  | 5,3  | 3,3  | 3,3  |
| 1,4      | 13,4          | 13,6 | 13,5 | 13,2 | 12,6 | 11,8 | 10,7 | 9,4  | 7,7  | 5,9  | 3,7  | 3,7  |
| 1,6      | 14,1          | 14,3 | 14,2 | 13,9 | 13,3 | 12,4 | 11,3 | 9,9  | 8,2  | 6,2  | 4,0  | 4,0  |
| 1,8      | 14,2          | 14,4 | 14,3 | 14,0 | 13,4 | 12,6 | 11,5 | 10,0 | 8,4  | 6,4  | 4,1  | 4,1  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1    |

Tablo 5.11, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.16.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.16 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.16'dan ve Tablo 5.12'den, enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.4$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun

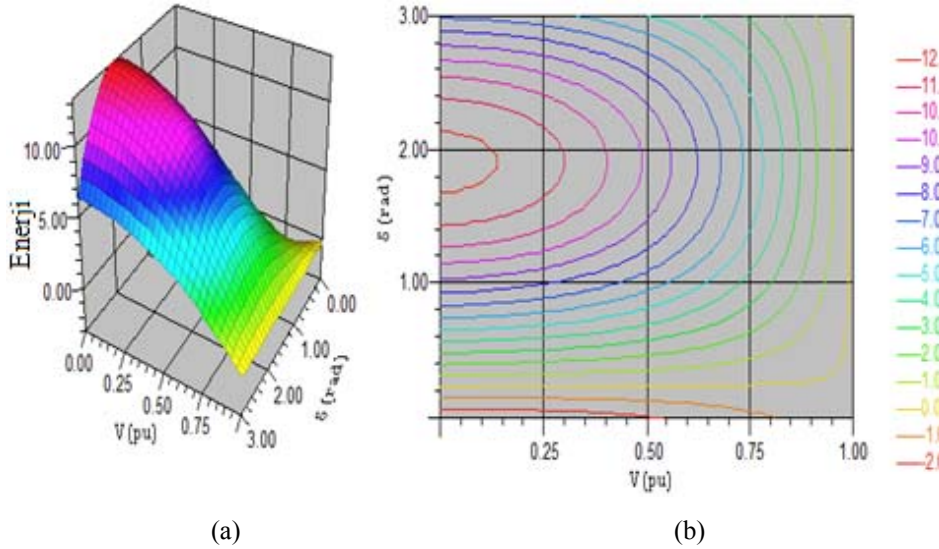
11.3 ve 13.9 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.12'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.12.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | -1,7          | -1,9       | -1,9       | -1,9       | -1,9       | -1,8       | -1,7       | -1,5       | -1,3       | -1,1       | -0,9     |  |
| <b>0,2</b> | 0,7           | 0,6        | 0,5        | 0,4        | 0,3        | 0,2        | 0,1        | 0,0        | -0,2       | -0,3       | -0,5     |  |
| <b>0,4</b> | 3,2           | 3,1        | 3,0        | 2,8        | 2,5        | 2,3        | 1,9        | 1,5        | 1,0        | 0,5        | -0,1     |  |
| <b>0,6</b> | 5,6           | 5,5        | 5,4        | 5,1        | 4,7        | 4,3        | 3,7        | 3,0        | 2,2        | 1,3        | 0,2      |  |
| <b>0,8</b> | 7,9           | 7,8        | 7,6        | 7,2        | 6,8        | 6,1        | 5,3        | 4,4        | 3,3        | 2,1        | 0,6      |  |
| <b>1</b>   | 9,9           | 9,8        | 9,6        | 9,2        | 8,6        | 7,8        | 6,8        | 5,7        | 4,3        | 2,7        | 1,0      |  |
| <b>1,2</b> | 11,5          | 11,5       | 11,2       | 10,8       | 10,1       | 9,2        | 8,1        | 6,7        | 5,2        | 3,3        | 1,3      |  |
| <b>1,4</b> | 12,8          | 12,8       | 12,5       | 12,0       | 11,3       | 10,3       | 9,1        | 7,6        | 5,8        | 3,8        | 1,6      |  |
| <b>1,6</b> | 13,6          | 13,6       | 13,3       | 12,8       | 12,0       | 11,0       | 9,7        | 8,1        | 6,3        | 4,2        | 1,8      |  |
| <b>1,8</b> | 13,9          | 13,9       | 13,7       | 13,2       | 12,4       | 11,3       | 10,0       | 8,4        | 6,5        | 4,4        | 1,9      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Tablo 5.12, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.17.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.17 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğuğunun  $0 \leq V \leq 0.4$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasında değiştiği Şekil 5.17'den ve Tablo 5.13'ten görülmektedir. Bu noktalar

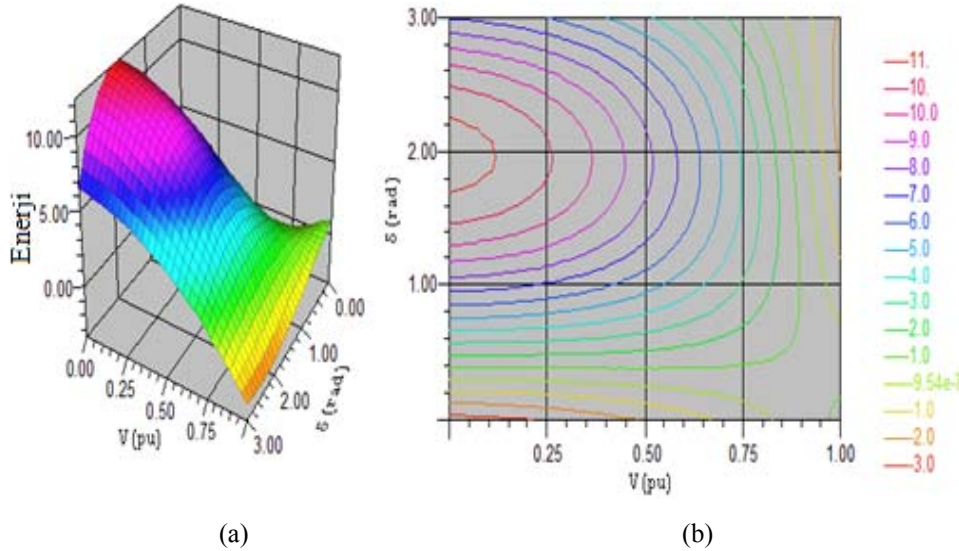
arasında enerji yoğunluğunun 9.8 ve 13.3 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.13'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.13.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0        | -2,7          | -2,7 | -2,7 | -2,6 | -2,4 | -2,1 | -1,8 | -1,5 | -1,0 | -0,6 | -0,1 |
| 0,2      | -0,4          | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,1 |
| 0,4      | 2,0           | 2,0  | 1,9  | 1,7  | 1,6  | 1,4  | 1,2  | 0,9  | 0,6  | 0,3  | -0,1 |
| 0,6      | 4,4           | 4,3  | 4,1  | 3,9  | 3,6  | 3,2  | 2,7  | 2,1  | 1,5  | 0,7  | -0,2 |
| 0,8      | 6,6           | 6,5  | 6,3  | 5,9  | 5,5  | 4,9  | 4,1  | 3,3  | 2,3  | 1,1  | -0,2 |
| 1        | 8,7           | 8,5  | 8,3  | 7,8  | 7,2  | 6,4  | 5,4  | 4,3  | 3,0  | 1,5  | -0,2 |
| 1,2      | 10,4          | 10,3 | 9,9  | 9,4  | 8,6  | 7,7  | 6,6  | 5,2  | 3,6  | 1,8  | -0,2 |
| 1,4      | 11,8          | 11,6 | 11,2 | 10,6 | 9,8  | 8,7  | 7,4  | 5,9  | 4,1  | 2,1  | -0,2 |
| 1,6      | 12,8          | 12,6 | 12,2 | 11,5 | 10,6 | 9,4  | 8,0  | 6,4  | 4,4  | 2,2  | -0,2 |
| 1,8      | 13,3          | 13,1 | 12,6 | 12,0 | 11,0 | 9,8  | 8,4  | 6,6  | 4,6  | 2,3  | -0,2 |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.13, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.18.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.18'den ve Tablo 5.14'ten görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0 \leq V \leq 0.3$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasındadır. Bu noktalar

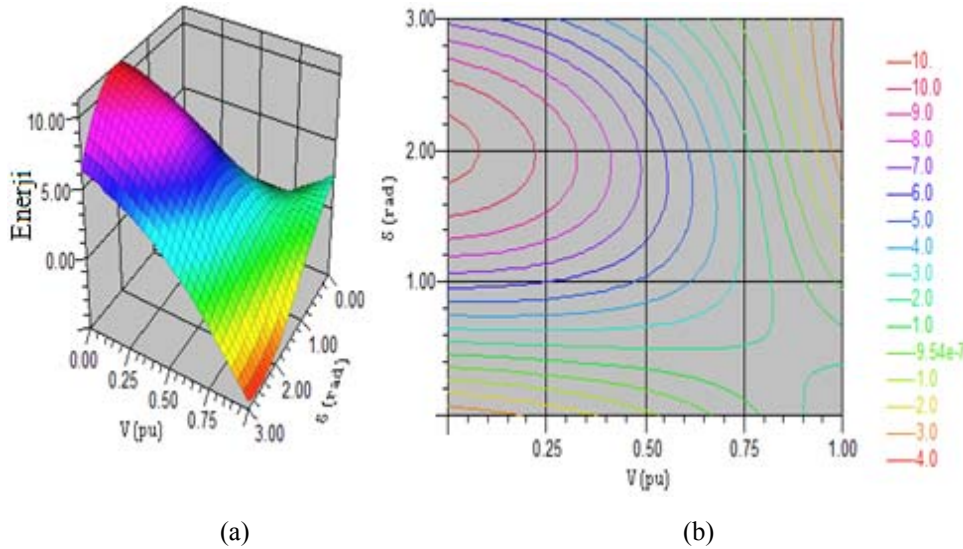
etrafında enerji yoğunluğunun 9.3 ve 12.3 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.14'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.14.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | -3,4          | -3,3       | -3,0       | -2,7       | -2,4       | -1,9       | -1,4       | -0,8       | -0,2       | 0,5        | 1,2      |
| <b>0,2</b> | -1,2          | -1,1       | -1,0       | -0,8       | -0,6       | -0,4       | -0,2       | 0,1        | 0,4        | 0,7        | 1,0      |
| <b>0,4</b> | 1,0           | 1,1        | 1,1        | 1,1        | 1,1        | 1,1        | 1,1        | 1,0        | 0,9        | 0,8        | 0,6      |
| <b>0,6</b> | 3,3           | 3,3        | 3,2        | 3,1        | 2,9        | 2,6        | 2,3        | 1,9        | 1,4        | 0,9        | 0,2      |
| <b>0,8</b> | 5,5           | 5,4        | 5,2        | 4,9        | 4,5        | 4,0        | 3,4        | 2,7        | 1,9        | 0,9        | -0,2     |
| <b>1</b>   | 7,5           | 7,3        | 7,0        | 6,6        | 6,1        | 5,3        | 4,5        | 3,5        | 2,3        | 0,9        | -0,6     |
| <b>1,2</b> | 9,2           | 9,0        | 8,6        | 8,1        | 7,4        | 6,5        | 5,4        | 4,1        | 2,6        | 0,9        | -1,0     |
| <b>1,4</b> | 10,6          | 10,4       | 9,9        | 9,3        | 8,4        | 7,3        | 6,0        | 4,5        | 2,8        | 0,8        | -1,4     |
| <b>1,6</b> | 11,7          | 11,4       | 10,9       | 10,1       | 9,1        | 7,9        | 6,5        | 4,8        | 2,9        | 0,7        | -1,7     |
| <b>1,8</b> | 12,3          | 12,0       | 11,4       | 10,6       | 9,5        | 8,3        | 6,7        | 4,9        | 2,9        | 0,6        | -2,0     |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.14, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.19.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.19 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.19'dan ve Tablo 5.15'ten, enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.3$  ve



$1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 7.6 ve 10.5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 5.15.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | -3,7          | -3,3       | -2,8       | -2,2       | -1,5       | -0,8       | 0,0        | 0,9        | 1,8        | 2,8        | 3,8      |
| <b>0,2</b> | -1,8          | -1,5       | -1,1       | -0,6       | -0,1       | 0,4        | 1,0        | 1,6        | 2,1        | 2,8        | 3,4      |
| <b>0,4</b> | 0,1           | 0,4        | 0,7        | 1,0        | 1,3        | 1,6        | 1,9        | 2,1        | 2,4        | 2,6        | 2,8      |
| <b>0,6</b> | 2,1           | 2,3        | 2,5        | 2,6        | 2,7        | 2,7        | 2,7        | 2,6        | 2,5        | 2,3        | 2,0      |
| <b>0,8</b> | 4,1           | 4,2        | 4,2        | 4,1        | 4,0        | 3,8        | 3,5        | 3,0        | 2,5        | 1,9        | 1,2      |
| <b>1</b>   | 5,9           | 5,9        | 5,8        | 5,5        | 5,2        | 4,7        | 4,1        | 3,3        | 2,4        | 1,4        | 0,3      |
| <b>1,2</b> | 7,5           | 7,4        | 7,1        | 6,7        | 6,1        | 5,4        | 4,5        | 3,5        | 2,3        | 0,9        | -0,7     |
| <b>1,4</b> | 8,8           | 8,6        | 8,2        | 7,6        | 6,9        | 5,9        | 4,8        | 3,5        | 2,0        | 0,3        | -1,7     |
| <b>1,6</b> | 9,9           | 9,5        | 9,0        | 8,3        | 7,3        | 6,2        | 4,9        | 3,3        | 1,6        | -0,4       | -2,6     |
| <b>1,8</b> | 10,5          | 10,1       | 9,4        | 8,6        | 7,5        | 6,3        | 4,8        | 3,1        | 1,1        | -1,0       | -3,4     |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.15, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

Yukarıda verilen SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine ait beş analizden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. Yani enerji seviyesi çalışma noktasının kararsızlığa yakınlığının ölçüsüdür.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve  $V=0.1$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 14.4'tür (Bkz. Tablo 5.11).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde enerji yoğunluğu 10.1'dir (Bkz. Tablo 5.15). Tek makine sonsuz bara güç sistemiyle indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi karşılaştırıldığında, sonuçlar dikkate alınarak, indirgenmiş tek makine sonsuz bara sisteminin gerilim kararlılığının daha iyi olduğu söylenebilir. Örneğin; tek makine sonsuz bara güç sistemi için  $\delta_m=0.8$  rad olduğu durumda en yüksek enerji yoğunluğu 8.9 iken, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için aynı generatör açısı için en yüksek enerji yoğunluğu 13.3'tür.

SVC'siz analizleri yapılan indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenerek tekrar enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistem modelinin durum denklemlerini gösteren 3 adet 1. dereceden diferansiyel denklem aşağıdaki gibi ifade edilir:



$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.53)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (5.54)$$

$$TK_{pv} \dot{V} = -K_{pv} V - Q_{SVC} - P_0 - P_1 + P \quad (5.55)$$

Generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_1$ ) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2} M\omega - \frac{1}{M} a(\delta_m, V) \quad (5.56)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} M\omega \quad (5.57)$$

$$\dot{V} = -c(\delta_m, V) \quad (5.58)$$

Burada  $a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)) \quad (5.59)$$

$$c(\delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{pv}} (-K_{qv} V - Q_{SVC} - P_0 - P_1 + P) \quad (5.60)$$

Şekil 5.7’de görülen sistemin indirgenmiş modeli için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (5.56), (5.57) ve (5.58) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, V) \\ M\omega \\ c(\delta_m, V) \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

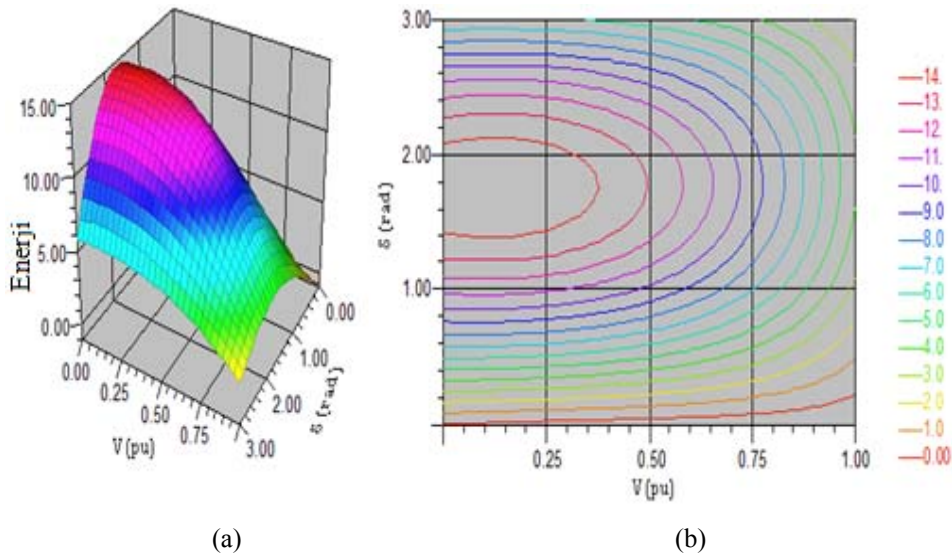
(5.53), (5.54) ve (5.55) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.61) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.  $(\omega_0, \delta_{m0}, V_0)$ ’ın bir denge noktası için, (5.61) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.61) denkleminin sağ tarafında görülen (3x1) gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece

(3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, V_0)}^{(\omega, \delta_m, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, V) \\ c(\delta_m, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.62)$$

$a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  (5.62) denkleminde yerine konulursa, SVC'li güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.4) denklemi gibi ortaya çıkar. SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir.

### 5.3.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.20.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

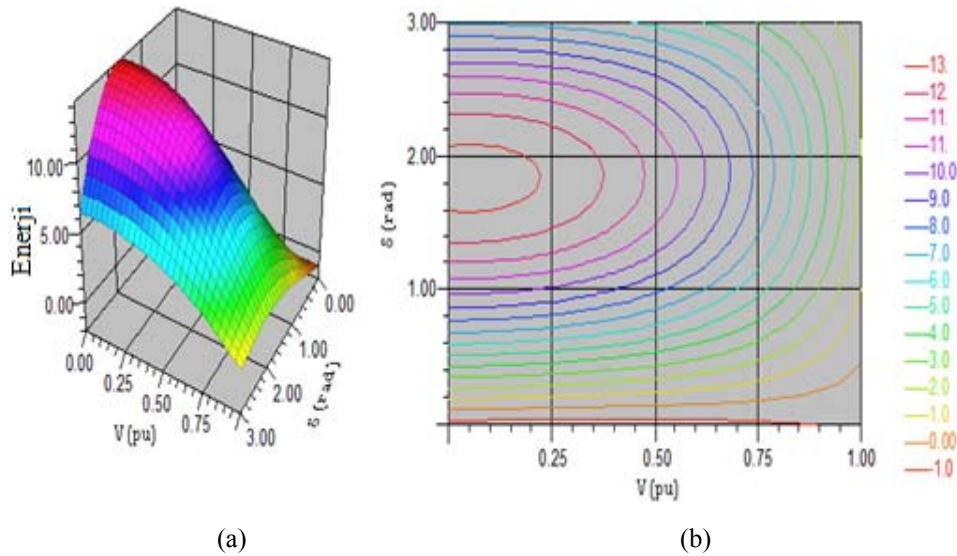
İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu ifade etmektedir. Şekil 5.20'de enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.6$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji kuvvetinin 10.3 ve 14.8 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 5.16.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 0        | -0,1          | -0,3 | -0,4 | -0,5 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,1 |
| 0,2      | 2,4           | 2,3  | 2,2  | 2,0  | 1,9  | 1,8  | 1,6  | 1,5  | 1,3  | 1,1  | 0,9 |
| 0,4      | 4,8           | 4,8  | 4,7  | 4,5  | 4,3  | 4,0  | 3,7  | 3,2  | 2,8  | 2,2  | 1,7 |
| 0,6      | 7,2           | 7,2  | 7,1  | 6,9  | 6,6  | 6,2  | 5,6  | 5,0  | 4,2  | 3,4  | 2,4 |
| 0,8      | 9,4           | 9,4  | 9,3  | 9,1  | 8,7  | 8,1  | 7,4  | 6,6  | 5,6  | 4,4  | 3,1 |
| 1        | 11,3          | 11,4 | 11,3 | 11,0 | 10,5 | 9,9  | 9,0  | 8,0  | 6,8  | 5,3  | 3,7 |
| 1,2      | 12,8          | 12,9 | 12,8 | 12,5 | 12,0 | 11,3 | 10,3 | 9,1  | 7,7  | 6,1  | 4,3 |
| 1,4      | 13,9          | 14,0 | 14,0 | 13,6 | 13,1 | 12,3 | 11,3 | 10,0 | 8,5  | 6,7  | 4,7 |
| 1,6      | 14,5          | 14,7 | 14,6 | 14,3 | 13,7 | 12,9 | 11,8 | 10,5 | 8,9  | 7,1  | 5,0 |
| 1,8      | 14,6          | 14,8 | 14,8 | 14,5 | 13,9 | 13,1 | 12,0 | 10,7 | 9,1  | 7,2  | 5,1 |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1   |

Tablo 5.16, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.21.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

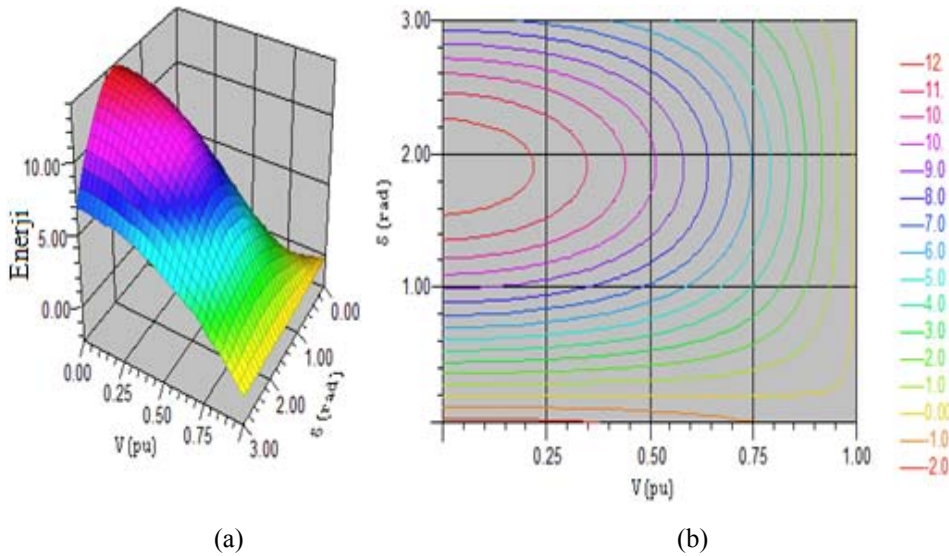
Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltılarak, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.21 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.21'den ve Tablo 5.17'den, enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.6$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 10.4 ve 14.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.17'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.17.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 0        | -1,3          | -1,4 | -1,5 | -1,5 | -1,4 | -1,3 | -1,1 | -0,9 | -0,6 | -0,3 | 0,1 |
| 0,2      | 1,2           | 1,1  | 1,1  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,1  | 1,1 |
| 0,4      | 3,6           | 3,7  | 3,6  | 3,6  | 3,5  | 3,4  | 3,2  | 3,0  | 2,7  | 2,4  | 2,1 |
| 0,6      | 6,0           | 6,1  | 6,1  | 6,1  | 5,9  | 5,6  | 5,3  | 4,8  | 4,3  | 3,7  | 3,0 |
| 0,8      | 8,3           | 8,4  | 8,5  | 8,4  | 8,1  | 7,7  | 7,2  | 6,6  | 5,8  | 4,9  | 3,8 |
| 1        | 10,3          | 10,5 | 10,5 | 10,4 | 10,1 | 9,6  | 8,9  | 8,1  | 7,1  | 5,9  | 4,6 |
| 1,2      | 11,9          | 12,2 | 12,2 | 12,1 | 11,7 | 11,1 | 10,4 | 9,4  | 8,2  | 6,8  | 5,2 |
| 1,4      | 13,2          | 13,5 | 13,5 | 13,4 | 13,0 | 12,3 | 11,4 | 10,3 | 9,0  | 7,4  | 5,6 |
| 1,6      | 14,0          | 14,3 | 14,4 | 14,2 | 13,7 | 13,0 | 12,1 | 10,9 | 9,5  | 7,8  | 5,8 |
| 1,8      | 14,4          | 14,7 | 14,7 | 14,5 | 14,0 | 13,3 | 12,4 | 11,1 | 9,6  | 7,9  | 5,9 |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1   |

Tablo 5.17, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.22.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

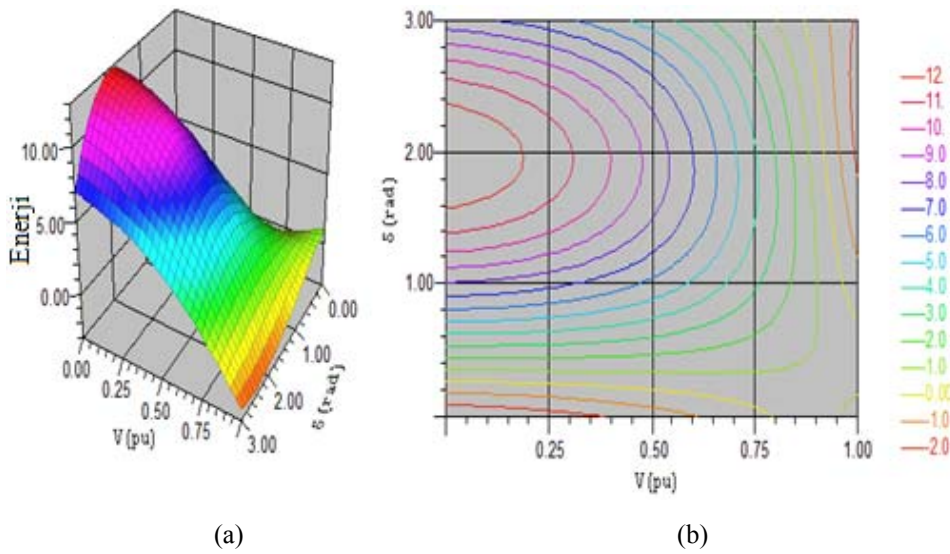
Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.22 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.4$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasında değiştiği Şekil 5.22'den ve Tablo 5.18'den görülmektedir. Bu noktalar arasında enerji yoğunluğunun 10.3 ve 13.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.18'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.18.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |  |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|--|
| 0        | -2,3          | -2,3 | -2,2 | -2,1 | -1,9 | -1,6 | -1,3 | -0,8 | -0,3 | 0,2 | 0,9 |  |
| 0,2      | 0,0           | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,1  | 0,1  | 0,2  | 0,4  | 0,5  | 0,7 | 0,9 |  |
| 0,4      | 2,5           | 2,4  | 2,3  | 2,2  | 2,1  | 1,9  | 1,8  | 1,6  | 1,4  | 1,1 | 0,9 |  |
| 0,6      | 4,8           | 4,7  | 4,6  | 4,4  | 4,1  | 3,7  | 3,3  | 2,8  | 2,2  | 1,6 | 0,8 |  |
| 0,8      | 7,1           | 7,0  | 6,7  | 6,4  | 5,9  | 5,4  | 4,7  | 3,9  | 3,0  | 2,0 | 0,8 |  |
| 1        | 9,1           | 9,0  | 8,7  | 8,2  | 7,7  | 6,9  | 6,0  | 4,9  | 3,7  | 2,4 | 0,8 |  |
| 1,2      | 10,9          | 10,7 | 10,4 | 9,8  | 9,1  | 8,2  | 7,1  | 5,8  | 4,3  | 2,7 | 0,8 |  |
| 1,4      | 12,2          | 12,1 | 11,7 | 11,1 | 10,3 | 9,2  | 8,0  | 6,5  | 4,8  | 2,9 | 0,8 |  |
| 1,6      | 13,2          | 13,0 | 12,6 | 11,9 | 11,1 | 9,9  | 8,6  | 7,0  | 5,2  | 3,1 | 0,8 |  |
| 1,8      | 13,7          | 13,5 | 13,1 | 12,4 | 11,5 | 10,3 | 8,9  | 7,2  | 5,3  | 3,2 | 0,8 |  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9 | 1   |  |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.18, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.23.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

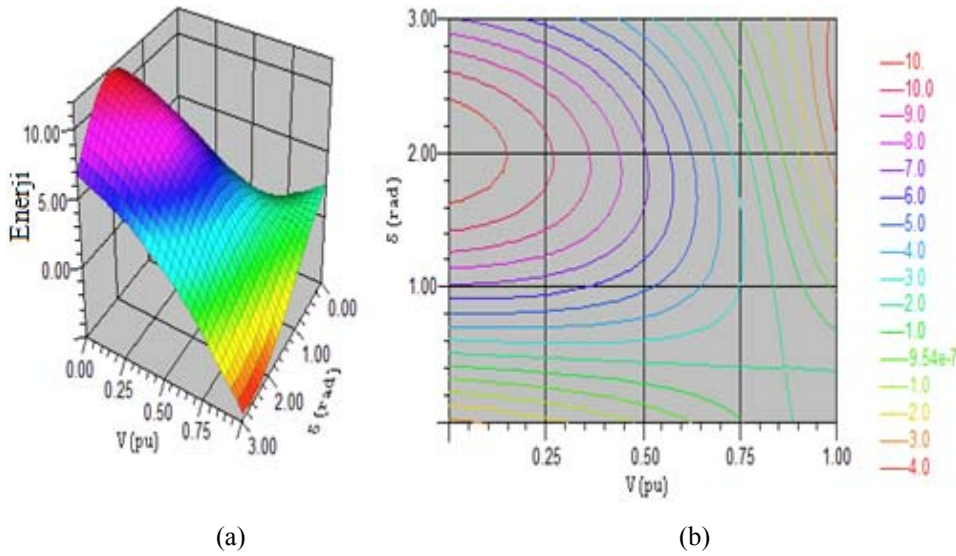
Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.23'ten ve Tablo 5.19'dan görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0 \leq V \leq 0.4$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 8.9 ve 12.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.19'dan belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.19.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |  |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|--|
| 0        | -3,0          | -2,8 | -2,6 | -2,3 | -1,9 | -1,4 | -0,8 | -0,2 | 0,5 | 1,3 | 2,2  |  |
| 0,2      | -0,8          | -0,7 | -0,6 | -0,4 | -0,2 | 0,1  | 0,4  | 0,7  | 1,1 | 1,5 | 2,0  |  |
| 0,4      | 1,5           | 1,5  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6 | 1,6 | 1,6  |  |
| 0,6      | 3,7           | 3,7  | 3,6  | 3,5  | 3,3  | 3,1  | 2,8  | 2,5  | 2,1 | 1,7 | 1,2  |  |
| 0,8      | 5,9           | 5,8  | 5,6  | 5,4  | 5,0  | 4,6  | 4,0  | 3,4  | 2,6 | 1,8 | 0,8  |  |
| 1        | 7,9           | 7,8  | 7,5  | 7,1  | 6,5  | 5,8  | 5,0  | 4,1  | 3,0 | 1,8 | 0,4  |  |
| 1,2      | 9,6           | 9,4  | 9,1  | 8,5  | 7,8  | 7,0  | 5,9  | 4,7  | 3,3 | 1,8 | 0,0  |  |
| 1,4      | 11,1          | 10,8 | 10,4 | 9,7  | 8,9  | 7,8  | 6,6  | 5,2  | 3,5 | 1,7 | -0,4 |  |
| 1,6      | 12,1          | 11,8 | 11,3 | 10,6 | 9,6  | 8,4  | 7,1  | 5,4  | 3,6 | 1,6 | -0,7 |  |
| 1,8      | 12,7          | 12,4 | 11,8 | 11,0 | 10,0 | 8,8  | 7,3  | 5,6  | 3,6 | 1,4 | -1,0 |  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8 | 0,9 | 1    |  |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.19, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

### 5.3.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.24.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde SVC'li indirgenmiş sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. Şekil 5.24 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.24'ten ve Tablo 5.20'den, enerji yoğunluğunun  $0 \leq V \leq 0.3$  ve  $1.6 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 9.3 ve 11.5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 5.20.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | -3,3          | -3,0       | -2,5       | -2,0       | -1,4       | -0,7       | 0,0        | 0,9        | 1,8        | 2,8        | 3,9      |
| <b>0,2</b> | -1,3          | -1,0       | -0,7       | -0,3       | 0,1        | 0,5        | 1,0        | 1,6        | 2,2        | 2,8        | 3,5      |
| <b>0,4</b> | 0,8           | 1,0        | 1,2        | 1,4        | 1,6        | 1,8        | 2,0        | 2,3        | 2,5        | 2,7        | 3,0      |
| <b>0,6</b> | 2,9           | 3,0        | 3,1        | 3,1        | 3,1        | 3,1        | 3,0        | 2,9        | 2,7        | 2,5        | 2,3      |
| <b>0,8</b> | 4,9           | 4,9        | 4,9        | 4,7        | 4,5        | 4,2        | 3,9        | 3,4        | 2,9        | 2,3        | 1,6      |
| <b>1</b>   | 6,8           | 6,7        | 6,5        | 6,2        | 5,8        | 5,3        | 4,6        | 3,8        | 3,0        | 1,9        | 0,8      |
| <b>1,2</b> | 8,5           | 8,3        | 8,0        | 7,5        | 6,9        | 6,1        | 5,2        | 4,1        | 2,9        | 1,5        | 0,0      |
| <b>1,4</b> | 9,8           | 9,6        | 9,1        | 8,5        | 7,7        | 6,8        | 5,6        | 4,3        | 2,8        | 1,1        | -0,8     |
| <b>1,6</b> | 10,9          | 10,5       | 10,0       | 9,3        | 8,3        | 7,2        | 5,9        | 4,3        | 2,6        | 0,7        | -1,5     |
| <b>1,8</b> | 11,5          | 11,1       | 10,5       | 9,7        | 8,6        | 7,4        | 5,9        | 4,2        | 2,3        | 0,2        | -2,1     |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.20, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

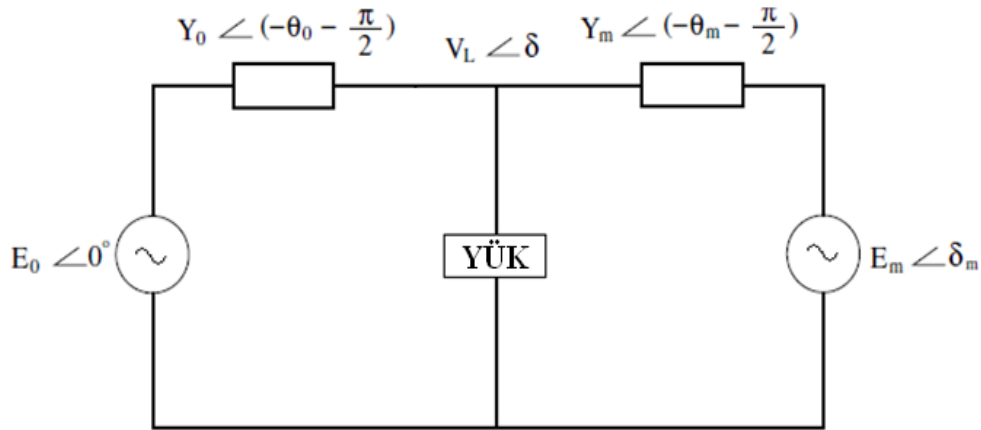
SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizinde  $\delta_m=0$  rad durumunda elde edilen maksimum enerji seviyesi 14.4 enerji birimidir. Bununla birlikte, eğer yük yüksek gerilimde kullanılsaydı (örneğin V=1 pu) o zaman sistemin kararlılığını koruyabilmesi için sistemin mümkün olan maksimum enerjiye sahip olmasına imkan veren yük açısı  $\delta=1.8$  rad olacaktır. Bu noktada okunan enerji 4.1 enerji birimidir (Bkz. Tablo 5.11). SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine ait analizlerden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü görülmüştür. Bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareket ettiğini göstermektedir. Yani enerji seviyesi çalışma noktasının kararsızlığa yakınlığının ölçüsüdür.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve V=0.1 pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 14.4'tür (Bkz. Tablo 5.11). Aynı değerlerde  $\delta_m=0.4$  rad için 13.9 (Bkz. Tablo 5.12),  $\delta_m=0.8$  rad için 13.1 (Bkz. Tablo 5.13),  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde 12 (Bkz. Tablo 5.14) ve  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 10.1'dir. (Bkz. Tablo 5.15).

SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve V=0.1 pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 14.4'tür (Bkz. Tablo 5.11). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 14.8'dir (Bkz. Tablo 5.16). SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.4$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve V=0.1 pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 13.9'dur (Bkz. Tablo 5.12). SVC'li durumda ise yine aynı



değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 14.7'dir (Bkz. Tablo 5.17). SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.8$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve  $V=0$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 13.3'tür (Bkz. Tablo 5.13). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 13.7'dir (Bkz. Tablo 5.18). SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.2$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve  $V=0$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 12.3'tür (Bkz. Tablo 5.14). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 12.7'dir (Bkz. Tablo 5.19). SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.6$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.8$  rad ve  $V=0$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 10.5'tir (Bkz. Tablo 5.15). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 11.5'tir (Bkz. Tablo 5.20). Sonuçlara bakıldığında SVC'nin, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için yapılan analizlerde tüm generatör açıları için sistemi kararsızlık noktasından uzaklaştırdığı görülmektedir.

#### 5.4. SVC'siz ve SVC'li Değiştirilmiş Tek Makine Sonsuz Bara Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi



Şekil 5.25. Değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi

Şekil 5.25'te, Şekil 5.1'de verilen tek makine sonsuz bara güç sisteminin boyutu kapasite kaldırılarak değiştirilmiştir. Yeni durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [31].



$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.63)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m - E_m V Y_m \sin(\delta_m - \delta) \quad (5.64)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv} V - K_{qv2} V^2 + Q - Q_0 - Q_1 \quad (5.65)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P) \quad (5.66)$$

Generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_l$ ) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2} M\omega - \frac{1}{M} a(\delta, \delta_m, V) \quad (5.67)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} M\omega \quad (5.68)$$

$$\dot{\delta} = -b(\delta, \delta_m, V) \quad (5.69)$$

$$\dot{V} = -c(\delta, \delta_m, V) \quad (5.70)$$

Burada  $a(\delta, \delta_m, V)$ ,  $b(\delta, \delta_m, V)$  ve  $c(\delta, \delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta_m - \delta)) \quad (5.71)$$

$$b(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q - Q_0 - Q_1) \quad (5.72)$$

$$c(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{qw} K_{pv}} (K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P)) \quad (5.73)$$

Şekil 5.25'te verilen güç sistemi için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (5.67), (5.68), (5.69) ve (5.70) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

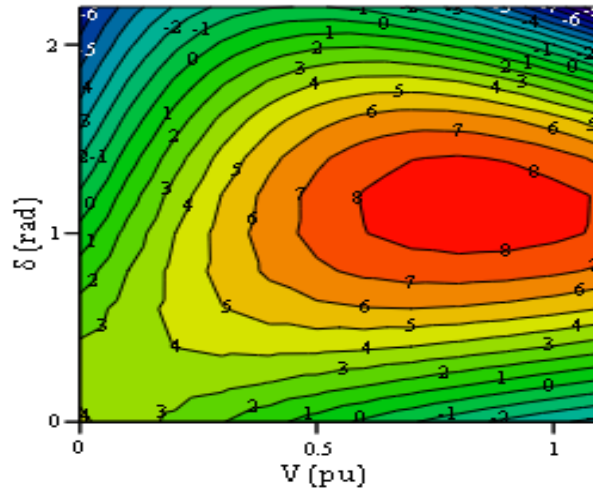
$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, \delta, V) \\ M\omega \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix} \quad (5.74)$$

(5.63), (5.64), (5.65) ve (5.66) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.74) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.  $(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.74) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.74) denkleminin sağ tarafında görülen  $(4 \times 1)$  gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, \delta, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(\omega, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, \delta, V) \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.75)$$

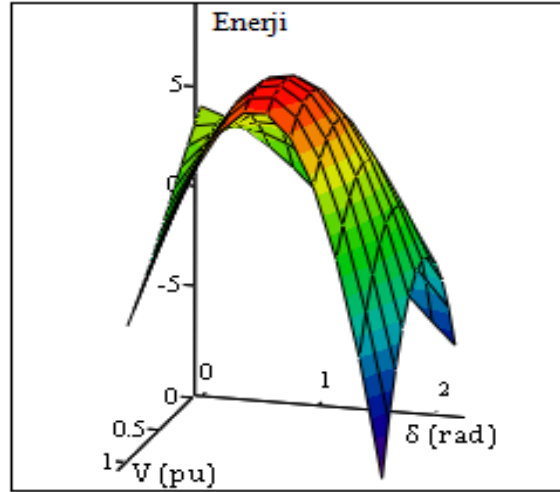
$a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.75) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.5) denklemi gibi ortaya çıkar. Tek makine sonsuz bara sisteminde kullanılan  $(\delta_m^*, w^*, \delta^*, V^*) = (0.7855, 0.0, 0.2, 1)$  denge noktası, SVC'li ve SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara sisteminin analizi için de denge noktası olarak seçilmiştir. SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara modeli için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ( $\delta_m$ ) ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir.

#### 5.4.1. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



(a)

Şekil 5.26.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.26. (Devamı)

Şekil 5.26'dan ve Tablo 5.21'den görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1.2 \leq \delta \leq 1.6$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 5.9 ve 8.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.21'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

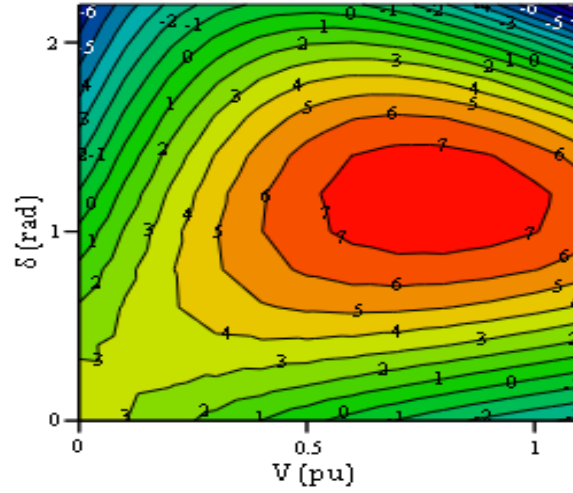
Tablo 5.21.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 4,2           | 3,8        | 3,2        | 2,4        | 1,4        | 0,4        | -0,8       | -2,0       | -3,3       | -4,5       | 3,5      |  |
| <b>0,2</b> | 3,7           | 3,7        | 3,4        | 3,0        | 2,3        | 1,5        | 0,5        | -0,7       | -2,0       | 2,8        | 3,5      |  |
| <b>0,4</b> | 4,0           | 4,3        | 4,3        | 4,0        | 3,4        | 2,6        | 1,5        | 0,2        | 2,0        | 3,3        | 4,2      |  |
| <b>0,6</b> | 5,0           | 5,3        | 5,4        | 5,0        | 4,3        | 3,3        | 1,9        | 1,3        | 2,9        | 4,3        | 5,4      |  |
| <b>0,8</b> | 6,2           | 6,5        | 6,3        | 5,7        | 4,6        | 3,1        | 0,5        | 2,5        | 4,3        | 5,8        | 6,8      |  |
| <b>1</b>   | 7,3           | 7,3        | 6,8        | 5,6        | 3,9        | -0,2       | 2,1        | 4,2        | 5,9        | 7,2        | 7,9      |  |
| <b>1,2</b> | 8,1           | 7,5        | 6,3        | 4,4        | -1,0       | 1,6        | 4,0        | 5,9        | 7,4        | 8,3        | 8,5      |  |
| <b>1,4</b> | 7,9           | 6,5        | 4,4        | -1,7       | 1,1        | 3,7        | 5,8        | 7,5        | 8,5        | 8,7        | 8,0      |  |
| <b>1,6</b> | 6,5           | 4,0        | -2,3       | 0,6        | 3,3        | 5,6        | 7,4        | 8,4        | 8,6        | 7,8        | 6,1      |  |
| <b>1,8</b> | 3,3           | -3,0       | 0,0        | 2,8        | 5,3        | 7,1        | 8,1        | 8,3        | 7,3        | 5,3        | 2,1      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

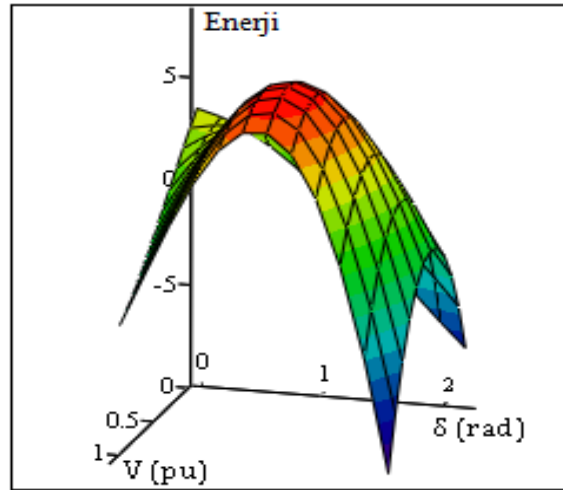
Tablo 5.21, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

#### 5.4.2. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.27.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.27 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.27'den ve Tablo 5.22'den, enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 7.5 ve 8.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.22'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda sistem alçak gerilimlerde ve büyük açılarda çalışabildiği halde,  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde sistem aynı durumlarda çökmeye gitmektedir.

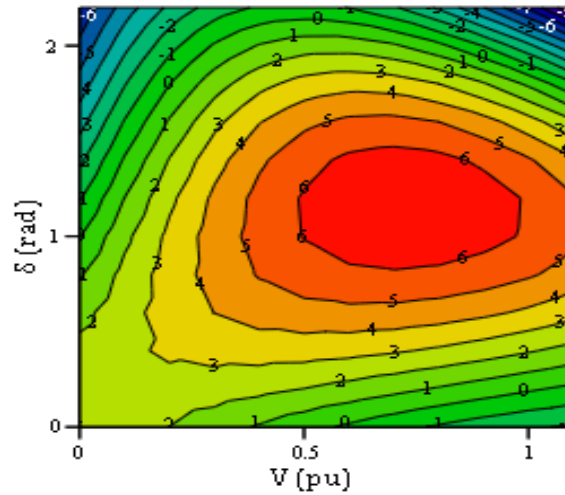
Tablo 5.22.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 0        | 4,2           | 3,5  | 2,8 | 2,0 | 1,3 | 0,6 | -0,2 | -0,9 | -1,6 | -2,2 | -2,8 |
| 0,2      | 3,8           | 3,7  | 3,5 | 3,3 | 2,9 | 2,6 | 2,1  | 1,7  | 1,2  | 0,7  | 0,2  |
| 0,4      | 3,2           | 3,7  | 4,0 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,2  | 4,0  | 3,7  | 3,4  | 3,0  |
| 0,6      | 2,4           | 3,4  | 4,3 | 5,0 | 5,5 | 5,8 | 6,0  | 6,0  | 5,9  | 5,7  | 5,4  |
| 0,8      | 1,4           | 3,0  | 4,3 | 5,3 | 6,2 | 6,8 | 7,2  | 7,5  | 7,6  | 7,5  | 7,2  |
| 1        | 0,4           | 2,3  | 4,0 | 5,4 | 6,5 | 7,4 | 8,0  | 8,4  | 8,5  | 8,5  | 8,3  |
| 1,2      | -0,8          | 1,5  | 3,4 | 5,0 | 6,3 | 7,4 | 8,1  | 8,5  | 8,7  | 8,7  | 8,4  |
| 1,4      | -2,0          | 0,5  | 2,6 | 4,3 | 5,7 | 6,8 | 7,5  | 8,0  | 8,1  | 7,9  | 7,5  |
| 1,6      | -3,3          | -0,7 | 1,5 | 3,3 | 4,6 | 5,7 | 6,3  | 6,6  | 6,5  | 6,2  | 5,5  |
| 1,8      | -4,5          | -1,9 | 0,2 | 1,9 | 3,1 | 4,0 | 4,4  | 4,4  | 4,1  | 3,4  | 2,3  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |

Tablo 5.22, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

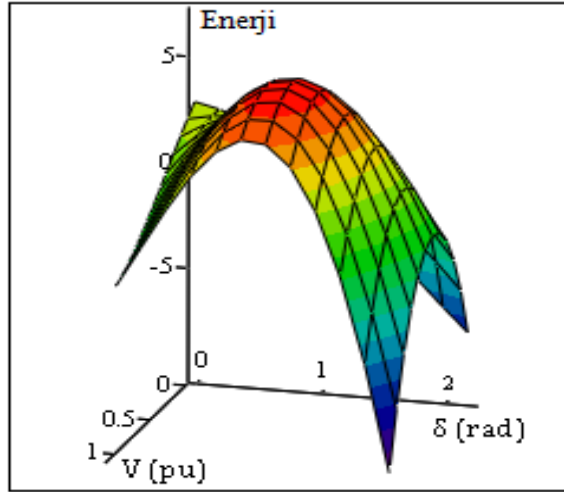
### 5.4.3. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.28.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.28. (Devamı)

Şekil 5.28 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğunun  $0.5 \leq V \leq 0.9$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında değiştiği Şekil 5.28'den ve Tablo 5.23'ten görülmektedir. Bu noktalar arasında enerji yoğunluğunun 5.7 ve 6.8 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.23'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.23.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

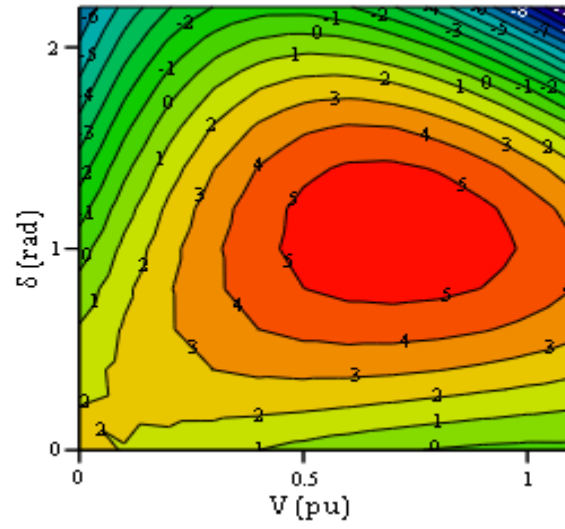
| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 3,0           | 2,5        | 2,0        | 1,4        | 0,9        | 0,3        | -0,2       | -0,7       | -1,2       | -1,6       | -2,0     |
| <b>0,2</b> | 2,7           | 2,8        | 2,7        | 2,5        | 2,3        | 2,0        | 1,6        | 1,2        | 0,8        | 0,4        | 0,0      |
| <b>0,4</b> | 2,3           | 2,8        | 3,2        | 3,4        | 3,5        | 3,4        | 3,3        | 3,1        | 2,8        | 2,4        | 2,0      |
| <b>0,6</b> | 1,7           | 2,7        | 3,4        | 4,0        | 4,4        | 4,6        | 4,7        | 4,7        | 4,4        | 4,1        | 3,7      |
| <b>0,8</b> | 0,9           | 2,3        | 3,5        | 4,4        | 5,1        | 5,5        | 5,8        | 5,9        | 5,7        | 5,4        | 5,0      |
| <b>1</b>   | 0,0           | 1,8        | 3,2        | 4,4        | 5,4        | 6,0        | 6,4        | 6,6        | 6,5        | 6,2        | 5,7      |
| <b>1,2</b> | -1,1          | 1,0        | 2,8        | 4,2        | 5,3        | 6,1        | 6,6        | 6,8        | 6,7        | 6,4        | 5,8      |
| <b>1,4</b> | -2,2          | 0,1        | 2,1        | 3,6        | 4,8        | 5,7        | 6,2        | 6,3        | 6,2        | 5,7        | 5,0      |
| <b>1,6</b> | -3,4          | -0,9       | 1,1        | 2,7        | 3,9        | 4,8        | 5,2        | 5,2        | 4,9        | 4,3        | 3,3      |
| <b>1,8</b> | -4,6          | -2,1       | 0,0        | 1,5        | 2,7        | 3,4        | 3,6        | 3,5        | 2,9        | 2,0        | 0,7      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.23, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

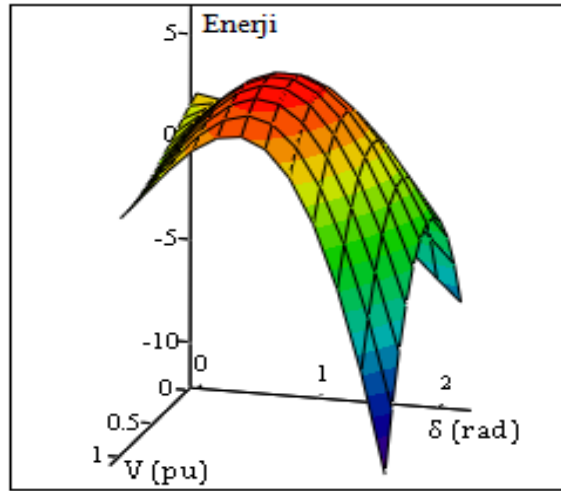
#### 5.4.4. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.

Şekil 5.29'dan ve Tablo 5.24'ten görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.5 \leq V \leq 0.9$  ve  $0.8 \leq \delta \leq 1.4$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 4.4 ve 5.8 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.29.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.29 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.24'ten belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

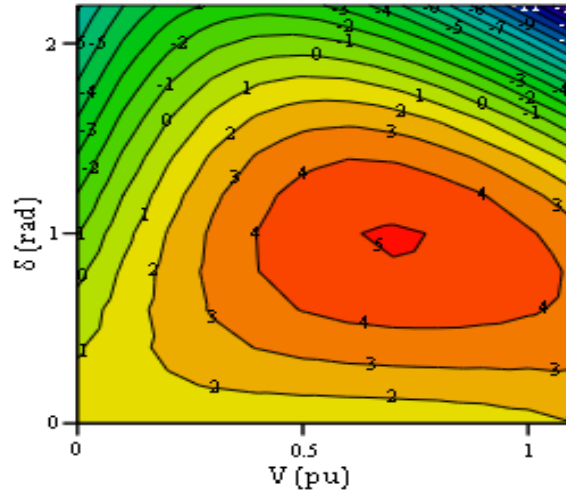
Tablo 5.24.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 2,3           | 2,0        | 1,6        | 1,3        | 1,0        | 0,7        | 0,4        | 0,1        | -0,1       | -0,2       | -0,3     |
| <b>0,2</b> | 2,0           | 2,2        | 2,3        | 2,3        | 2,2        | 2,1        | 1,9        | 1,7        | 1,5        | 1,3        | 1,2      |
| <b>0,4</b> | 1,6           | 2,2        | 2,7        | 3,0        | 3,2        | 3,3        | 3,3        | 3,2        | 3,0        | 2,8        | 2,6      |
| <b>0,6</b> | 1,1           | 2,1        | 2,9        | 3,5        | 4,0        | 4,3        | 4,4        | 4,4        | 4,3        | 4,1        | 3,7      |
| <b>0,8</b> | 0,4           | 1,8        | 2,9        | 3,8        | 4,5        | 5,0        | 5,3        | 5,3        | 5,2        | 5,0        | 4,6      |
| <b>1</b>   | -0,5          | 1,3        | 2,7        | 3,8        | 4,7        | 5,3        | 5,7        | 5,8        | 5,7        | 5,4        | 4,9      |
| <b>1,2</b> | -1,4          | 0,6        | 2,2        | 3,6        | 4,6        | 5,3        | 5,7        | 5,8        | 5,6        | 5,2        | 4,5      |
| <b>1,4</b> | -2,5          | -0,3       | 1,5        | 3,0        | 4,0        | 4,8        | 5,1        | 5,2        | 4,9        | 4,4        | 3,5      |
| <b>1,6</b> | -3,6          | -1,3       | 0,6        | 2,1        | 3,2        | 3,8        | 4,1        | 4,0        | 3,6        | 2,8        | 1,7      |
| <b>1,8</b> | -4,7          | -2,3       | -0,5       | 1,0        | 1,9        | 2,5        | 2,6        | 2,3        | 1,6        | 0,5        | -1,0     |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.24, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

#### 5.4.5. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

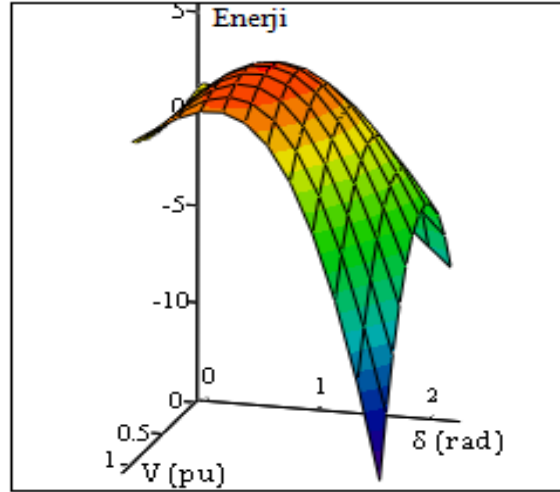
Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.30.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim





(b)

Şekil 5.30. (Devamı)

Şekil 5.30 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.30'dan ve Tablo 5.25'ten, enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 0.8$  ve  $0.8 \leq \delta \leq 1.2$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 4.4 ve 5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

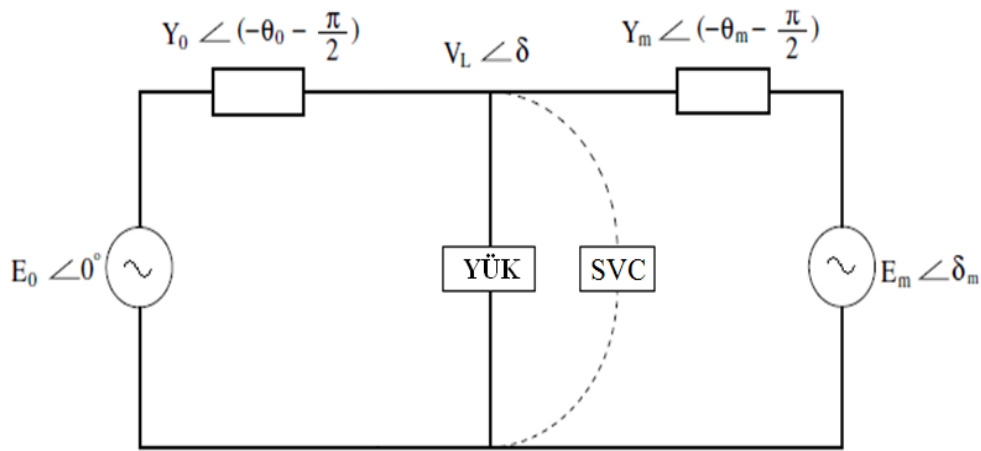
SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için yukarıda verilen beş analizden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.7'dir (Bkz. Tablo 5.21).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde enerji yoğunluğu 2.7'dir (Bkz. Tablo 5.25).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunu gösteren tablo aşağıdadır:

Tablo 5.25.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 1,5           | 1,4        | 1,3        | 1,3        | 1,2        | 1,1        | 1,1        | 1,1        | 1,2        | 1,3        | 1,5      |
| <b>0,2</b> | 1,3           | 1,6        | 1,9        | 2,1        | 2,2        | 2,3        | 2,3        | 2,4        | 2,4        | 2,4        | 2,5      |
| <b>0,4</b> | 0,9           | 1,6        | 2,2        | 2,7        | 3,0        | 3,3        | 3,4        | 3,5        | 3,5        | 3,4        | 3,3      |
| <b>0,6</b> | 0,4           | 1,5        | 2,4        | 3,1        | 3,6        | 4,0        | 4,3        | 4,4        | 4,3        | 4,2        | 4,0      |
| <b>0,8</b> | -0,3          | 1,2        | 2,3        | 3,3        | 4,0        | 4,5        | 4,8        | 4,9        | 4,8        | 4,6        | 4,2      |
| <b>1</b>   | -1,0          | 0,6        | 2,1        | 3,2        | 4,0        | 4,6        | 4,9        | 5,0        | 4,9        | 4,5        | 4,0      |
| <b>1,2</b> | -1,9          | 0,0        | 1,6        | 2,8        | 3,7        | 4,3        | 4,7        | 4,7        | 4,4        | 3,9        | 3,2      |
| <b>1,4</b> | -2,9          | -0,8       | 0,9        | 2,2        | 3,1        | 3,7        | 3,9        | 3,8        | 3,4        | 2,7        | 1,7      |
| <b>1,6</b> | -3,9          | -1,8       | 0,0        | 1,3        | 2,2        | 2,6        | 2,7        | 2,5        | 1,8        | 0,8        | -0,5     |
| <b>1,8</b> | -5,0          | -2,8       | -1,1       | 0,1        | 0,9        | 1,2        | 1,1        | 0,6        | -0,4       | -1,7       | -3,4     |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.25, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

SVC'siz analizleri yapılan değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenerek tekrar enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. Yük tarafına bir SVC cihazı bağlanmasıyla sistemin gerilim kararlılığı sınırlarının artırılması hedeflenmiştir. Şekil 5.31'de SVC bağlı değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.31. SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi

SVC tarafından karşılanan reaktif gücün dinamik güç sistemi modeline eklenmesi yük durum denklemlerindeki yük açısı ve yük gerilimi denklemlerine  $Q_{SVC}$  reaktif güç ilavesi yapılmasıyla tamamlanır. SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistem modelinin durum denklemlerini gösteren 4 adet 1. dereceden diferansiyel denklem aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{\delta}_m = \omega \quad (5.76)$$

$$M\dot{\omega} = -D\omega + P_m - E_m V Y_m \sin(\delta_m - \delta) \quad (5.77)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv} V - K_{qv2} V^2 + Q - Q_0 + Q_{SVC} - Q_1 \quad (5.78)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 - Q_{SVC} + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P) \quad (5.79)$$

(5.76), (5.77), (5.78) ve (5.79) ile verilen diferansiyel denklemler generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_l$ ) koşulu altında tekrar yazılabilir:

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M^2}M\omega - \frac{1}{M}a(\delta, \delta_m, V) \quad (5.80)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M}M\omega \quad (5.81)$$

$$\dot{\delta} = -b(\delta, \delta_m, V) \quad (5.82)$$

$$\dot{V} = -c(\delta, \delta_m, V) \quad (5.83)$$

Burada  $a(\delta, \delta_m, V)$ ,  $b(\delta, \delta_m, V)$  ve  $c(\delta, \delta_m, V)$  aşağıdaki şekildedir:

$$a(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta_m - \delta)) \quad (5.84)$$

$$b(\delta, \delta_m, V) = \frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q + Q_{SVC} - Q_0 - Q_l) \quad (5.85)$$

$$c(\delta, \delta_m, V) = \frac{1}{TK_{qw}K_{pv}} (K_{pw}K_{qv2} V^2 + (K_{pw}K_{qv} - K_{qw}K_{pv})V + K_{pw}(Q_0 + Q_l - Q - Q_{SVC}) - K_{qw}(P_0 + P_l - P)) \quad (5.86)$$

Şekil 5.31'de görülen güç sistemi için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (5.80), (5.81), (5.82) ve (5.83) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_m, \delta, V) \\ M\omega \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix} \quad (5.87)$$

(5.76), (5.77), (5.78) ve (5.79) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.87) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

$(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.87) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.87) denkleminin sağ tarafında görülen (4x1) gradyent

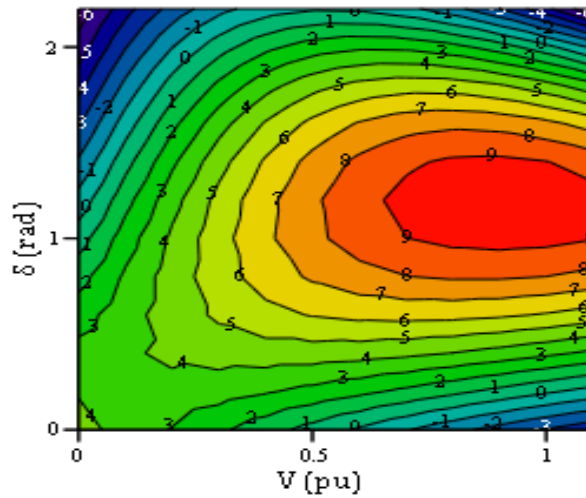
matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(\omega, \delta_m, \delta, V) = \int_{(\omega_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(\omega, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} M\omega \\ a(\delta_m, \delta, V) \\ b(\delta_m, \delta, V) \\ c(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\omega \\ d\delta_m \\ d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (5.88)$$

$a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.88) denkleminde yerine konulursa, SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.6) denklemi gibi ortaya çıkar. SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir. Analizlerde generatör açısı 0 radyandan başlayıp 0.4 adımla 1.6 radyana kadar arttırılacaktır. Bu analizlerle SVC'nin değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin gerilim kararlılığına etkileri incelenecektir.

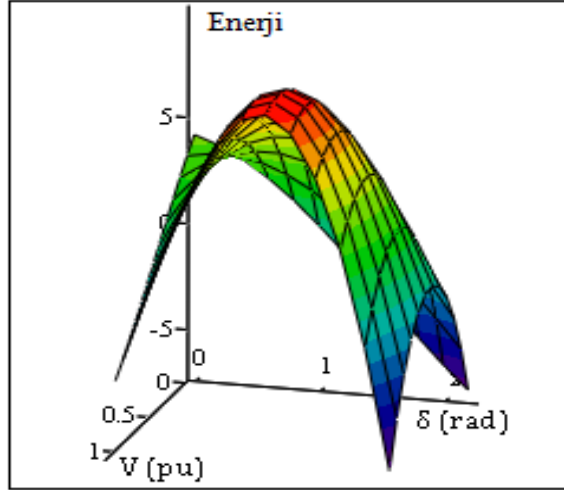
#### 5.4.6. $\delta_m=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu göstermektedir.



(a)

Şekil 5.32.  $\delta_m=0$  rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.32. (Devamı)

Şekil 5.32 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.32'den ve Tablo 5.26'dan, enerji yoğunluğunun  $0.7 \leq V \leq 0.9$  ve  $1.4 \leq \delta \leq 1.8$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 7.3 ve 9.8 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.26'dan belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.26.  $\delta_m=0$  rad durumu için enerji ölçümü

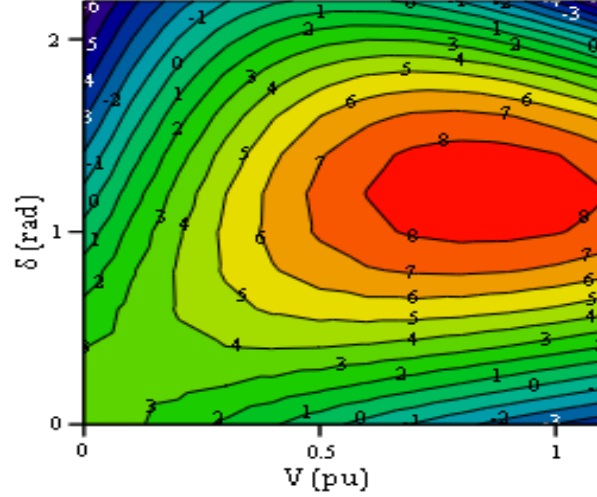
| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 4,3           | 3,9        | 3,3        | 2,6        | 1,6        | 0,5        | -0,6       | -1,9       | -3,1       | -4,4       | 3,7      |  |
| <b>0,2</b> | 3,9           | 3,8        | 3,6        | 3,2        | 2,5        | 1,7        | 0,6        | -0,5       | -1,8       | 2,9        | 3,7      |  |
| <b>0,4</b> | 4,2           | 4,5        | 4,5        | 4,2        | 3,6        | 2,8        | 1,7        | 0,4        | 2,2        | 3,4        | 4,4      |  |
| <b>0,6</b> | 5,2           | 5,6        | 5,6        | 5,3        | 4,6        | 3,6        | 2,2        | 1,4        | 3,1        | 4,6        | 5,7      |  |
| <b>0,8</b> | 6,5           | 6,8        | 6,7        | 6,1        | 5,1        | 3,6        | 0,6        | 2,7        | 4,6        | 6,1        | 7,2      |  |
| <b>1</b>   | 7,8           | 7,8        | 7,3        | 6,3        | 4,6        | -0,1       | 2,3        | 4,5        | 6,3        | 7,7        | 8,5      |  |
| <b>1,2</b> | 8,7           | 8,2        | 7,1        | 5,3        | -0,9       | 1,8        | 4,3        | 6,4        | 8,0        | 9,0        | 9,3      |  |
| <b>1,4</b> | 8,8           | 7,6        | 5,6        | -1,7       | 1,3        | 4,0        | 6,3        | 8,1        | 9,3        | 9,7        | 9,2      |  |
| <b>1,6</b> | 7,8           | 5,5        | -2,4       | 0,7        | 3,7        | 6,2        | 8,2        | 9,4        | 9,8        | 9,2        | 7,7      |  |
| <b>1,8</b> | 5,1           | -3,0       | 0,2        | 3,3        | 5,9        | 8,0        | 9,3        | 9,7        | 9,1        | 7,3        | 4,4      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Tablo 5.26, generatör rotor açısı  $\delta_m=0$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

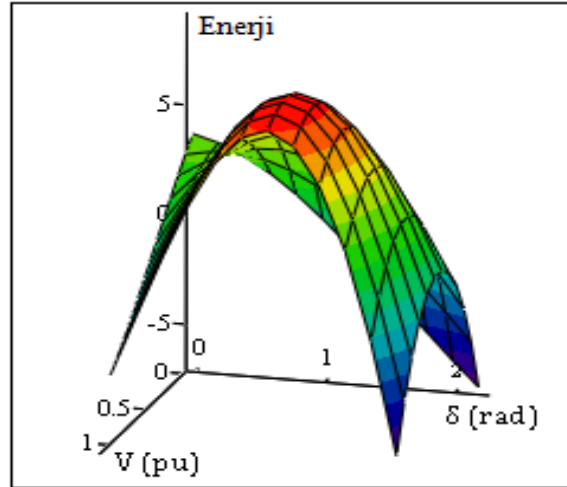
SVC'siz değiştirilmiş güç sisteminde  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.7'dir (Bkz. Tablo 5.21). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde enerji yoğunluğu 9.7'dir (Bkz. Tablo 5.26). Böylece, SVC'nin sisteme etkisinin ne kadar önemli olduğu açıkça görülmektedir.

### 5.4.7. $\delta_m=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0 radyandan 0.4 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)



(b)

Şekil 5.33.  $\delta_m=0.4$  rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.33'ten ve Tablo 5.27'den, enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 7.7 ve 8.8 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. SVC'li güç sistem analizlerinin iki sonucu ortaya çıkmaktadır. Birincisi enerji ölçümünün, çalışma noktasının kararsızlık bölgesine yakınlığını gösterdiği, ikincisi ise SVC'nin sistemin kararlılığına etkisidir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.27'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

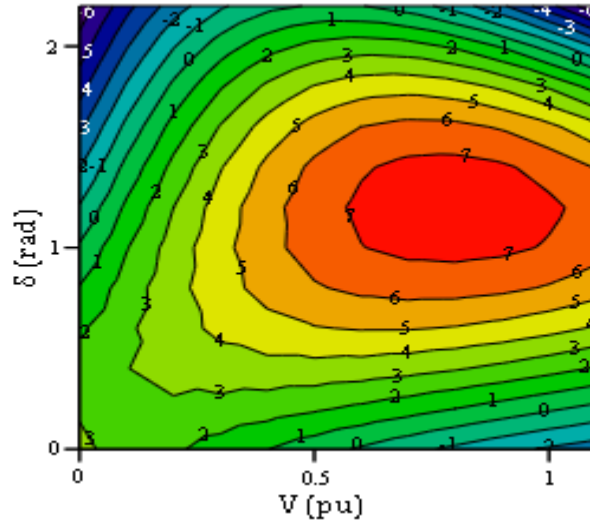
Tablo 5.27.  $\delta_m=0.4$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$ | Enerji Ölçümü |      |     |     |     |     |      |      |      |      |      |  |
|----------|---------------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|--|
| 0        | 3,8           | 3,2  | 2,5 | 1,8 | 1,1 | 0,4 | -0,4 | -1,1 | -1,8 | -2,4 | -3,0 |  |
| 0,2      | 3,5           | 3,4  | 3,3 | 3,0 | 2,7 | 2,3 | 1,8  | 1,4  | 0,8  | 0,3  | -0,2 |  |
| 0,4      | 3,0           | 3,5  | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | 3,9  | 3,6  | 3,3  | 2,9  | 2,5  |  |
| 0,6      | 2,3           | 3,3  | 4,1 | 4,7 | 5,2 | 5,4 | 5,6  | 5,6  | 5,5  | 5,2  | 4,9  |  |
| 0,8      | 1,4           | 2,9  | 4,1 | 5,1 | 5,9 | 6,5 | 6,9  | 7,1  | 7,2  | 7,1  | 6,8  |  |
| 1        | 0,4           | 2,3  | 3,9 | 5,2 | 6,3 | 7,1 | 7,8  | 8,1  | 8,3  | 8,3  | 8,1  |  |
| 1,2      | -0,7          | 1,5  | 3,4 | 5,0 | 6,3 | 7,3 | 8,0  | 8,5  | 8,8  | 8,8  | 8,5  |  |
| 1,4      | -1,9          | 0,5  | 2,6 | 4,4 | 5,8 | 6,9 | 7,7  | 8,2  | 8,4  | 8,4  | 8,0  |  |
| 1,6      | -3,1          | -0,6 | 1,6 | 3,5 | 4,9 | 6,0 | 6,8  | 7,2  | 7,3  | 7,1  | 6,6  |  |
| 1,8      | -4,4          | -1,8 | 0,4 | 2,2 | 3,6 | 4,6 | 5,2  | 5,4  | 5,3  | 4,8  | 4,0  |  |
| V        | 0             | 0,1  | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |  |

Tablo 5.27, generatör rotor açısı  $\delta_m=0.4$  rad olmak üzere, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

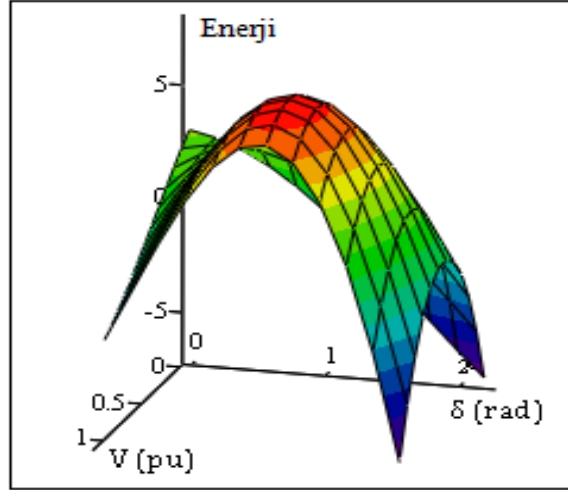
#### 5.4.8. $\delta_m=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.4 radyandan 0.8 radyana yükseltilecek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.34.  $\delta_m=0.8$  rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.34. (Devamı)

Şekil 5.34 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Enerji yoğunluğunun  $0.7 \leq V \leq 0.9$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında değiştiği Şekil 5.34'ten ve Tablo 5.28'den görülmektedir. Bu noktalar arasında enerji yoğunluğunun 7.2 ve 7.7 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.28'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

Tablo 5.28.  $\delta_m=0.8$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| <b>0</b>   | 3,2           | 2,7        | 2,2        | 1,6        | 1,0        | 0,4        | -0,1       | -0,7       | -1,2       | -1,7       | -2,1     |
| <b>0,2</b> | 2,9           | 2,9        | 2,8        | 2,7        | 2,4        | 2,1        | 1,8        | 1,4        | 1,0        | 0,6        | 0,2      |
| <b>0,4</b> | 2,5           | 3,0        | 3,3        | 3,6        | 3,7        | 3,7        | 3,6        | 3,4        | 3,1        | 2,8        | 2,4      |
| <b>0,6</b> | 1,8           | 2,8        | 3,6        | 4,2        | 4,7        | 4,9        | 5,1        | 5,1        | 5,0        | 4,7        | 4,4      |
| <b>0,8</b> | 1,1           | 2,5        | 3,7        | 4,6        | 5,4        | 5,9        | 6,2        | 6,4        | 6,4        | 6,2        | 5,9      |
| <b>1</b>   | 0,1           | 1,9        | 3,5        | 4,7        | 5,7        | 6,5        | 7,0        | 7,3        | 7,4        | 7,2        | 6,9      |
| <b>1,2</b> | -0,9          | 1,2        | 3,0        | 4,5        | 5,7        | 6,6        | 7,2        | 7,6        | 7,7        | 7,6        | 7,2      |
| <b>1,4</b> | -2,0          | 0,3        | 2,3        | 3,9        | 5,2        | 6,2        | 6,9        | 7,3        | 7,4        | 7,2        | 6,7      |
| <b>1,6</b> | -3,2          | -0,7       | 1,4        | 3,1        | 4,4        | 5,4        | 6,0        | 6,3        | 6,3        | 5,9        | 5,3      |
| <b>1,8</b> | -4,4          | -1,9       | 0,2        | 1,9        | 3,2        | 4,1        | 4,6        | 4,7        | 4,4        | 3,8        | 2,9      |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |

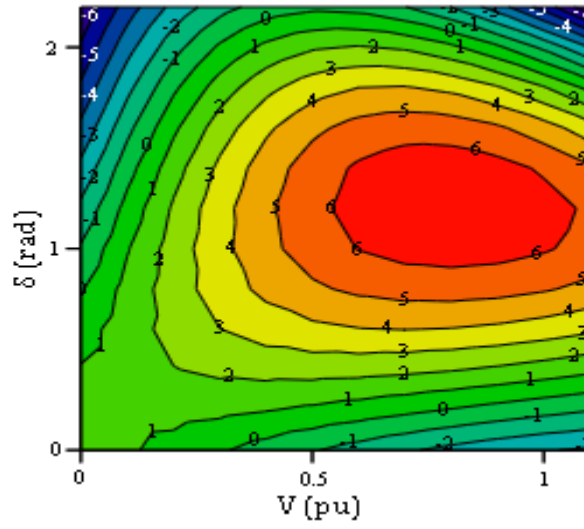
Generatör rotor açısı  $\delta_m=0.8$  rad olmak üzere, Tablo 5.28, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.



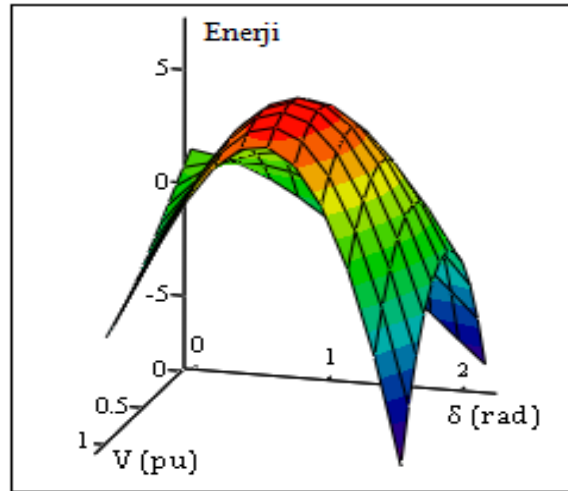
#### 5.4.9. $\delta_m=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Bu analizde generatör açısı ( $\delta_m$ ) 0.8 radyandan 1.2 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.

Şekil 5.35'ten ve Tablo 5.29'dan, enerji yoğunluğunun  $0.6 \leq V \leq 1$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 5.9 ve 6.9 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.35.  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.35 enerji fonksiyonunun gerilim-açı mekanizmasını göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin Tablo 5.29'dan belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır.

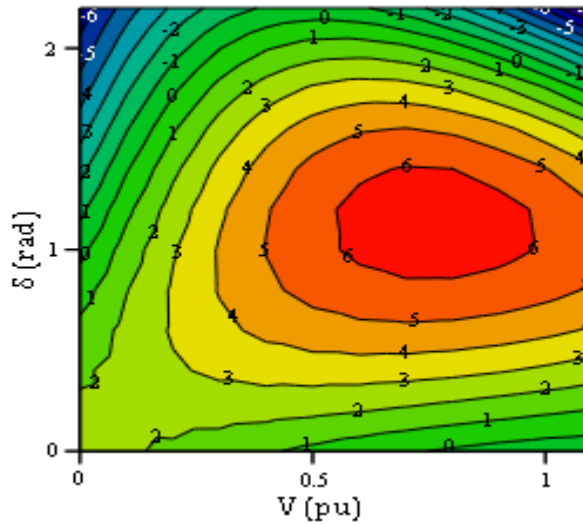
Tablo 5.29.  $\delta_m=1.2$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 1,6           | 1,1        | 0,6        | 0,1        | -0,4       | -0,9       | -1,4       | -1,9       | -2,3       | -2,6       | -2,9     |  |
| <b>0,2</b> | 1,4           | 1,4        | 1,4        | 1,2        | 1,1        | 0,8        | 0,6        | 0,3        | 0,0        | -0,3       | -0,6     |  |
| <b>0,4</b> | 1,1           | 1,6        | 2,0        | 2,2        | 2,4        | 2,4        | 2,4        | 2,3        | 2,1        | 1,9        | 1,6      |  |
| <b>0,6</b> | 0,6           | 1,5        | 2,4        | 3,0        | 3,5        | 3,8        | 4,0        | 4,0        | 4,0        | 3,8        | 3,6      |  |
| <b>0,8</b> | -0,1          | 1,3        | 2,5        | 3,5        | 4,3        | 4,8        | 5,2        | 5,4        | 5,5        | 5,4        | 5,1      |  |
| <b>1</b>   | -0,9          | 0,9        | 2,5        | 3,7        | 4,7        | 5,5        | 6,0        | 6,4        | 6,5        | 6,4        | 6,1      |  |
| <b>1,2</b> | -1,8          | 0,3        | 2,1        | 3,6        | 4,8        | 5,7        | 6,4        | 6,8        | 6,9        | 6,8        | 6,4      |  |
| <b>1,4</b> | -2,7          | -0,4       | 1,6        | 3,2        | 4,5        | 5,5        | 6,2        | 6,5        | 6,6        | 6,4        | 5,9      |  |
| <b>1,6</b> | -3,8          | -1,3       | 0,8        | 2,5        | 3,8        | 4,8        | 5,4        | 5,6        | 5,6        | 5,2        | 4,5      |  |
| <b>1,8</b> | -4,8          | -2,3       | -0,2       | 1,5        | 2,7        | 3,6        | 4,0        | 4,1        | 3,8        | 3,1        | 2,1      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.2$  rad olmak üzere, Tablo 5.29, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

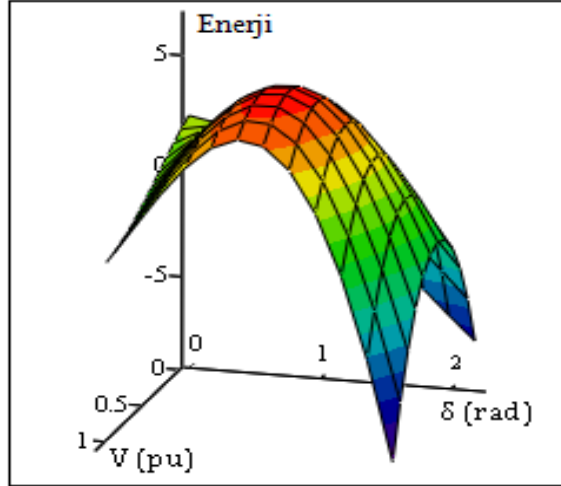
#### 5.4.10. $\delta_m=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi

Çalışma noktası generatör açısı ( $\delta_m$ ) 1.2 radyandan 1.6 radyana yükseltilecek yeni bir seviyeye kaydırılmış olur.



(a)

Şekil 5.36.  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde SVC'li değiştirilmiş sistemin enerji yoğunluğu a) İki boyutlu olarak gösterilim b) Üç boyutlu olarak gösterilim



(b)

Şekil 5.36. (Devamı)

Şekil 5.36 enerji fonksiyonunun gerilim-açı yörüngesini göstermektedir. Şekil 5.36'dan ve Tablo 5.30'dan görüldüğü üzere, enerji yoğunluğu  $0.6 \leq V \leq 0.9$  ve  $1 \leq \delta \leq 1.4$  arasındadır. Bu noktalar etrafında enerji yoğunluğunun 5.7 ve 6.5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Yukarıda verilen SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine ait beş analizden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.6$  rad ve  $V=0.8$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 9.8'dir (Bkz. Tablo 5.26).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde enerji yoğunluğu 4.8'dir (Bkz. Tablo 5.30).  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunu gösteren tablo aşağıdadır:

Tablo 5.30.  $\delta_m=1.6$  rad durumu için enerji ölçümü

| $\delta$   | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |            |            |            |            |            |          |  |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|
| <b>0</b>   | 2,4           | 2,1        | 1,8        | 1,5        | 1,1        | 0,8        | 0,4        | 0,1        | -0,1       | -0,4       | -0,5     |  |
| <b>0,2</b> | 2,2           | 2,4        | 2,4        | 2,4        | 2,3        | 2,2        | 2,0        | 1,8        | 1,6        | 1,4        | 1,2      |  |
| <b>0,4</b> | 1,8           | 2,4        | 2,9        | 3,2        | 3,4        | 3,5        | 3,5        | 3,4        | 3,3        | 3,1        | 2,8      |  |
| <b>0,6</b> | 1,3           | 2,3        | 3,1        | 3,8        | 4,2        | 4,6        | 4,8        | 4,8        | 4,7        | 4,5        | 4,3      |  |
| <b>0,8</b> | 0,6           | 2,0        | 3,1        | 4,1        | 4,8        | 5,3        | 5,7        | 5,8        | 5,8        | 5,7        | 5,3      |  |
| <b>1</b>   | -0,3          | 1,4        | 2,9        | 4,1        | 5,0        | 5,7        | 6,2        | 6,4        | 6,5        | 6,3        | 5,9      |  |
| <b>1,2</b> | -1,3          | 0,8        | 2,5        | 3,8        | 4,9        | 5,7        | 6,3        | 6,5        | 6,5        | 6,3        | 5,8      |  |
| <b>1,4</b> | -2,3          | -0,1       | 1,8        | 3,3        | 4,5        | 5,3        | 5,8        | 6,1        | 6,0        | 5,7        | 5,0      |  |
| <b>1,6</b> | -3,4          | -1,1       | 0,9        | 2,4        | 3,6        | 4,4        | 4,9        | 5,0        | 4,8        | 4,3        | 3,5      |  |
| <b>1,8</b> | -4,5          | -2,2       | -0,2       | 1,3        | 2,4        | 3,1        | 3,5        | 3,4        | 3,0        | 2,2        | 1,1      |  |
| <b>V</b>   | <b>0</b>      | <b>0,1</b> | <b>0,2</b> | <b>0,3</b> | <b>0,4</b> | <b>0,5</b> | <b>0,6</b> | <b>0,7</b> | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>1</b> |  |

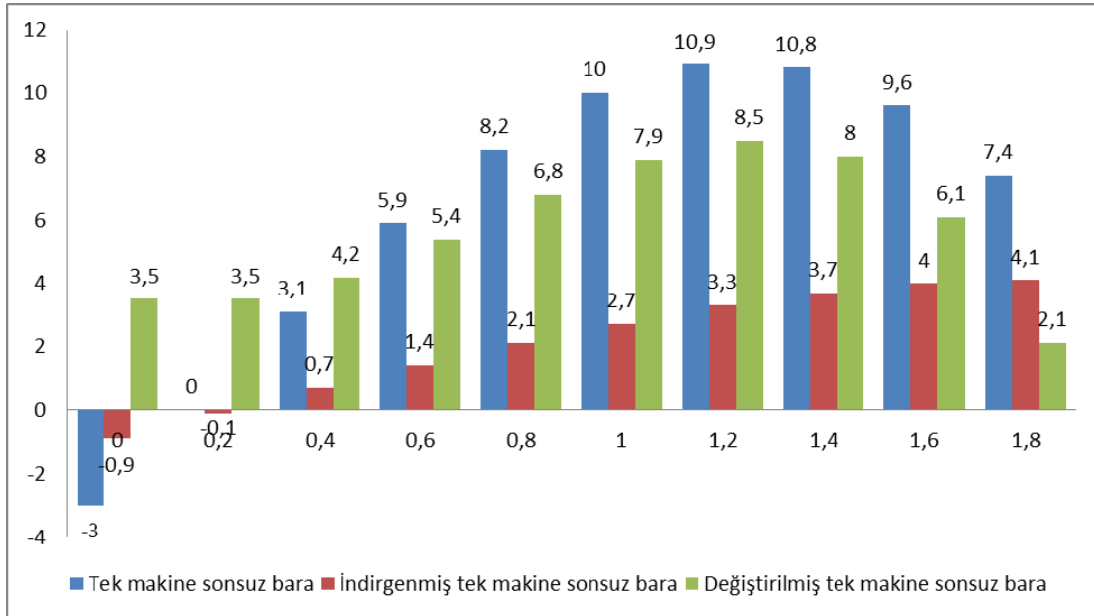
Generatör rotor açısı  $\delta_m=1.6$  rad olmak üzere, Tablo 5.30, farklı yük açıları ( $\delta$ ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir.

SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi için enerji fonksiyonu analizinde  $\delta_m=0$  rad durumunda elde edilen maksimum enerji seviyesi 8.7 enerji birimidir. Bununla birlikte, eğer yük yüksek gerilimde kullanılsaydı (örneğin  $V=1$  pu) o zaman sistemin kararlılığını koruyabilmesi için sistemin mümkün olan maksimum enerjiye sahip olmasına imkan veren yük açısı  $\delta=1.2$  rad olacaktı. Bu noktada okunan enerji 8.5 enerji birimidir (Bkz. Tablo 5.21). SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine ait analizlerden tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. Yani enerji seviyesi çalışma noktasının kararsızlığa yakınlığının ölçüsüdür.  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.7'dir (Bkz. Tablo 5.21). Aynı değerlerde  $\delta_m=0.4$  rad için 7.9 (Bkz. Tablo 5.22),  $\delta_m=0.8$  rad için 5.7 (Bkz. Tablo 5.23),  $\delta_m=1.2$  rad seçildiğinde 4.4 (Bkz. Tablo 5.24) ve  $\delta_m=1.6$  rad seçildiğinde ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 2.7'dir. (Bkz. Tablo 5.25).

SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.4$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.7'dir (Bkz. Tablo 5.21). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 9.7'dir (Bkz. Tablo 5.26). SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.4$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.9$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 8.7'dir (Bkz. Tablo 5.22). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 8.8'dir (Bkz. Tablo 5.27). SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=0.8$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.7$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 6.8'tür (Bkz. Tablo 5.23). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 7.6'dır (Bkz. Tablo 5.28). SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.2$  rad olduğu durumda,  $\delta=1.2$  rad ve  $V=0.7$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 5.8'dir (Bkz. Tablo 5.24). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 6.8'dir (Bkz. Tablo 5.29). SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminde  $\delta_m=1.6$  rad olduğu durumda,  $\delta=1$  rad ve  $V=0.7$  pu iken en yüksek enerji yoğunluğu 5'tir (Bkz.

Tablo 5.25). SVC'li durumda ise yine aynı değerlerde en yüksek enerji yoğunluğu 6.4'tür (Bkz. Tablo 5.30). Sonuçlara göre  $\delta_m=0.4$  rad değeri hariç, SVC'nin değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine etkisi oldukça iyidir.  $\delta_m=0.4$  rad değeri hariç, diğer generatör değerlerinde enerji yoğunluğunu yani gerilim kararlılığı sınırlarını arttırmaktadır. Yapılan sayısal simülasyonlar açıkça göstermektedir ki yükteki herhangi bir değişim depolanan enerji seviyesini aşağılara düşürmeye ve hatta belki de negatif değerlere kadar düşürmeye devam edecektir. Yükteki bir değişimin depolanan enerjide bir artışa sebep olduğu durumda, sistem kararsızlık noktasından uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Sonuçlara bakıldığında açıkça görülmektedir ki SVC enerji yoğunluğunu arttırmaktadır.

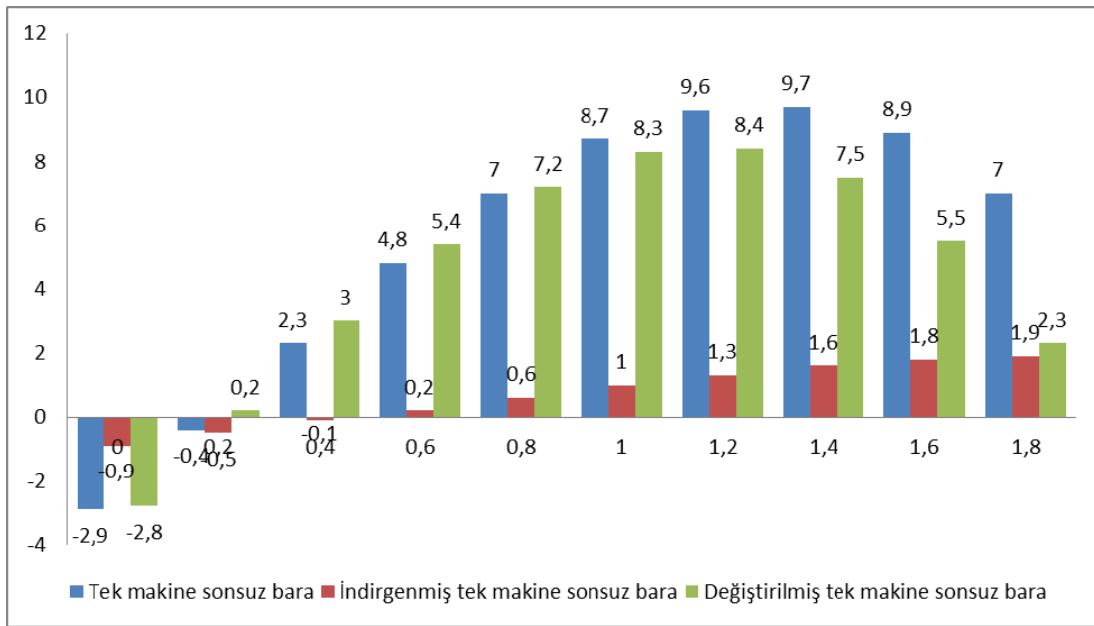
SVC'siz tek makine sonsuz bara, SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerinin yüksek gerilimde ( $V=1$  pu) enerji yoğunluğunun karşılaştırılması grafikler üzerinden aşağıdaki gibi yapılmıştır. Grafiklerde yatay eksen yük açısını, dikey eksen enerji ölçümünü göstermektedir.



Şekil 5.37.  $\delta_m=0$  rad durumunda her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi

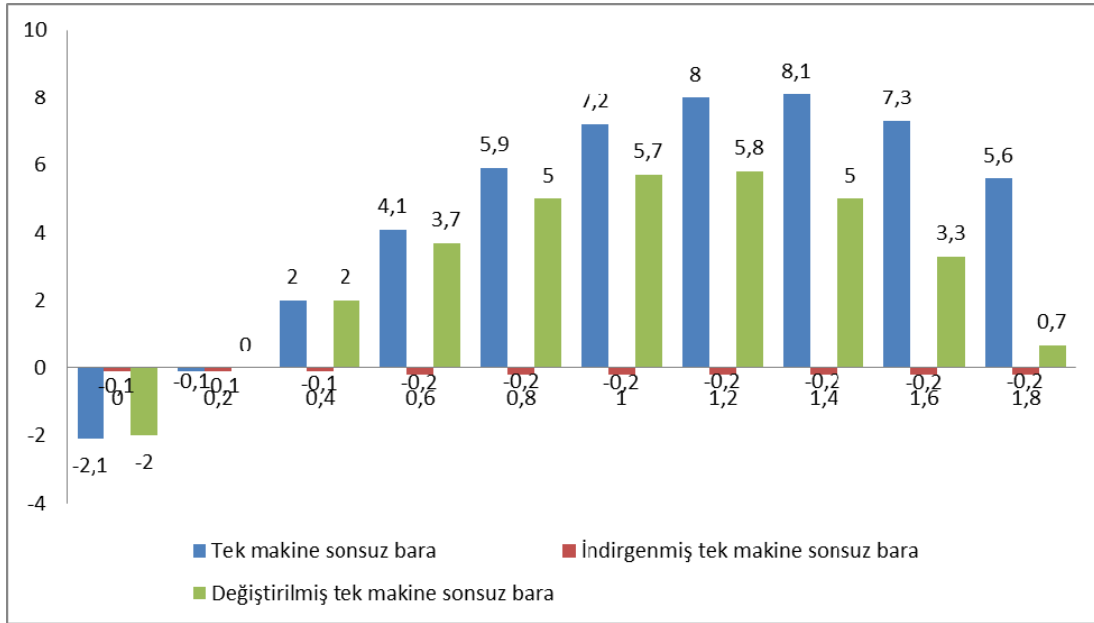
Şekil 5.37'den yüksek gerilimde tek makine sonsuz bara güç sisteminin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Yalnız, tek makine sonsuz bara güç

sistemi ile indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0$  ve  $\delta=0.2$  değerlerinde kararsızlığa giderken değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi tüm yük açılarındaki kararlı olarak çalışmaktadır. Yine şekilden indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin en düşük enerji yoğunluğu değerlerini aldığı görülmektedir.  $\delta_m=0$  rad durumunda tek makine sonsuz bara güç sistemi ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi yük açısı  $\delta=1.2$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu alırken, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi yük açısı  $\delta=1.8$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.



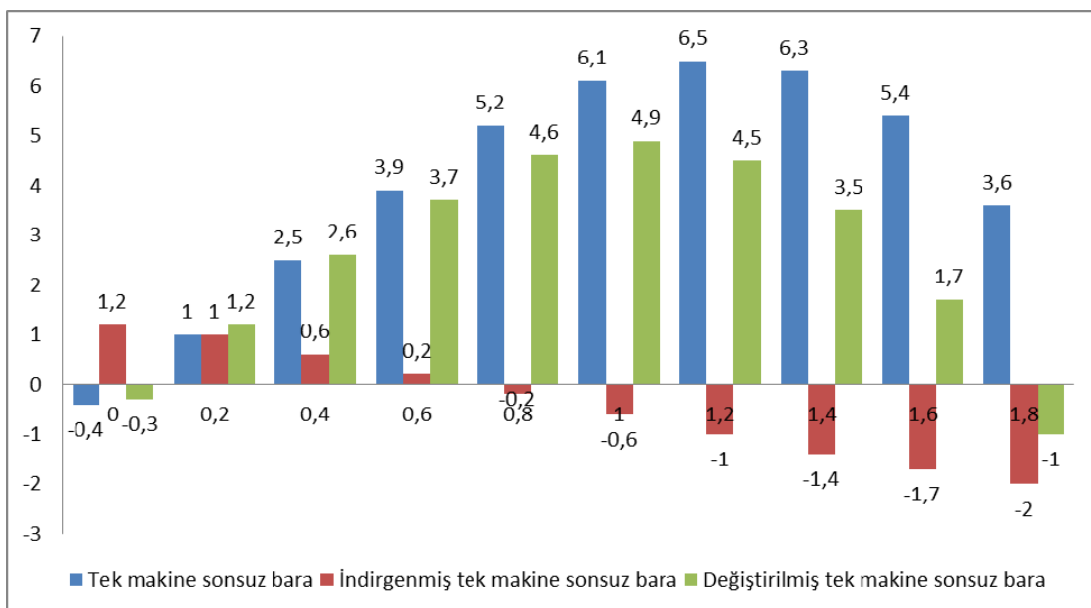
Şekil 5.38.  $\delta_m=0.4$  rad durumunda her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilmesi

Şekil 5.38'den küçük yük açılarındaki değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin, büyük yük açılarındaki ise tek makine sonsuz bara güç sisteminin performansının iyi olduğu görülmektedir.  $\delta_m=0.4$  rad için de indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin en düşük enerji yoğunluğu değerlerini aldığı görülmektedir. Her üç güç sistemi de  $\delta=0$  rad değeri için kararsızlığa gitmektedir.  $\delta_m=0.4$  rad durumunda tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.4$ 'te, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.8$ 'de ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=1.2$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.



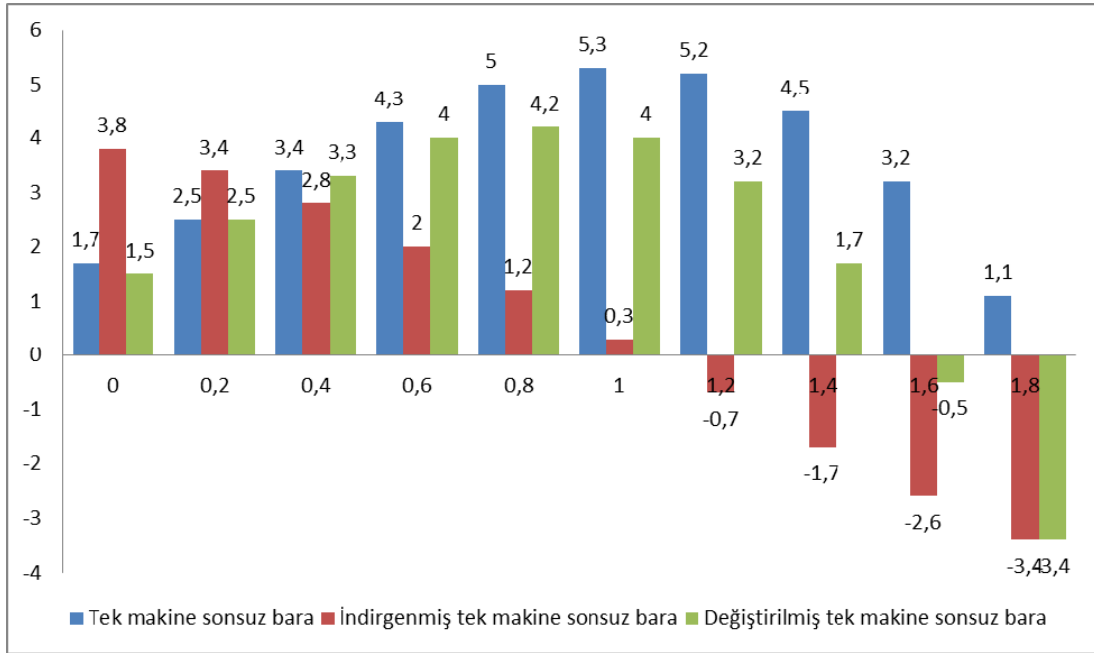
Şekil 5.39.  $\delta_m=0.8$  rad durumunda her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi

Şekil 5.39’da ilk göze çarpan detay,  $\delta_m=0.8$  rad değeri için indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin tüm yük açıları için kararsız çalışacağıdır. Yine, yüksek gerilimde tek makine sonsuz bara güç sisteminin performansının daha iyi olduğu görülmektedir.  $\delta_m=0.8$  rad durumunda tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.4$ ’te ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise yük açısı  $\delta=1.2$ ’de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.



Şekil 5.40.  $\delta_m=1.2$  rad durumunda her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi

Şekil 5.40'tan görüldüğü üzere, tek makine sonsuz bara güç sistemi daha önceki generatör açı değerlerine orantılı olarak çalışmaktadır. İndirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi genellikle küçük yük açılarında kararsız çalışırken, yüksek yük açılarında kararlı olarak çalışmıştır. Fakat  $\delta_m=1.2$  rad durumunda, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi bunun tam tersine küçük yük açılarında kararlı çalışırken büyük yük açılarında kararsızlığa gitmektedir. Değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=0$  rad durumu hariç genellikle kararlı çalışmaktadır. Ancak  $\delta_m=1.2$  rad durumunda,  $\delta=1.8$  rad için sistem kararsız çalışmaktadır. Performans olarak bakıldığında tek makine sonsuz bara güç sisteminin  $\delta=0$  rad durumu hariç tüm yük açılarında kararlı olarak çalışabildiği ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.2$ 'de, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0$ 'da ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=1$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.

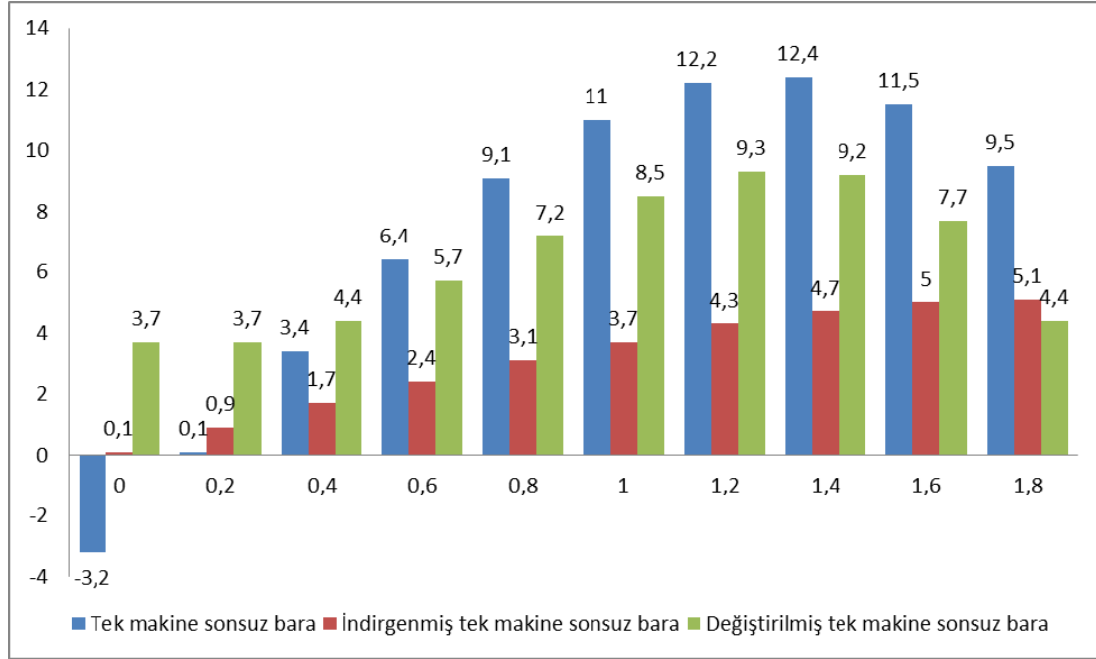


Şekil 5.41.  $\delta_m=1.6$  rad durumunda her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilmesi

Şekil 5.41'den  $\delta_m=1.6$  rad değeri için tek makine sonsuz bara güç sistemi için tüm yük açılarında kararlı çalıştığı görülmektedir. İndirgenmiş ve değiştirilmiş güç sistemleri ise küçük yük açılarında kararlı çalışırken, büyük yük açılarında ise sistemlerde kararsızlık baş göstermektedir.



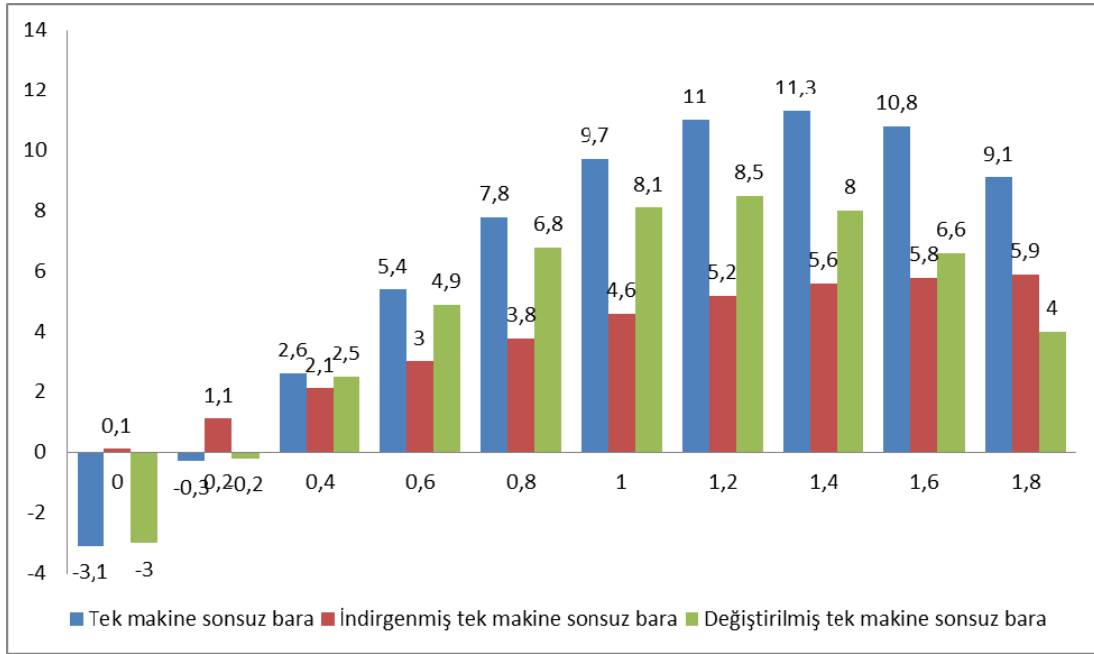
SVC'li tek makine sonsuz bara, SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerinin yüksek gerilimde ( $V=1$  pu) enerji yoğunlukları  $\delta_m=0$  radyandan başlanarak  $\delta_m=1.6$  radyana kadar 0.4 artımla aşağıda grafiklerle gösterilmektedir. Grafiklerde yatay eksen yük açısını, dikey eksen enerji ölçümünü göstermektedir.



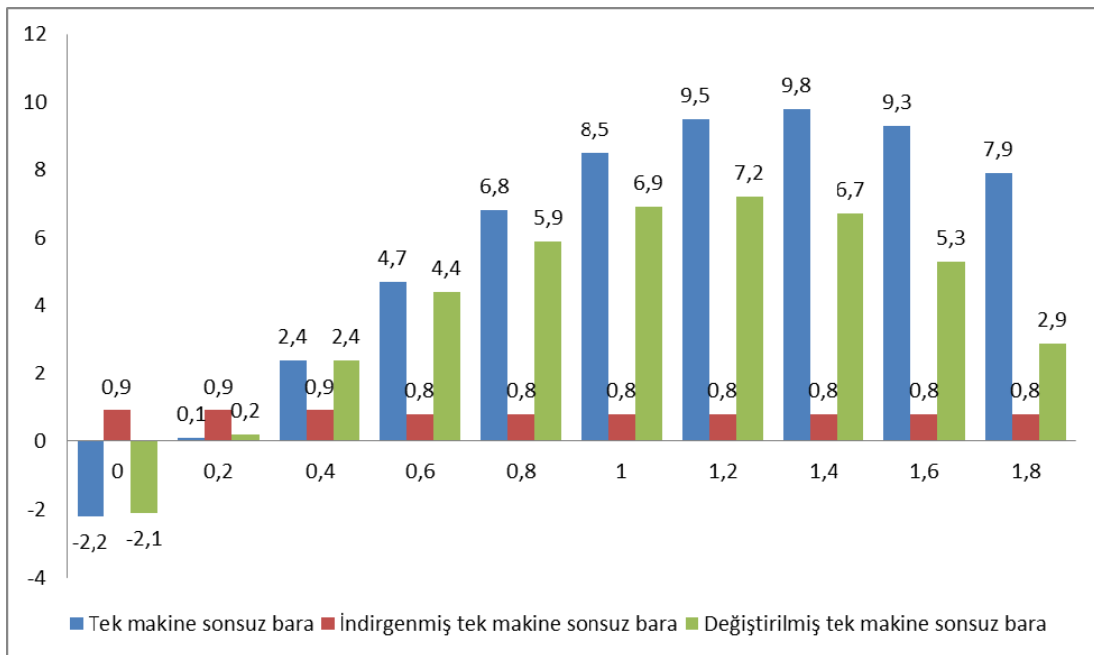
Şekil 5.42.  $\delta_m=0$  rad durumunda SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi

Şekil 5.37'de indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin  $\delta=0$  rad ve  $\delta=0.4$  rad değerlerinde kararsız çalışmaktaydı. İndirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenmesiyle güç sistemi Şekil 5.42'de de görüldüğü üzere tüm yük açıları için kararlı çalışmaktadır. Tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.4$ 'te, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.8$ 'de ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=1.2$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.

Şekil 5.38'de indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sisteminin  $\delta=0$  rad,  $\delta=0.2$  rad ve  $\delta=0.4$  rad değerlerinde kararsız çalışmaktaydı. İndirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenmesiyle güç sistemi Şekil 5.43'te de görüldüğü üzere tüm yük açıları için kararlı çalışmaktadır. Diğer güç sistemlerine SVC eklenmesi enerji yoğunluklarını arttırmıştır.



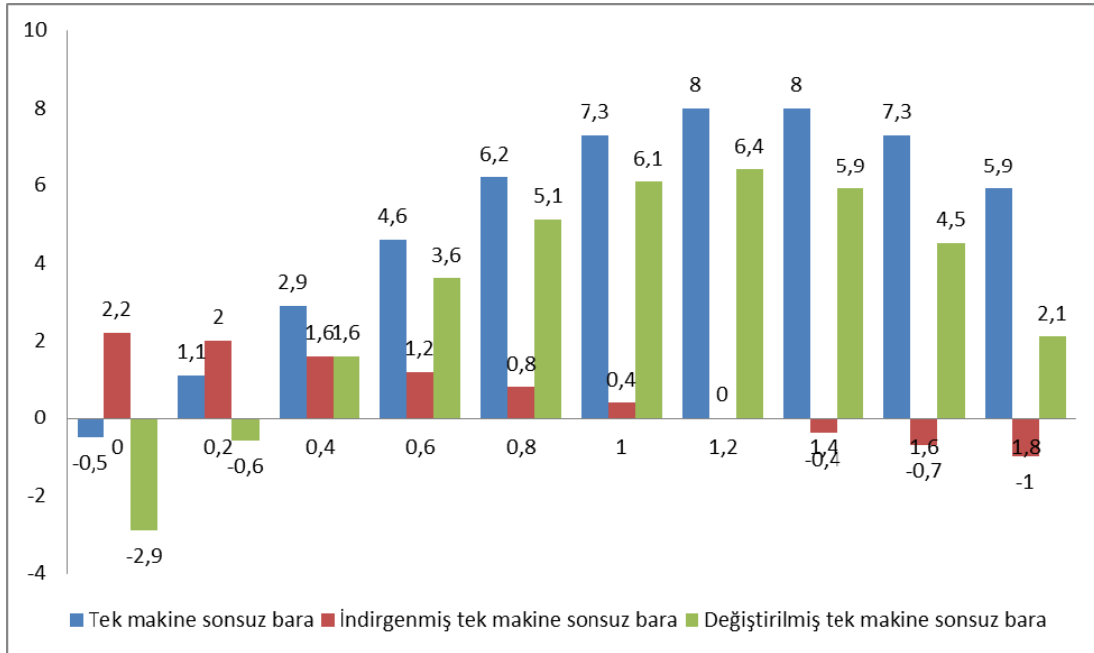
Şekil 5.43.  $\delta_m=0.4$  rad durumunda SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilmesi



Şekil 5.44.  $\delta_m=0.8$  rad durumunda SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilmesi

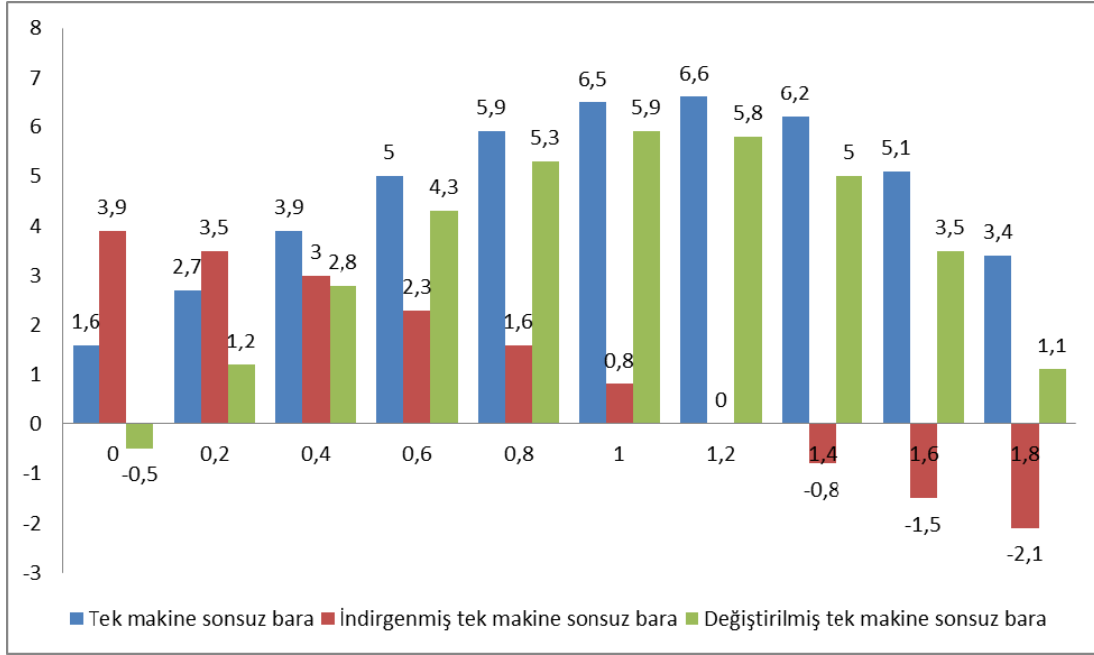
İndirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi Şekil 5.39'da görüldüğü üzere tüm yük açıları için kararsız çalışmaktaydı. İndirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemine SVC eklenmesiyle güç sistemi Şekil 5.44'te de görüldüğü üzere tüm yük açıları için kararlı çalışmaktadır. Tek makine sonsuz bara güç sistemi ile değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0.2$  için kararsız çalışırken, Şekil 5.44'ten

de görüldüğü üzere sisteme SVC eklenmesiyle kararlı çalışmaya başlamışlardır. Tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.4$ 'te, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0$ 'da ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=1.2$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.



Şekil 5.45.  $\delta_m=1.2$  rad durumunda SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilimi

Şekil 5.40'tan da görüldüğü üzere indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0.8$  rad ve  $\delta=1$  rad değerlerinde kararsızlığa giderken, Şekil 5.45'ten de görülmektedir ki güç sistemine SVC eklenmesiyle aynı yük açılarında sistem kararlı olarak çalışmaktadır. Şekil 5.40'ta değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.8$  rad değerinde kararsızlığa gitmekteydi. Şekil 5.45'ten de görüldüğü üzere değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.8$  rad değerinde kararlı çalışmaktadır. SVC eklenmesi tek makine sonsuz bara güç sisteminin ise enerji yoğunluğunu arttırmıştır. Tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=1.4$ 'te, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi  $\delta=0$ 'da ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ise  $\delta=1.2$ 'de en yüksek enerji yoğunluğunu almıştır.

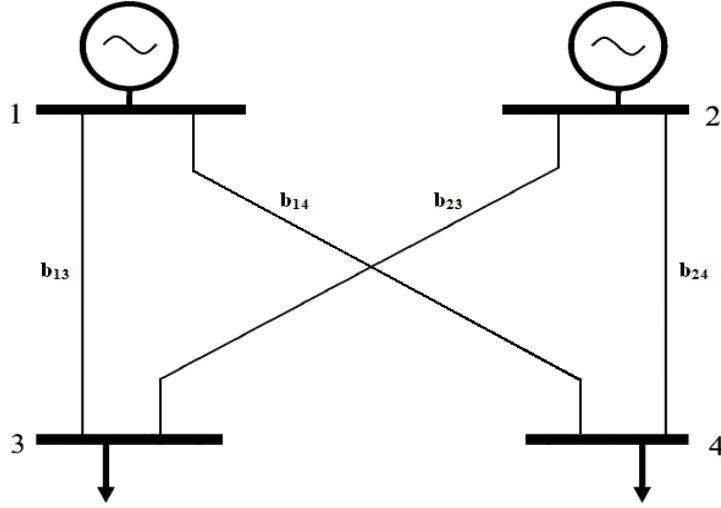


Şekil 5.46.  $\delta_m=1.6$  rad durumunda SVC'li her üç güç sisteminin enerji yoğunluğunun gösterilmesi

Değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi Şekil 5.41'de  $\delta=1.6$  rad ve  $\delta=1.8$  rad değerleri için kararsızlığa gitmekteydi. Şekil 5.46'dan da görüldüğü üzere SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi aynı değerler için kararlı çalışmaktadır. Diğer güç sistemlerine SVC eklenmesi enerji yoğunluklarını arttırmıştır.

### 5.5. SVC'siz ve SVC'li Dört Baralı Güç Sistemi İçin Enerji Fonksiyonu Analizi

Tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerinin enerji fonksiyonu analizlerinde değişken gradiyent metot yardımıyla sistemlerin enerji fonksiyonları elde edilerek, sistemin depolanmış enerji grafikleri hem iki boyutlu hem de üç boyutlu olarak gösterilmişti. Bu analizde ise SVC'siz ve SVC'li dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. Şekil 5.47'de bu analiz için kullanılacak dört baralı güç sistemi verilmiştir:



Şekil 5.47. Dört baralı güç sistemi

Şekilde verilen güç sisteminde 3 ve 4 numaralı yük baraları 1 ve 2 numaralı generatörler tarafından beslenmektedir. 2 numaralı bara analizlerde referans bara olarak seçilmiştir. Şekil 5.47’de verilen dört baralı güç sistemine ait yük akış denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\tilde{a}_2(\delta_2, V_2) = V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4) \quad (5.89)$$

$$\tilde{a}_3(\delta_3, V_3) = V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2) \quad (5.90)$$

$$\tilde{a}_4(\delta_4, V_4) = V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2) \quad (5.91)$$

$$\tilde{b}_2(\delta_2, V_2) = -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) - V_2 V_4 b_{24} \cos(\delta_2 - \delta_4) - V_2^2 (b_{23} + b_{24}) \quad (5.92)$$

$$\tilde{b}_3(\delta_3, V_3) = -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) - V_1 V_3 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13}) \quad (5.93)$$

$$\tilde{b}_4(\delta_4, V_4) = -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) - V_2 V_4 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24}) \quad (5.94)$$

$$a_i(\delta_i, V_i) = \tilde{a}_i(\delta_i, V_i) + P_i^0 \quad (5.95)$$

$$b_i(\delta_i, V_i) = \tilde{b}_i(\delta_i, V_i) + Q_{D,i}(V_i) \quad (5.96)$$

Generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m = P_l$ ) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2) + P_3^0 \right\} \quad (5.97)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2) + P_4^0 \right\} \quad (5.98)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_3^{-1} \left\{ -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_3 V_1 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13}) + Q_{D,3}(V_3) \right\} \quad (5.99)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_4^{-1} \left\{ -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) + V_4 V_2 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24}) + Q_{D,4}(V_4) \right\} \quad (5.100)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ -P_1^0 \right\} \quad (5.101)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4) - P_2^0 \right\} \quad (5.102)$$

Analizlerde generatör açısı  $\delta_m$ 'nin oluşturduğu eşitlik ihmal edilmiştir. (5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemlerine göre (5.95), (5.96), (5.97), (5.98), (5.99), (5.100), (5.101) ve (5.102) denklemleri yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ \tilde{a}_3(\delta_3, V_3) + P_3^0 \right\} \quad (5.103)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ \tilde{a}_4(\delta_4, V_4) + P_4^0 \right\} \quad (5.104)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_3^{-1} \left\{ \tilde{b}_3(\delta_3, V_3) + Q_{D,3}(V_3) \right\} \quad (5.105)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_4^{-1} \left\{ \tilde{b}_4(\delta_4, V_4) + Q_{D,4}(V_4) \right\} \quad (5.106)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ \tilde{a}_1(\delta_1, V_1) - P_1^0 \right\} \quad (5.107)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ \tilde{a}_2(1,0) - P_2^0 \right\} \quad (5.108)$$

Şekil 5.47'deki güç sistemi için Lyapunov fonksiyonunun elde edilmesinde (5.103), (5.104), (5.105), (5.106), (5.107) ve (5.108) denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_3 \\ \dot{\delta}_4 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -D_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_3^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\varepsilon}} V_4^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix} \quad (5.109)$$

(5.97), (5.98), (5.99), (5.100), (5.101) ve (5.102) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.109) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

$(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.109) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.109) denkleminin sağ tarafında görülen (6x1) gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$V(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2) = \int_{(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)}^{(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2)} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\delta_3 \\ d\delta_4 \\ dV_3 \\ dV_4 \\ d\omega_1 \\ d\omega_2 \end{bmatrix} \quad (5.110)$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.110) denkleminde yerine konulursa, dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.7) denklemi gibi elde edilir. Dört baralı güç sisteminin bir enerji fonksiyonu olan Ek A'da verilen (A.7) denklemi sistem frekansı, yükün aktif ve reaktif gücü, yük gerilimi, yük açısı, generatör açısı, sabit parametreler ile alakalı tüm parametreleri içerir. Bu denklem Şekil 5.47'de verilen dört baralı güç sistemi için sistem frekansı, gerilim, aktif ve reaktif güç ile arasındaki ilişkileri ifade eder.

Dört baralı güç sistemine ait şebeke, yük ve generatör parametreleri aşağıdaki gibidir. Açılar radyan, diğer parametreler birim değer cinsindedir.

$$b_{13} = 19.841, \quad b_{14} = 26.881, \quad b_{23} = 26.881, \quad b_{24} = 15.723, \quad P_1 = 0.52, \quad P_2 = 1.7, \quad P_3 = 2, \\ P_4 = 3.18, \quad V_1 = 1, \quad V_2 = 0.988, \quad V_3 = 0.976, \quad V_4 = 1.02, \quad \delta_1 = 0, \quad \delta_2 = 0.003, \quad \delta_3 = -0.022, \\ \delta_4 = 0.068, \quad Q_{D1} = 0, \quad Q_{D2} = 0, \quad Q_{D3} = 1.239, \quad Q_{D4} = 1.239$$

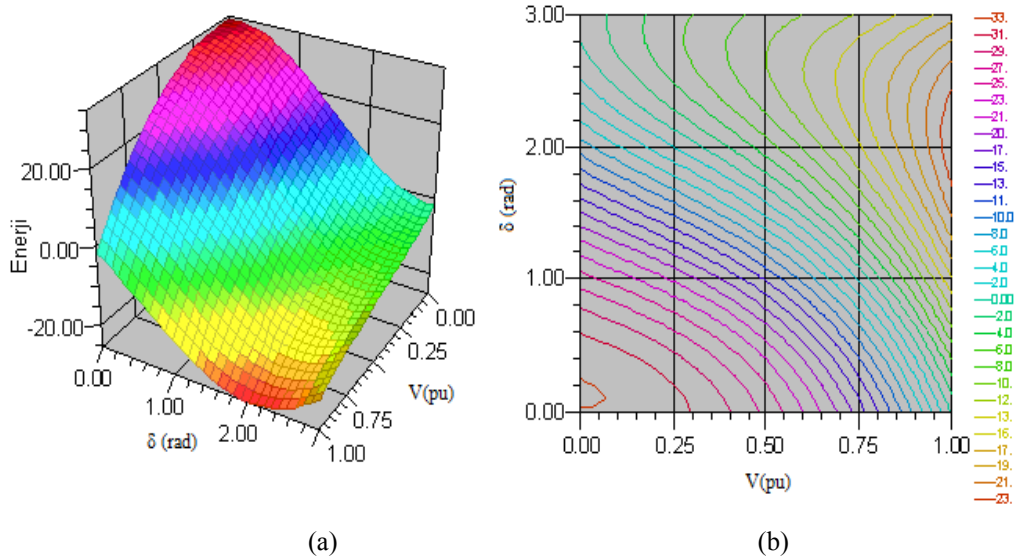
Yukarıda verilen parametre değerleri SVC'siz ve SVC'li dört baralı güç sistemine ait tüm analizlerde aynen kullanılacaktır.  $(\delta_3^*, \delta_4^*, V_3^*, V_4^*, \omega_1^*, \omega_2^*) = (-$

0.022,0.068,0.976,1.02,0.0,0.0), SVC'siz ve SVC'li dört baralı güç sisteminin analizleri için denge noktası olarak seçilmiştir. Dört baralı güç sistemine ait incelemeler iki analiz içerecektir. Birinci analizde üç numaralı baradaki yük sabitken dört numaralı baradaki değişimler karşısında SVC'siz ve SVC'li güç sisteminin kararlılığı incelenirken, ikinci analizde dört numaralı baradaki yük sabitken üç numaralı baradaki değişimler karşısında SVC'siz ve SVC'li güç sisteminin kararlılığı incelenecektir.

### 5.5.1. Üç numaralı baradaki yük sabitken dört numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı

Bu analizde üç numaralı baradaki yükte herhangi bir değişiklik olmadığı yani sabit bir yük bulunduğu kabul edilerek dört numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı incelenecektir. Dört numaralı baradaki yük değişimi incelenirken bir numaralı baranın referans seçilmesinden dolayı burada herhangi bir işlem yapılmazken diğer generatör barası olan iki numaralı baradaki generatör açısı sıfırdan başlanarak 0.4 artımla 1.6 değerine kadar değiştirilip sistemin kararlılığı incelenecektir.

#### 5.5.1.1. $\delta_1=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.48.  $\delta_1=0$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

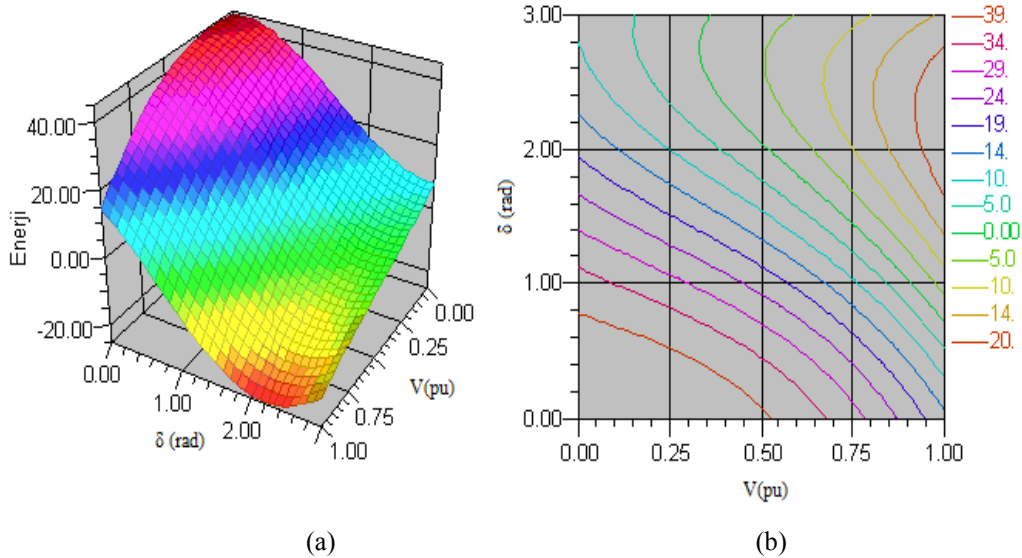


Yük gerilimi 0.9 p.u ile 1 p.u arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun sıfırın altında olduğu Şekil 5.48'den ve Tablo 5.31'den görülmektedir. Sistemin,  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı için her ne kadar düşük yük gerilimleri altında depolanan enerjisi 33.92 enerji birimi değerine ulaşıyorsa da gerçekte sistemin bu değerlerde düzgün çalışması mümkün olmayacağından kararlı çalışması pek mümkün değildir. Dolayısıyla sistemin  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı altında yüksek gerilimlerde çalışmasına kararsızdır denir.

Tablo 5.31.  $\delta_1=0$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |  |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|--|
| <b>0</b>                   | 33,92         | 34,11      | 33,45      | 31,97      | 29,77      | 26,96    | 23,67      | 20,06      | 16,30      | 12,56      |  |
| <b>0,1</b>                 | 33,82         | 33,69      | 32,67      | 30,83      | 28,28      | 25,12    | 21,53      | 17,66      | 13,70      | 9,82       |  |
| <b>0,2</b>                 | 33,21         | 32,76      | 31,42      | 29,26      | 26,40      | 22,98    | 19,15      | 15,11      | 11,02      | 7,09       |  |
| <b>0,3</b>                 | 32,01         | 31,25      | 29,60      | 27,17      | 24,06      | 20,43    | 16,46      | 12,31      | 8,19       | 4,28       |  |
| <b>0,4</b>                 | 30,12         | 29,06      | 27,14      | 24,47      | 21,17      | 17,40    | 13,35      | 9,19       | 5,11       | 1,31       |  |
| <b>0,5</b>                 | 27,47         | 26,12      | 23,95      | 21,08      | 17,64      | 13,80    | 9,74       | 5,65       | 1,71       | -1,90      |  |
| <b>0,6</b>                 | 23,98         | 22,34      | 19,94      | 16,91      | 13,39      | 9,55     | 5,56       | 1,61       | -2,11      | -5,44      |  |
| <b>0,7</b>                 | 19,54         | 17,63      | 15,03      | 11,88      | 8,34       | 4,55     | 0,71       | -3,00      | -6,43      | -9,40      |  |
| <b>0,8</b>                 | 14,09         | 11,90      | 9,13       | 5,91       | 2,39       | -1,27    | -4,88      | -8,29      | -11,33     | -13,85     |  |
| <b>0,9</b>                 | 7,53          | 5,08       | 2,16       | -1,10      | -4,54      | -8,00    | -11,32     | -14,33     | -16,90     | -18,89     |  |
| <b>1</b>                   | -0,23         | -2,92      | -5,97      | -9,22      | -12,53     | -15,73   | -18,67     | -21,21     | -23,23     | -24,61     |  |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |  |

### 5.5.1.2. $\delta_1=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



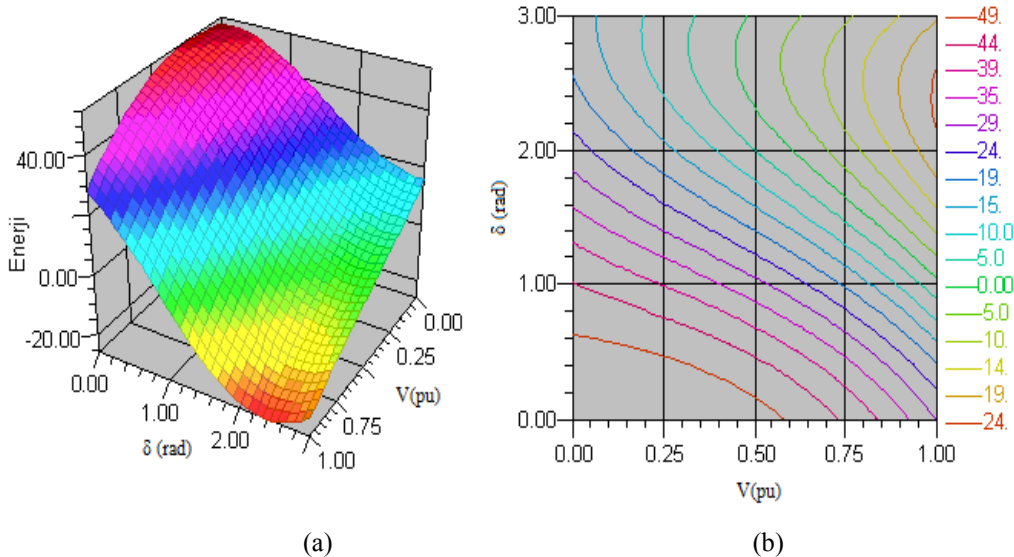
Şekil 5.49.  $\delta_1=0.4$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0.4$  durumu için Şekil 5.49'dan ve Tablo 5.32'den, sistemin depolanan enerjisinin 44.55 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.8 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 0.8$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bunu aşan yük değerlerinde sistemin kararsızlığa gideceği grafiklerden ve tablodan açıkça görülmektedir.

Tablo 5.32.  $\delta_1=0.4$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0        | 43,97         | 44,16 | 43,50 | 42,02 | 39,82 | 37,00 | 33,71  | 30,10  | 26,34  | 22,61  |
| 0,1      | 44,51         | 44,27 | 43,12 | 41,13 | 38,40 | 35,08 | 31,31  | 27,27  | 23,16  | 19,15  |
| 0,2      | 44,55         | 43,88 | 42,27 | 39,80 | 36,61 | 32,84 | 28,67  | 24,29  | 19,90  | 15,70  |
| 0,3      | 43,99         | 42,90 | 40,85 | 37,96 | 34,35 | 30,20 | 25,70  | 21,06  | 16,48  | 12,18  |
| 0,4      | 42,75         | 41,25 | 38,79 | 35,50 | 31,54 | 27,08 | 22,33  | 17,50  | 12,82  | 8,49   |
| 0,5      | 40,75         | 38,85 | 36,00 | 32,36 | 28,09 | 23,38 | 18,46  | 13,53  | 8,83   | 4,57   |
| 0,6      | 37,90         | 35,60 | 32,39 | 28,44 | 23,92 | 19,03 | 14,01  | 9,06   | 4,43   | 0,31   |
| 0,7      | 34,11         | 31,43 | 27,88 | 23,66 | 18,94 | 13,94 | 8,89   | 4,01   | -0,47  | -4,36  |
| 0,8      | 29,30         | 26,24 | 22,39 | 17,93 | 13,07 | 8,03  | 3,03   | -1,71  | -5,96  | -9,54  |
| 0,9      | 23,39         | 19,95 | 15,82 | 11,17 | 6,23  | 1,20  | -3,67  | -8,18  | -12,11 | -15,29 |
| 1        | 16,29         | 12,49 | 8,09  | 3,30  | -1,68 | -6,62 | -11,29 | -15,49 | -19,02 | -21,72 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2    | 1,4    | 1,6    | 1,8    |

### 5.5.1.3. $\delta_1=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



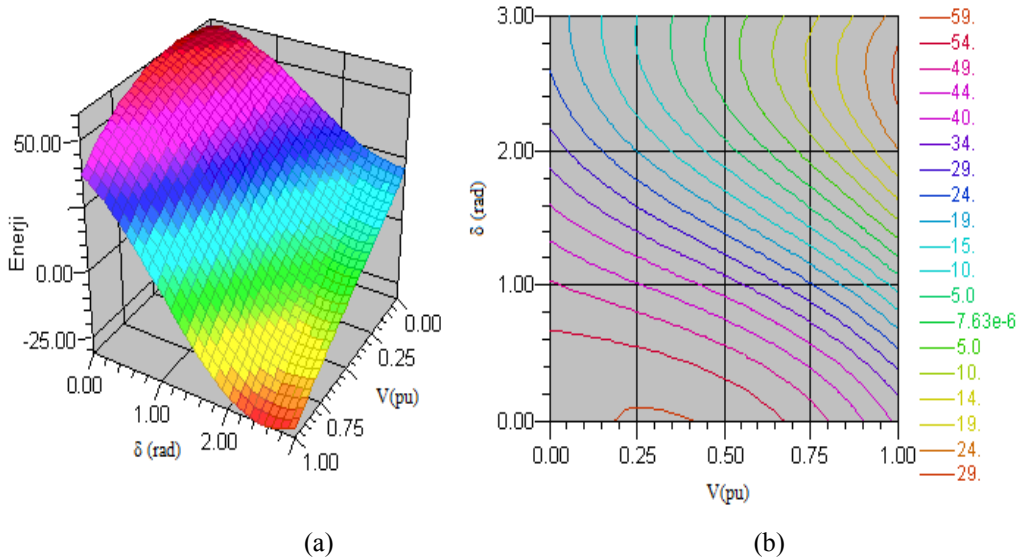
Şekil 5.50.  $\delta_1=0.8$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0.8$  durumu için yukarıdaki şekillerden ve Tablo 5.33'ten, sistemin depolanan enerjisinin 54.01 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.2 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0<\delta_4<1.2$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4>1.2$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.33.  $\delta_1=0.8$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |       |       |       |        |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 0        | 52,34         | 52,53 | 51,87 | 50,39 | 48,19 | 45,37 | 42,08 | 38,48  | 34,72  | 30,98  |
| 0,1      | 53,43         | 53,14 | 51,91 | 49,80 | 46,94 | 43,46 | 39,53 | 35,32  | 31,03  | 26,86  |
| 0,2      | 54,01         | 53,24 | 51,47 | 48,78 | 45,32 | 41,24 | 36,74 | 32,01  | 27,27  | 22,74  |
| 0,3      | 54,00         | 52,76 | 50,47 | 47,24 | 43,23 | 38,62 | 33,62 | 28,45  | 23,36  | 18,56  |
| 0,4      | 53,31         | 51,61 | 48,82 | 45,09 | 40,58 | 35,51 | 30,09 | 24,57  | 19,20  | 14,21  |
| 0,5      | 51,85         | 49,70 | 46,45 | 42,25 | 37,31 | 31,83 | 26,07 | 20,28  | 14,71  | 9,62   |
| 0,6      | 49,54         | 46,95 | 43,25 | 38,64 | 33,30 | 27,50 | 21,47 | 15,48  | 9,81   | 4,69   |
| 0,7      | 46,30         | 43,27 | 39,16 | 34,16 | 28,50 | 22,42 | 16,20 | 10,10  | 4,41   | -0,64  |
| 0,8      | 42,04         | 38,58 | 34,08 | 28,74 | 22,80 | 16,52 | 10,18 | 4,06   | -1,58  | -6,48  |
| 0,9      | 36,67         | 32,79 | 27,92 | 22,28 | 16,12 | 9,71  | 3,33  | -2,74  | -8,23  | -12,90 |
| 1        | 30,11         | 25,82 | 20,61 | 14,71 | 8,38  | 1,90  | -4,44 | -10,38 | -15,64 | -20,00 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2   | 1,4    | 1,6    | 1,8    |

#### 5.5.1.4. $\delta_1=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



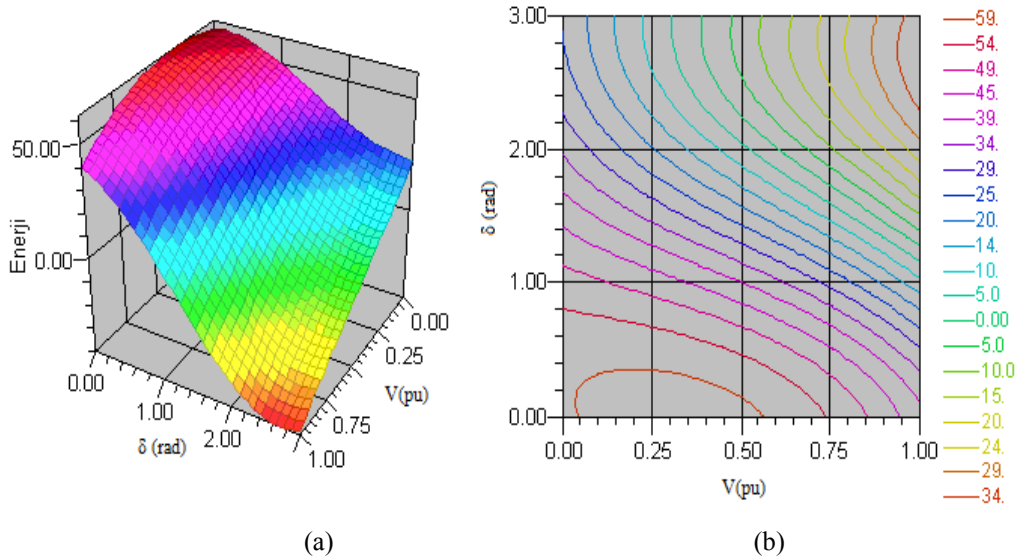
Şekil 5.51.  $\delta_2=1.2$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=1.2$  durumu için yukarıdaki şekillerden ve Tablo 5.34'ten, sistemin depolanan enerjisinin 60.45 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1.4$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4 > 1.4$  değerleri için kararsızlık baş gösterecektir.

Tablo 5.34.  $\delta_1=1.2$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 0        | 57,71         | 57,91 | 57,24 | 55,77 | 53,57 | 50,75 | 47,46 | 43,85 | 40,09  | 36,36  |
| 0,1      | 59,16         | 58,89 | 57,64 | 55,49 | 52,55 | 48,96 | 44,89 | 40,53 | 36,07  | 31,73  |
| 0,2      | 60,10         | 59,37 | 57,57 | 54,78 | 51,16 | 46,86 | 42,08 | 37,05 | 31,98  | 27,10  |
| 0,3      | 60,45         | 59,27 | 56,93 | 53,56 | 49,30 | 44,36 | 38,95 | 33,33 | 27,73  | 22,41  |
| 0,4      | 60,11         | 58,49 | 55,65 | 51,72 | 46,89 | 41,37 | 35,41 | 29,28 | 23,23  | 17,55  |
| 0,5      | 59,01         | 56,96 | 53,63 | 49,19 | 43,84 | 37,81 | 31,38 | 24,81 | 18,41  | 12,45  |
| 0,6      | 57,06         | 54,59 | 50,80 | 45,89 | 40,07 | 33,60 | 26,76 | 19,85 | 13,17  | 7,02   |
| 0,7      | 54,18         | 51,28 | 47,07 | 41,73 | 35,50 | 28,65 | 21,48 | 14,31 | 7,44   | 1,17   |
| 0,8      | 50,27         | 46,97 | 42,35 | 36,62 | 30,03 | 22,87 | 15,45 | 8,10  | 1,12   | -5,17  |
| 0,9      | 45,26         | 41,56 | 36,56 | 30,48 | 23,58 | 16,18 | 8,59  | 1,13  | -5,87  | -12,10 |
| 1        | 39,05         | 34,97 | 29,61 | 23,22 | 16,08 | 8,50  | 0,80  | -6,68 | -13,61 | -19,70 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2   | 1,4   | 1,6    | 1,8    |

### 5.5.1.5. $\delta_1=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.52.  $\delta_1=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

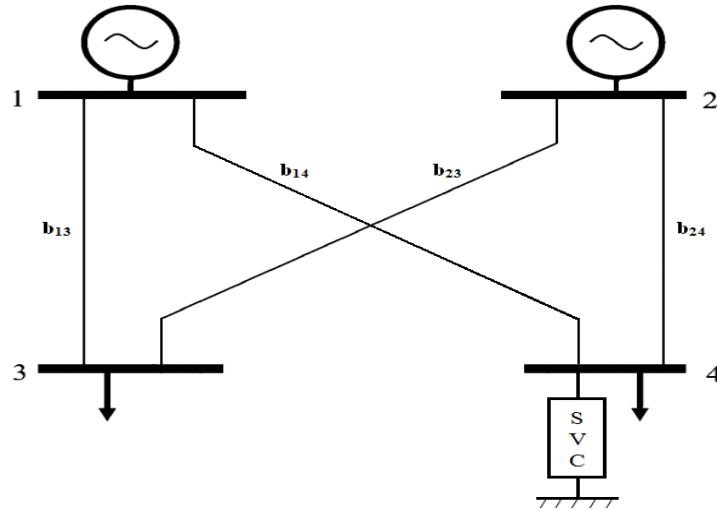
$\delta_1=1.6$  durumu için Şekil 5.52'den ve Tablo 5.35'ten, sistemin depolanan enerjisinin 62.32 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı

0 rad ile 1.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1.4$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4 > 1.4$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.35.  $\delta_1=1.6$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>                   | 59,24         | 59,44      | 58,77      | 57,30      | 55,10      | 52,28    | 48,99      | 45,38      | 41,62      | 37,89      |
| <b>0,1</b>                 | 60,81         | 60,62      | 59,43      | 57,30      | 54,34      | 50,70    | 46,55      | 42,08      | 37,48      | 32,98      |
| <b>0,2</b>                 | 61,86         | 61,30      | 59,60      | 56,86      | 53,20      | 48,81    | 43,87      | 38,61      | 33,27      | 28,09      |
| <b>0,3</b>                 | 62,32         | 61,40      | 59,22      | 55,90      | 51,60      | 46,51    | 40,87      | 34,91      | 28,91      | 23,12      |
| <b>0,4</b>                 | 62,09         | 60,82      | 58,19      | 54,34      | 49,45      | 43,74    | 37,45      | 30,88      | 24,29      | 17,99      |
| <b>0,5</b>                 | 61,11         | 59,49      | 56,43      | 52,09      | 46,66      | 40,39    | 33,55      | 26,43      | 19,35      | 12,62      |
| <b>0,6</b>                 | 59,27         | 57,31      | 53,85      | 49,06      | 43,15      | 36,39    | 29,06      | 21,49      | 14,00      | 6,92       |
| <b>0,7</b>                 | 56,50         | 54,21      | 50,37      | 45,17      | 38,83      | 31,64    | 23,91      | 15,96      | 8,15       | 0,80       |
| <b>0,8</b>                 | 52,71         | 50,09      | 45,91      | 40,33      | 33,62      | 26,07    | 18,00      | 9,77       | 1,71       | -5,81      |
| <b>0,9</b>                 | 47,81         | 44,88      | 40,37      | 34,46      | 27,44      | 19,59    | 11,27      | 2,82       | -5,40      | -13,02     |
| <b>1</b>                   | 41,72         | 38,49      | 33,67      | 27,48      | 20,19      | 12,12    | 3,61       | -4,97      | -13,26     | -20,89     |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

SVC'siz analizleri yapılan dört baralı güç sistemine SVC eklenerek tekrar enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. Böylece dört numaralı yük barasına bir SVC cihazı bağlanmasıyla sistemin gerilim kararlılığı sınırlarının artırılması hedeflenmiştir. Şekil 5.53'te SVC bağlı dört baralı güç sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.53. SVC'li dört baralı güç sistemi

SVC tarafından karşılanan reaktif gücün dinamik güç sistemi modeline eklenmesi yük durum denklemlerindeki yük açısı ve yük gerilimi denklemlerine  $Q_{SVC}$  reaktif güç ilavesi yapılmasıyla tamamlanır.

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93), (5.94), (5.95) ve (5.96) denklemleri generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_i$ ) koşulu altında SVC'li dört baralı güç sistemi için tekrar yazılabilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2) + P_3^0 \right\} \quad (5.111)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2) + P_4^0 + Q_{SVC} \right\} \quad (5.112)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\hat{\epsilon}} V_3^{-1} \left\{ -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_3 V_1 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13}) + Q_{D,3}(V_3) \right\} \quad (5.113)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\hat{\epsilon}} V_4^{-1} \left\{ -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) + V_4 V_2 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24}) + Q_{D,4}(V_4) - Q_{SVC} \right\} \quad (5.114)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ -P_1^0 \right\} \quad (5.115)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4) - P_2^0 \right\} \quad (5.116)$$

Analizlerde generatör açısı  $\delta_m$ 'nin oluşturduğu eşitlik ihmal edilmiştir. (5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemlerine göre (5.95), (5.96), (5.111), (5.112), (5.113), (5.114), (5.115) ve (5.116) denklemleri yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ \tilde{a}_3(\delta_3, V_3) + P_3^0 \right\} \quad (5.117)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ \tilde{a}_4(\delta_4, V_4) + P_4^0 + Q_{SVC} \right\} \quad (5.118)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\hat{\epsilon}} V_3^{-1} \left\{ \tilde{b}_3(\delta_3, V_3) + Q_{D,3}(V_3) \right\} \quad (5.119)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\hat{\epsilon}} V_4^{-1} \left\{ \tilde{b}_4(\delta_4, V_4) + Q_{D,4}(V_4) - Q_{SVC} \right\} \quad (5.120)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ -\tilde{a}_1(\delta_1, V_1) - P_1^0 \right\} \quad (5.121)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ -\tilde{a}_2(1,0) - P_2^0 \right\} \quad (5.122)$$

Şekil 5.53'teki güç sistemi için Lyapunov fonksiyonunun elde edilmesinde (5.117), (5.118), (5.119), (5.120), (5.121) ve (5.122) denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_3 \\ \dot{\delta}_4 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -D_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_3^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_4^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix} \quad (5.123)$$

(5.111), (5.112), (5.113), (5.114), (5.115) ve (5.116) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.123) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

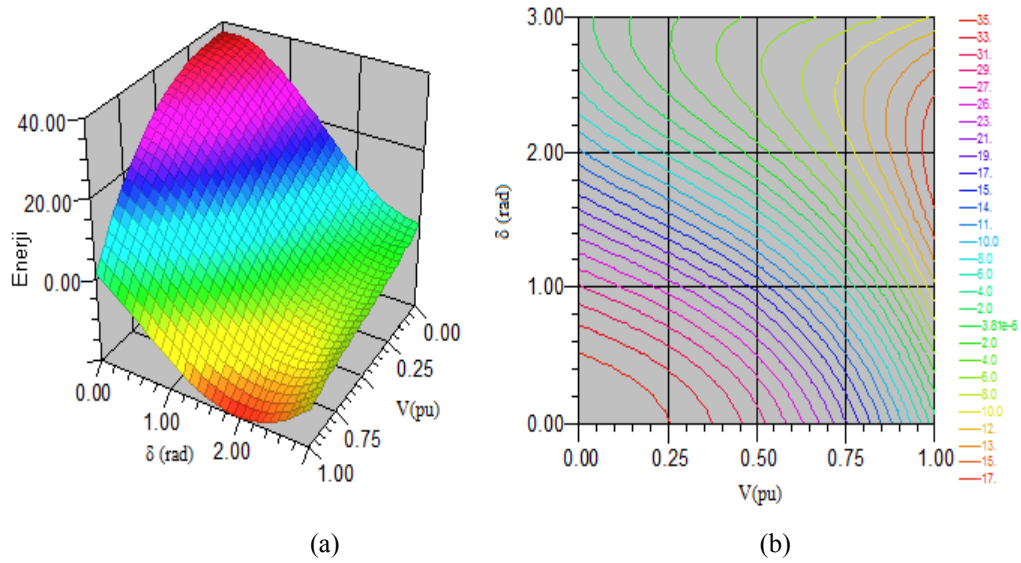
$(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.123) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.123) denkleminin sağ tarafında görülen (6x1) gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$V(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2) = \int_{(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)}^{(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2)} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\delta_3 \\ d\delta_4 \\ dV_3 \\ dV_4 \\ d\omega_1 \\ d\omega_2 \end{bmatrix} \quad (5.124)$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.124) denkleminde yerine konulursa, SVC'li dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.8) denklemi gibi elde edilir.

SVC'li dört baralı güç sistemi için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir. Bu analizlerle SVC'nin güç sisteminin gerilim kararlılığına etkileri incelenecektir.

### 5.5.1.6. $\delta_1=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.54.  $\delta_1=0$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

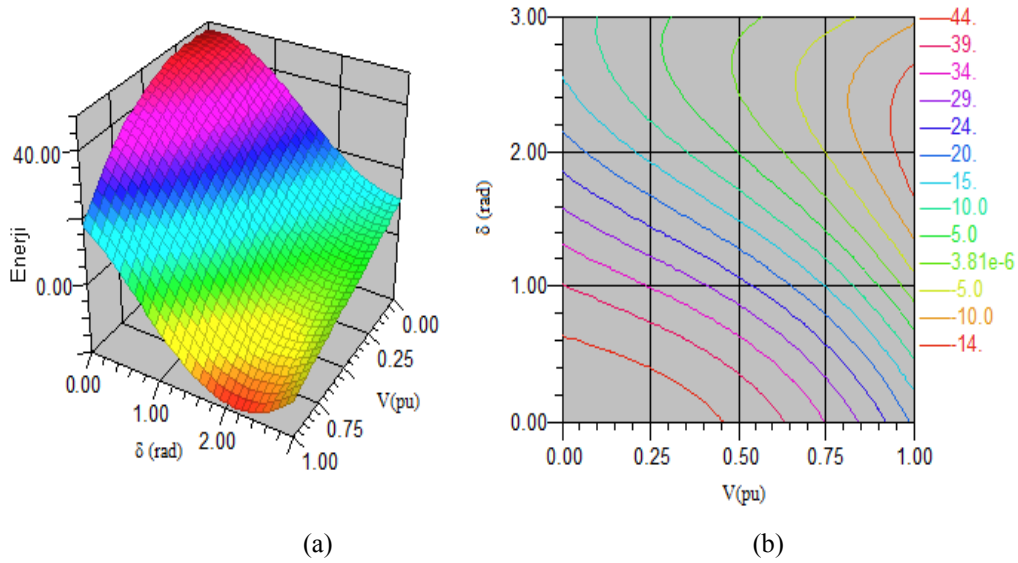
$\delta_1=0$  durumu için Şekil 5.54'ten ve Tablo 5.36'dan, sistemin depolanan enerjisinin 37.52 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. SVC'siz sistemde yük gerilimi 0.9 p.u ile 1 p.u arasındayken sistem kararsız çalışmaktaydı. SVC'li sistemde ise,  $\delta_1=0$  durumunda aynı yük gerilimi değerlerinde küçük yük açıları için sistemin kararlı çalıştığı görülmektedir.

Tablo 5.36.  $\delta_1=0$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>     | 37,32         | 37,52      | 36,85      | 35,37      | 33,17      | 30,36    | 27,07      | 23,46      | 19,70      | 15,97      |
| <b>0,1</b>   | 37,22         | 37,09      | 36,08      | 34,24      | 31,69      | 28,54    | 24,95      | 21,08      | 17,12      | 13,24      |
| <b>0,2</b>   | 36,61         | 36,17      | 34,84      | 32,69      | 29,84      | 26,43    | 22,61      | 18,58      | 14,50      | 10,58      |
| <b>0,3</b>   | 35,40         | 34,66      | 33,04      | 30,63      | 27,55      | 23,94    | 19,99      | 15,86      | 11,77      | 7,88       |
| <b>0,4</b>   | 33,50         | 32,48      | 30,60      | 27,97      | 24,71      | 20,99    | 16,97      | 12,85      | 8,82       | 5,06       |
| <b>0,5</b>   | 30,83         | 29,54      | 27,43      | 24,63      | 21,25      | 17,48    | 13,49      | 9,46       | 5,58       | 2,04       |
| <b>0,6</b>   | 27,29         | 25,75      | 23,45      | 20,51      | 17,08      | 13,33    | 9,44       | 5,58       | 1,95       | -1,28      |
| <b>0,7</b>   | 22,81         | 21,02      | 18,55      | 15,53      | 12,11      | 8,45     | 4,74       | 1,15       | -2,15      | -4,99      |
| <b>0,8</b>   | 17,28         | 15,27      | 12,66      | 9,60       | 6,25       | 2,76     | -0,69      | -3,93      | -6,81      | -9,16      |
| <b>0,9</b>   | 10,64         | 8,40       | 5,69       | 2,64       | -0,59      | -3,84    | -6,95      | -9,76      | -12,11     | -13,90     |
| <b>1</b>     | 2,77          | 0,34       | -2,45      | -5,45      | -8,49      | -11,44   | -14,12     | -16,40     | -18,16     | -19,28     |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |



### 5.5.1.7. $\delta_1=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



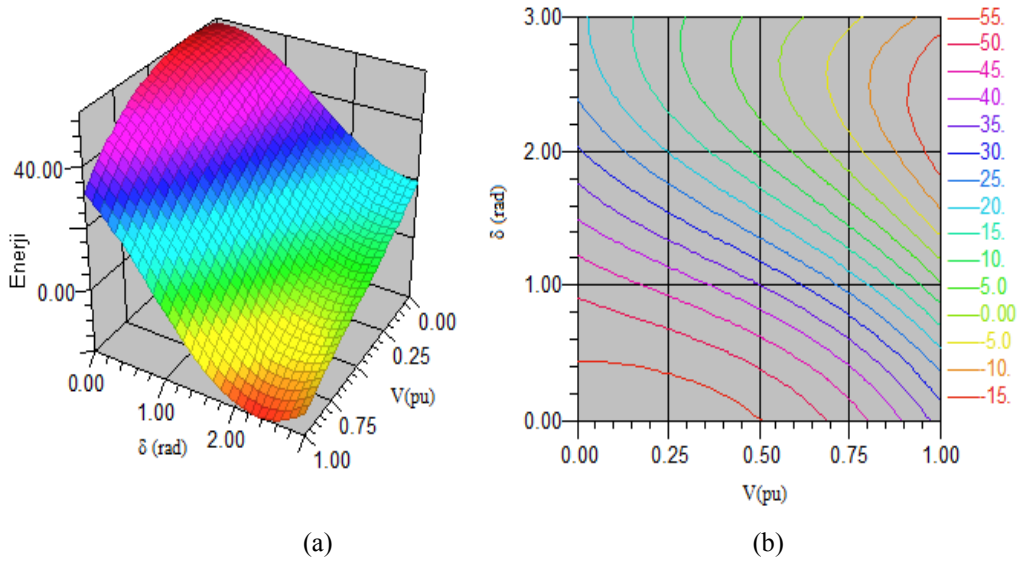
Şekil 5.55.  $\delta_1=0.4$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.55'ten ve Tablo 5.37'den  $\delta_1=0.4$  durumu için, sistemin depolanan enerjisinin 47.95 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4 > 1$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.37.  $\delta_1=0.4$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |  |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|--|
| <b>0</b>     | 47,37         | 47,56      | 46,90      | 45,42      | 43,22      | 40,40    | 37,11      | 33,50      | 29,75      | 26,01      |  |
| <b>0,1</b>   | 47,91         | 47,67      | 46,53      | 44,54      | 41,81      | 38,49    | 34,73      | 30,69      | 26,58      | 22,57      |  |
| <b>0,2</b>   | 47,95         | 47,29      | 45,69      | 43,23      | 40,05      | 36,29    | 32,13      | 27,76      | 23,38      | 19,19      |  |
| <b>0,3</b>   | 47,38         | 46,32      | 44,29      | 41,42      | 37,83      | 33,71    | 29,23      | 24,61      | 20,06      | 15,78      |  |
| <b>0,4</b>   | 46,13         | 44,67      | 42,25      | 39,00      | 35,08      | 30,66    | 25,95      | 21,17      | 16,53      | 12,24      |  |
| <b>0,5</b>   | 44,11         | 42,27      | 39,49      | 35,91      | 31,70      | 27,06    | 22,20      | 17,34      | 12,70      | 8,50       |  |
| <b>0,6</b>   | 41,22         | 39,01      | 35,90      | 32,04      | 27,61      | 22,82    | 17,88      | 13,03      | 8,49       | 4,46       |  |
| <b>0,7</b>   | 37,38         | 34,82      | 31,41      | 27,31      | 22,71      | 17,84    | 12,92      | 8,17       | 3,81       | 0,04       |  |
| <b>0,8</b>   | 32,50         | 29,60      | 25,92      | 21,63      | 16,93      | 12,05    | 7,22       | 2,65       | -1,44      | -4,85      |  |
| <b>0,9</b>   | 26,50         | 23,27      | 19,35      | 14,91      | 10,17      | 5,36     | 0,69       | -3,60      | -7,33      | -10,30     |  |
| <b>1</b>     | 19,28         | 15,75      | 11,61      | 7,07       | 2,35       | -2,33    | -6,74      | -10,68     | -13,96     | -16,40     |  |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |  |

### 5.5.1.8. $\delta_1=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



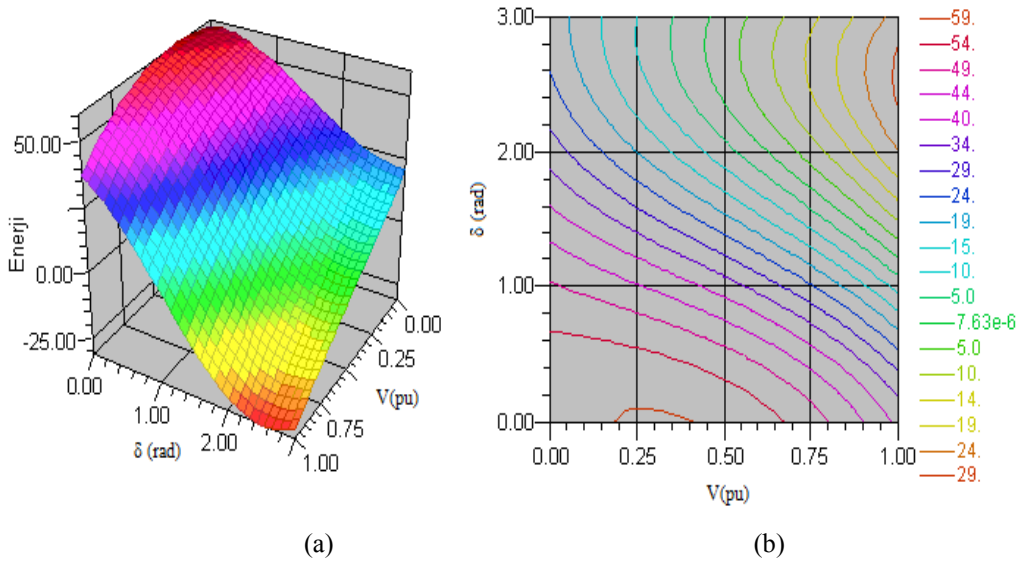
Şekil 5.56.  $\delta_1=0.8$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0.8$  durumu için Şekil 5.56'dan ve Tablo 5.38'den, sistemin depolanan enerjisinin 57.41 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1.4$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bunu aşan yük değerlerinde sistemin kararsızlığa gideceği grafiklerden ve tablodan açıkça görülmektedir.

Tablo 5.38.  $\delta_1=0.8$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |  |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|--|
| <b>0</b>                   | 55,74         | 55,93      | 55,27      | 53,79      | 51,59      | 48,78    | 45,49      | 41,88      | 38,12      | 34,38      |  |
| <b>0,1</b>                 | 56,83         | 56,54      | 55,31      | 53,21      | 50,36      | 46,88    | 42,95      | 38,74      | 34,45      | 30,28      |  |
| <b>0,2</b>                 | 57,41         | 56,66      | 54,89      | 52,22      | 48,76      | 44,69    | 40,20      | 35,48      | 30,76      | 26,24      |  |
| <b>0,3</b>                 | 57,40         | 56,19      | 53,92      | 50,71      | 46,72      | 42,14    | 37,16      | 32,02      | 26,95      | 22,17      |  |
| <b>0,4</b>                 | 56,71         | 55,05      | 52,31      | 48,62      | 44,16      | 39,12    | 33,74      | 28,27      | 22,93      | 17,99      |  |
| <b>0,5</b>                 | 55,26         | 53,17      | 49,98      | 45,85      | 40,97      | 35,56    | 29,86      | 24,14      | 18,63      | 13,60      |  |
| <b>0,6</b>                 | 52,95         | 50,45      | 46,85      | 42,33      | 37,09      | 31,37    | 25,44      | 19,54      | 13,96      | 8,94       |  |
| <b>0,7</b>                 | 49,71         | 46,81      | 42,83      | 37,95      | 32,42      | 26,47    | 20,37      | 14,41      | 8,83       | 3,91       |  |
| <b>0,8</b>                 | 45,45         | 42,16      | 37,83      | 32,65      | 26,88      | 20,77    | 14,59      | 8,64       | 3,16       | -1,57      |  |
| <b>0,9</b>                 | 40,09         | 36,42      | 31,76      | 26,33      | 20,38      | 14,18    | 8,01       | 2,15       | -3,13      | -7,59      |  |
| <b>1</b>                   | 33,53         | 29,51      | 24,55      | 18,91      | 12,85      | 6,63     | 0,54       | -5,14      | -10,14     | -14,24     |  |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |  |

### 5.5.1.9. $\delta_1=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



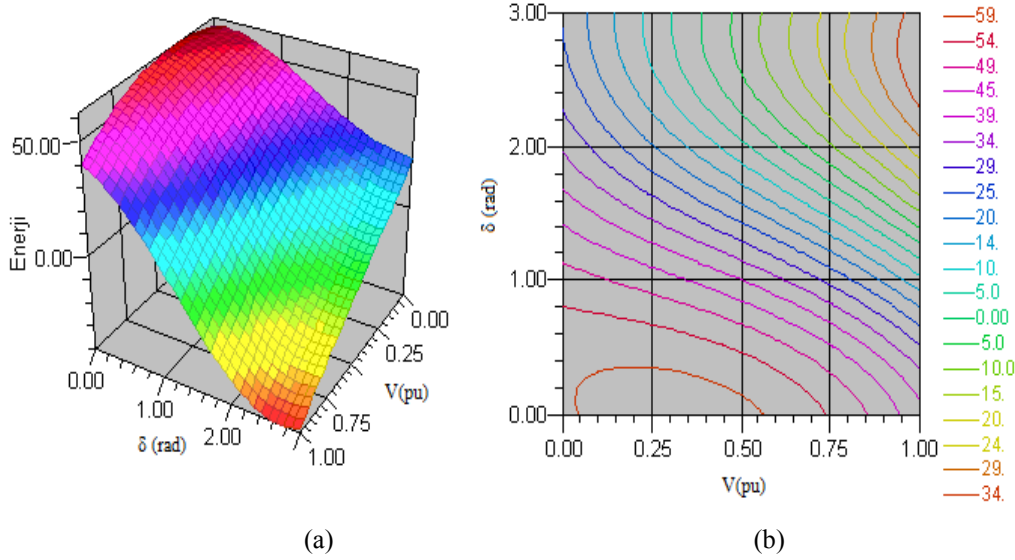
Şekil 5.57.  $\delta_1=1.2$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=1.2$  durumu için yukarıdaki şekillerden ve Tablo 5.39'dan, sistemin depolanan enerjisinin 63.85 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1.4$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4 > 1.4$  değerleri için kararsızlık baş gösterecektir.

Tablo 5.39.  $\delta_1=1.2$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |  |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|--|
| <b>0</b>     | 61,11         | 61,31      | 60,64      | 59,17      | 56,97      | 54,15    | 50,86      | 47,25      | 43,49      | 39,76      |  |
| <b>0,1</b>   | 62,56         | 62,30      | 61,05      | 58,90      | 55,96      | 52,38    | 48,31      | 43,95      | 39,49      | 35,15      |  |
| <b>0,2</b>   | 63,50         | 62,79      | 60,99      | 58,22      | 54,60      | 50,31    | 45,55      | 40,52      | 35,46      | 30,60      |  |
| <b>0,3</b>   | 63,85         | 62,69      | 60,38      | 57,03      | 52,80      | 47,88    | 42,50      | 36,89      | 31,32      | 26,02      |  |
| <b>0,4</b>   | 63,52         | 61,94      | 59,14      | 55,25      | 50,46      | 44,98    | 39,07      | 32,97      | 26,97      | 21,33      |  |
| <b>0,5</b>   | 62,42         | 60,43      | 57,17      | 52,80      | 47,51      | 41,54    | 35,17      | 28,67      | 22,34      | 16,44      |  |
| <b>0,6</b>   | 60,47         | 58,09      | 54,40      | 49,58      | 43,86      | 37,48    | 30,73      | 23,92      | 17,33      | 11,27      |  |
| <b>0,7</b>   | 57,59         | 54,83      | 50,74      | 45,52      | 39,42      | 32,70    | 25,66      | 18,61      | 11,87      | 5,73       |  |
| <b>0,8</b>   | 53,69         | 50,56      | 46,10      | 40,53      | 34,11      | 27,12    | 19,86      | 12,67      | 5,86       | -0,26      |  |
| <b>0,9</b>   | 48,68         | 45,19      | 40,40      | 34,53      | 27,85      | 20,65    | 13,27      | 6,02       | -0,77      | -6,79      |  |
| <b>1</b>     | 42,48         | 38,65      | 33,55      | 27,42      | 20,54      | 13,22    | 5,78       | -1,44      | -8,11      | -13,95     |  |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |  |

### 5.5.1.10. $\delta_1=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.58.  $\delta_1=1.6$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=1.6$  durumu için Şekil 5.58'den ve Tablo 5.40'tan, sistemin depolanan enerjisinin 65.74 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve dört numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_4 < 1.6$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_4 > 1.6$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.40.  $\delta_1=1.6$  rad durumu için dört numaralı baradaki enerji ölçümü

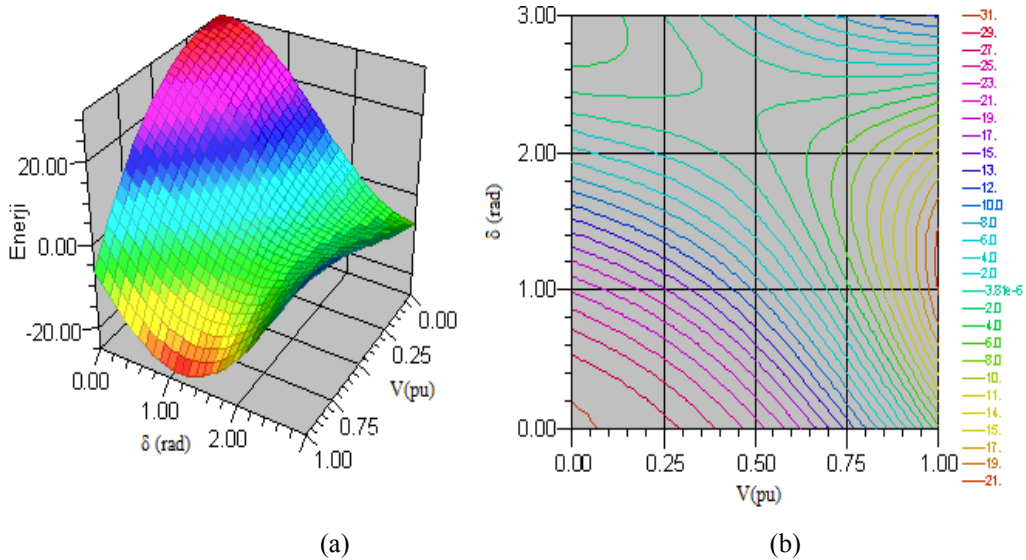
| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>                   | 62,64         | 62,84      | 62,17      | 60,70      | 58,50      | 55,68    | 52,39      | 48,78      | 45,02      | 41,29      |
| <b>0,1</b>                 | 64,21         | 64,03      | 62,84      | 60,71      | 57,75      | 54,12    | 49,97      | 45,50      | 40,91      | 36,41      |
| <b>0,2</b>                 | 65,27         | 64,72      | 63,04      | 60,30      | 56,66      | 52,27    | 47,34      | 42,10      | 36,77      | 31,59      |
| <b>0,3</b>                 | 65,74         | 64,85      | 62,69      | 59,40      | 55,12      | 50,06    | 44,43      | 38,50      | 32,52      | 26,76      |
| <b>0,4</b>                 | 65,54         | 64,31      | 61,72      | 57,91      | 53,06      | 47,39    | 41,15      | 34,61      | 28,07      | 21,81      |
| <b>0,5</b>                 | 64,58         | 63,02      | 60,03      | 55,76      | 50,39      | 44,18    | 37,41      | 30,36      | 23,34      | 16,67      |
| <b>0,6</b>                 | 62,77         | 60,91      | 57,54      | 52,84      | 47,03      | 40,35    | 33,12      | 25,64      | 18,25      | 11,26      |
| <b>0,7</b>                 | 60,04         | 57,88      | 54,17      | 49,09      | 42,88      | 35,82    | 28,21      | 20,39      | 12,70      | 5,48       |
| <b>0,8</b>                 | 56,29         | 53,84      | 49,82      | 44,41      | 37,87      | 30,48    | 22,58      | 14,51      | 6,62       | -0,74      |
| <b>0,9</b>                 | 51,44         | 48,72      | 44,42      | 38,72      | 31,91      | 24,27    | 16,15      | 7,91       | -0,09      | -7,50      |
| <b>1</b>                   | 45,40         | 42,43      | 37,87      | 31,94      | 24,91      | 17,10    | 8,85       | 0,52       | -7,50      | -14,88     |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

### 5.5.2. Dört numaralı baradaki yük sabitken üç numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı

Bu analizde üç numaralı baradaki yükte herhangi bir değişiklik olmadığı yani sabit bir yük bulunduğu kabul edilerek dört numaralı baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığı incelenecektir. Dört numaralı baradaki yük değişimi incelenirken bir numaralı baranın referans seçilmesinden dolayı burada herhangi bir işlem yapılmazken diğer generatör barası olan iki numaralı baradaki generatör açısı sıfırdan başlanarak 0.4 artımla 1.6 değerine kadar değiştirilip sistemin kararlılığı incelenecektir.

Analizde kullanılacak enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.7) denklemdir. Bu analizde kullanılacak durum değişkenleri; üç numaralı baradaki yük gerilimi ( $V_3$ ), dört numaralı baradaki yük gerilimi ( $V_4$ ), üç numaralı baradaki yük açısı ( $\delta_3$ ), dört numaralı baradaki yük açısı ( $\delta_4$ ) ve sistem frekansları ( $\omega_1, \omega_2$ )'dir.

#### 5.5.2.1. $\delta_1=0$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.59.  $\delta_1=0$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

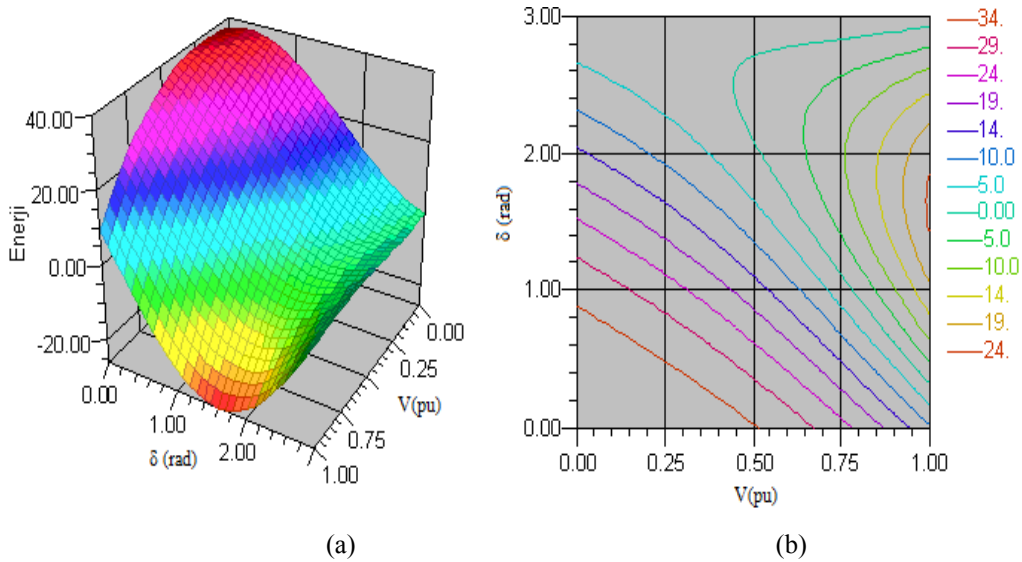
Şekil 5.59'dan ve Tablo 5.41'den  $\delta_1=0$  durumu için, sistemin depolanan enerjisinin 32.03 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 0.8 p.u ile 1 p.u arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun negatif değerler almakta olduğu görülmektedir. Bu

nedenle sistemin  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı altında çalışması mümkün değildir ve sistemin  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı altında yüksek gerilimlerde çalışmasına kararsızdır denir.

Tablo 5.41.  $\delta_1=0$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>                   | 32,03         | 31,99      | 31,09      | 29,37      | 26,93      | 23,88    | 20,35      | 16,50      | 12,50      | 8,53       |
| <b>0,1</b>                 | 31,91         | 31,36      | 30,00      | 27,91      | 25,18      | 21,93    | 18,32      | 14,51      | 10,65      | 6,92       |
| <b>0,2</b>                 | 31,22         | 30,17      | 28,39      | 25,96      | 23,00      | 19,65    | 16,04      | 12,34      | 8,72       | 5,34       |
| <b>0,3</b>                 | 29,89         | 28,35      | 26,17      | 23,45      | 20,32      | 16,92    | 13,40      | 9,91       | 6,62       | 3,66       |
| <b>0,4</b>                 | 27,82         | 25,79      | 23,24      | 20,28      | 17,04      | 13,67    | 10,31      | 7,13       | 4,25       | 1,82       |
| <b>0,5</b>                 | 24,90         | 22,41      | 19,51      | 16,35      | 13,06      | 9,79     | 6,68       | 3,89       | 1,52       | -0,29      |
| <b>0,6</b>                 | 21,06         | 18,10      | 14,89      | 11,56      | 8,28       | 5,19     | 2,42       | 0,10       | -1,66      | -2,77      |
| <b>0,7</b>                 | 16,19         | 12,77      | 9,27       | 5,84       | 2,63       | -0,22    | -2,58      | -4,33      | -5,39      | -5,70      |
| <b>0,8</b>                 | 10,20         | 6,34       | 2,58       | -0,92      | -4,01      | -6,54    | -8,39      | -9,49      | -9,76      | -9,18      |
| <b>0,9</b>                 | 3,00          | -1,30      | -5,29      | -8,82      | -11,71     | -13,85   | -15,13     | -15,47     | -14,86     | -13,30     |
| <b>1</b>                   | -5,51         | -10,23     | -14,43     | -17,93     | -20,58     | -22,25   | -22,87     | -22,38     | -20,79     | -18,16     |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

### 5.5.2.2. $\delta_1=0.4$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.60.  $\delta_1=0.4$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

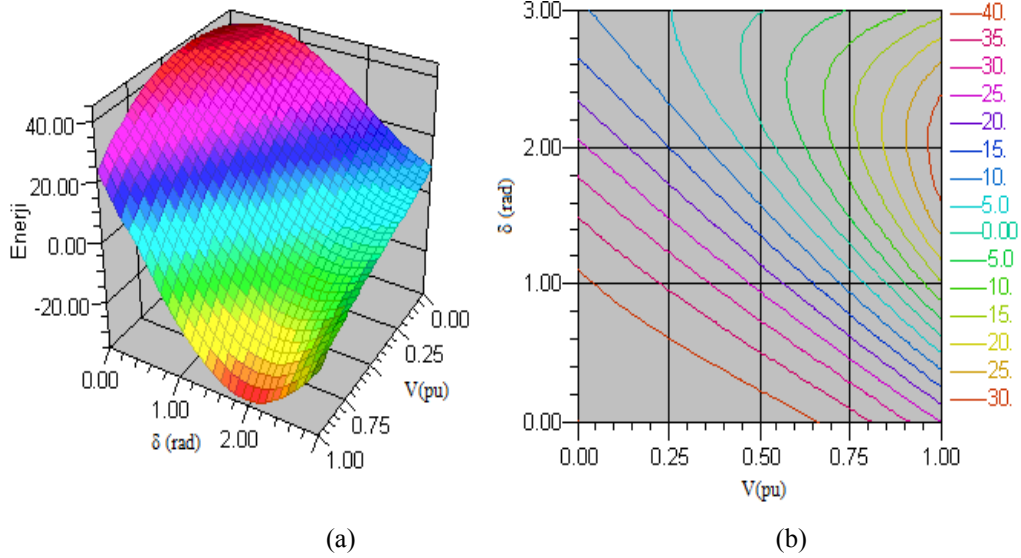
Şekil 5.60'den ve Tablo 5.42'den  $\delta_1=0.4$  durumu için, sistemin depolanan enerjisinin 38.53 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.4 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 0.4$  aralığında

kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 0.4$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.42.  $\delta_1=0.4$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0        | 37,27         | 38,23 | 38,33 | 37,57 | 36,01  | 33,72  | 30,81  | 27,42  | 23,69  | 19,79  |
| 0,1      | 38,17         | 38,42 | 37,82 | 36,41 | 34,27  | 31,49  | 28,20  | 24,55  | 20,70  | 16,82  |
| 0,2      | 38,53         | 38,06 | 36,77 | 34,74 | 32,05  | 28,83  | 25,23  | 21,40  | 17,52  | 13,75  |
| 0,3      | 38,26         | 37,06 | 35,09 | 32,45 | 29,26  | 25,66  | 21,82  | 17,89  | 14,06  | 10,50  |
| 0,4      | 37,27         | 35,33 | 32,68 | 29,46 | 25,81  | 21,89  | 17,87  | 13,93  | 10,24  | 6,97   |
| 0,5      | 35,46         | 32,76 | 29,45 | 25,67 | 21,60  | 17,41  | 13,29  | 9,41   | 5,95   | 3,06   |
| 0,6      | 32,75         | 29,28 | 25,30 | 20,99 | 16,54  | 12,14  | 7,99   | 4,25   | 1,10   | -1,31  |
| 0,7      | 29,02         | 24,77 | 20,14 | 15,33 | 10,54  | 5,99   | 1,86   | -1,65  | -4,40  | -6,25  |
| 0,8      | 24,20         | 19,16 | 13,88 | 8,59  | 3,50   | -1,15  | -5,17  | -8,38  | -10,64 | -11,84 |
| 0,9      | 18,19         | 12,35 | 6,43  | 0,67  | -4,66  | -9,36  | -13,21 | -16,03 | -17,72 | -18,17 |
| 1        | 10,90         | 4,24  | -2,32 | -8,51 | -14,06 | -18,74 | -22,34 | -24,71 | -25,73 | -25,35 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8    | 1      | 1,2    | 1,4    | 1,6    | 1,8    |

### 5.5.2.3. $\delta_1=0.8$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.61.  $\delta_1=0.8$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0.8$  durumu için Şekil 5.61'den ve Tablo 5.43'ten, sistemin depolanan enerjisinin 43.75 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.8 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 0.8$  aralığında

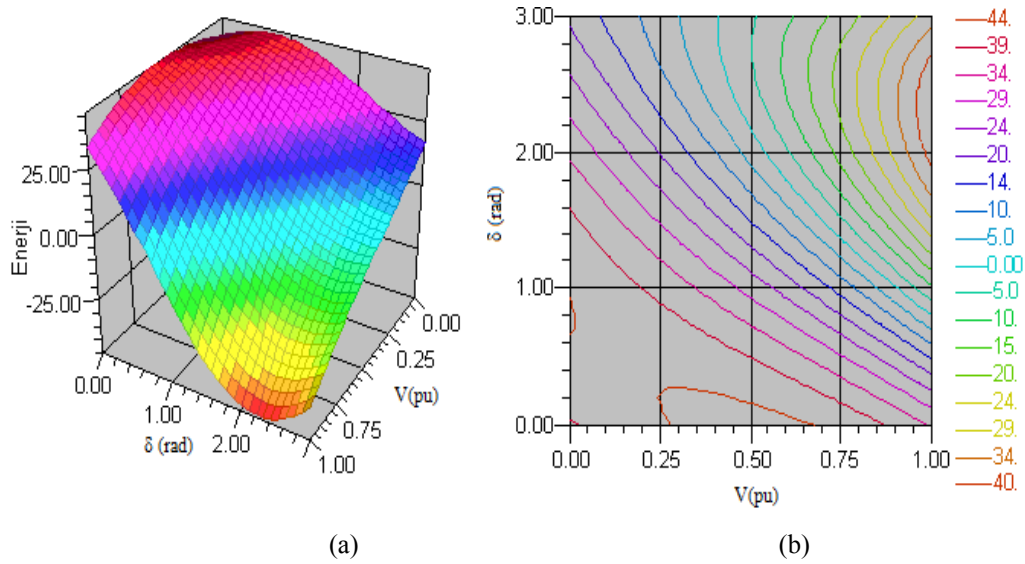


kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 0.8$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.43.  $\delta_1=0.8$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |       |        |        |        |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0        | 39,86         | 41,70 | 42,75 | 43,00 | 42,43 | 41,10  | 39,08  | 36,45  | 33,34  | 29,90  |
| 0,1      | 41,64         | 42,68 | 42,89 | 42,28 | 40,89 | 38,79  | 36,09  | 32,90  | 29,37  | 25,66  |
| 0,2      | 42,95         | 43,15 | 42,50 | 41,04 | 38,85 | 36,02  | 32,69  | 29,01  | 25,13  | 21,23  |
| 0,3      | 43,68         | 43,02 | 41,50 | 39,20 | 36,22 | 32,70  | 28,79  | 24,67  | 20,52  | 16,51  |
| 0,4      | 43,75         | 42,20 | 39,79 | 36,65 | 32,90 | 28,73  | 24,30  | 19,81  | 15,45  | 11,42  |
| 0,5      | 43,06         | 40,59 | 37,28 | 33,30 | 28,81 | 24,01  | 19,11  | 14,31  | 9,83   | 5,86   |
| 0,6      | 41,52         | 38,09 | 33,88 | 29,06 | 23,85 | 18,46  | 13,14  | 8,10   | 3,56   | -0,27  |
| 0,7      | 39,04         | 34,63 | 29,49 | 23,84 | 17,92 | 11,99  | 6,29   | 1,07   | -3,45  | -7,06  |
| 0,8      | 35,52         | 30,09 | 24,01 | 17,54 | 10,93 | 4,49   | -1,53  | -6,87  | -11,29 | -14,61 |
| 0,9      | 30,86         | 24,40 | 17,37 | 10,06 | 2,80  | -4,13  | -10,41 | -15,80 | -20,06 | -22,99 |
| 1        | 24,99         | 17,45 | 9,45  | 1,32  | -6,58 | -13,95 | -20,46 | -25,83 | -29,85 | -32,32 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1      | 1,2    | 1,4    | 1,6    | 1,8    |

#### 5.5.2.4. $\delta_1=1.2$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.62.  $\delta_1=1.2$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.62'den ve Tablo 5.44'ten  $\delta_1=1.2$  durumu için, sistemin depolanan enerjisinin 46.48 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler

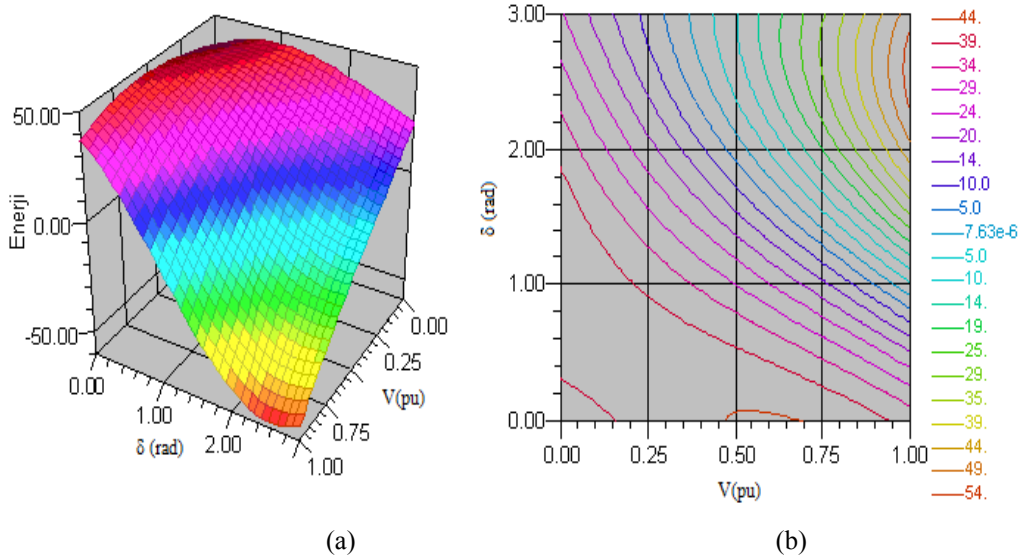


almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 1$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 1$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.44.  $\delta_1=1.2$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V        | Enerji Ölçümü |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0        | 39,39         | 41,85 | 43,67 | 44,79 | 45,19 | 44,86 | 43,83  | 42,16  | 39,93  | 37,25  |
| 0,1      | 41,77         | 43,46 | 44,40 | 44,58 | 44,00 | 42,70 | 40,76  | 38,25  | 35,31  | 32,06  |
| 0,2      | 43,77         | 44,64 | 44,67 | 43,89 | 42,33 | 40,09 | 37,25  | 33,96  | 30,35  | 26,59  |
| 0,3      | 45,28         | 45,29 | 44,39 | 42,63 | 40,10 | 36,92 | 33,22  | 29,18  | 24,97  | 20,77  |
| 0,4      | 46,22         | 45,32 | 43,45 | 40,71 | 37,20 | 33,10 | 28,58  | 23,83  | 19,06  | 14,49  |
| 0,5      | 46,48         | 44,64 | 41,78 | 38,02 | 33,55 | 28,54 | 23,22  | 17,81  | 12,55  | 7,66   |
| 0,6      | 45,99         | 43,16 | 39,27 | 34,49 | 29,04 | 23,15 | 17,06  | 11,03  | 5,33   | 0,19   |
| 0,7      | 44,64         | 40,78 | 35,83 | 30,02 | 23,59 | 16,82 | 10,00  | 3,40   | -2,69  | -8,02  |
| 0,8      | 42,35         | 37,40 | 31,37 | 24,51 | 17,11 | 9,48  | 1,94   | -5,19  | -11,61 | -17,05 |
| 0,9      | 39,01         | 32,94 | 25,79 | 17,87 | 9,49  | 1,02  | -7,19  | -14,81 | -21,51 | -27,00 |
| 1        | 34,53         | 27,30 | 19,01 | 10,00 | 0,65  | -8,64 | -17,51 | -25,57 | -32,49 | -37,97 |
| $\delta$ | 0             | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2    | 1,4    | 1,6    | 1,8    |

### 5.5.2.5. $\delta_1=1.6$ rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



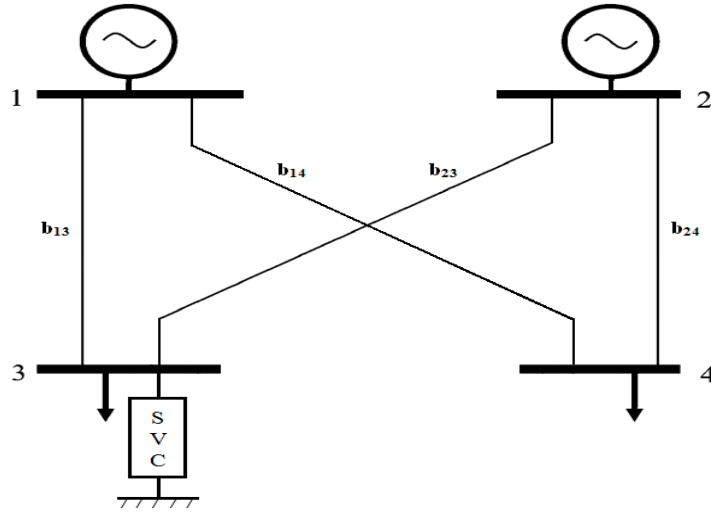
Şekil 5.63.  $\delta_1=1.6$  rad seçildiğinde sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=1.6$  durumu için Şekil 5.63'ten ve Tablo 5.45'ten, sistemin depolanan enerjisinin 45.46 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 1$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 1$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.45.  $\delta_1=1.6$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>   | 35,93         | 38,66      | 40,93      | 42,68      | 43,84      | 44,39    | 44,32      | 43,65      | 42,42      | 40,70      |
| <b>0,1</b> | 38,54         | 40,64      | 42,12      | 42,95      | 43,11      | 42,60    | 41,46      | 39,75      | 37,56      | 35,00      |
| <b>0,2</b> | 40,86         | 42,28      | 42,94      | 42,82      | 41,95      | 40,38    | 38,18      | 35,47      | 32,36      | 28,99      |
| <b>0,3</b> | 42,81         | 43,50      | 43,29      | 42,20      | 40,29      | 37,65    | 34,41      | 30,70      | 26,70      | 22,58      |
| <b>0,4</b> | 44,29         | 44,20      | 43,08      | 40,99      | 38,02      | 34,32    | 30,04      | 25,37      | 20,51      | 15,67      |
| <b>0,5</b> | 45,20         | 44,29      | 42,22      | 39,10      | 35,06      | 30,28    | 24,97      | 19,36      | 13,68      | 8,18       |
| <b>0,6</b> | 45,46         | 43,67      | 40,62      | 36,43      | 31,31      | 25,45    | 19,13      | 12,59      | 6,12       | 0,00       |
| <b>0,7</b> | 44,96         | 42,25      | 38,17      | 32,90      | 26,67      | 19,74    | 12,40      | 4,97       | -2,25      | -8,96      |
| <b>0,8</b> | 43,62         | 39,93      | 34,79      | 28,41      | 21,05      | 13,04    | 4,71       | -3,60      | -11,54     | -18,78     |
| <b>0,9</b> | 41,34         | 36,63      | 30,38      | 22,86      | 14,37      | 5,27     | -4,05      | -13,22     | -21,84     | -29,56     |
| <b>1</b>   | 38,03         | 32,25      | 24,86      | 16,16      | 6,52       | -3,66    | -13,97     | -23,96     | -33,24     | -41,41     |
| $\delta$   | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

SVC'siz analizleri yapılan dört baralı güç sistemine SVC eklenerek tekrar enerji fonksiyonu analizleri yapılacaktır. Böylece üç numaralı yük barasına bir SVC cihazı bağlanmasıyla sistemin gerilim kararlılığı sınırlarının artırılması hedeflenmiştir. Şekil 5.64'te SVC bağlı dört baralı güç sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.64. SVC'li dört baralı güç sistemi

SVC tarafından karşılanan reaktif gücün dinamik güç sistemi modeline eklenmesi yük durum denklemlerindeki yük açısı ve yük gerilimi denklemlerine  $Q_{SVC}$  reaktif güç ilavesi yapılmasıyla tamamlanır.

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93), (5.94), (5.95) ve (5.96) denklemleri generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ( $P_m=P_i$ ) koşulu altında SVC'li dört baralı güç sistemi için tekrar yazılabilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2) + P_3^0 + Q_{SVC} \right\} \quad (5.125)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2) + P_4^0 \right\} \quad (5.126)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_3^{-1} \left\{ -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_3 V_1 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13}) + Q_{D,3}(V_3) - Q_{SVC} \right\} \quad (5.127)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_4^{-1} \left\{ -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) + V_4 V_2 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24}) + Q_{D,4}(V_4) \right\} \quad (5.128)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ -P_1^0 \right\} \quad (5.129)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4) - P_2^0 \right\} \quad (5.130)$$

Analizlerde generatör açısı  $\delta_m$ 'nin oluşturduğu eşitlik ihmal edilmiştir. (5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemlerine göre (5.95), (5.96), (5.125), (5.126), (5.127), (5.128), (5.129) ve (5.130) denklemleri yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\dot{\delta}_3 = -D_3^{-1} \left\{ \tilde{a}_3(\delta_3, V_3) + P_3^0 + Q_{SVC} \right\} \quad (5.131)$$

$$\dot{\delta}_4 = -D_4^{-1} \left\{ \tilde{a}_4(\delta_4, V_4) + P_4^0 \right\} \quad (5.132)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_3^{-1} \left\{ \tilde{b}_3(\delta_3, V_3) + Q_{D,3}(V_3) - Q_{SVC} \right\} \quad (5.133)$$

$$\dot{V}_4 = -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_4^{-1} \left\{ \tilde{b}_4(\delta_4, V_4) + Q_{D,4}(V_4) \right\} \quad (5.134)$$

$$\dot{\omega}_1 = -M_1^{-1} \left\{ -\tilde{a}_1(\delta_1, V_1) - P_1^0 \right\} \quad (5.135)$$

$$\dot{\omega}_2 = -M_2^{-1} \left\{ -\tilde{a}_2(1,0) - P_2^0 \right\} \quad (5.136)$$

Şekil 5.64'teki güç sistemi için Lyapunov fonksiyonunun elde edilmesinde (5.131), (5.132), (5.133), (5.134), (5.135) ve (5.136) denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_3 \\ \dot{\delta}_4 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -D_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_3^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\dot{\epsilon}} V_4^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix} \quad (5.137)$$

(5.125), (5.126), (5.127), (5.128), (5.129) ve (5.130) denklemleriyle tanımlanan sistem için (5.137) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

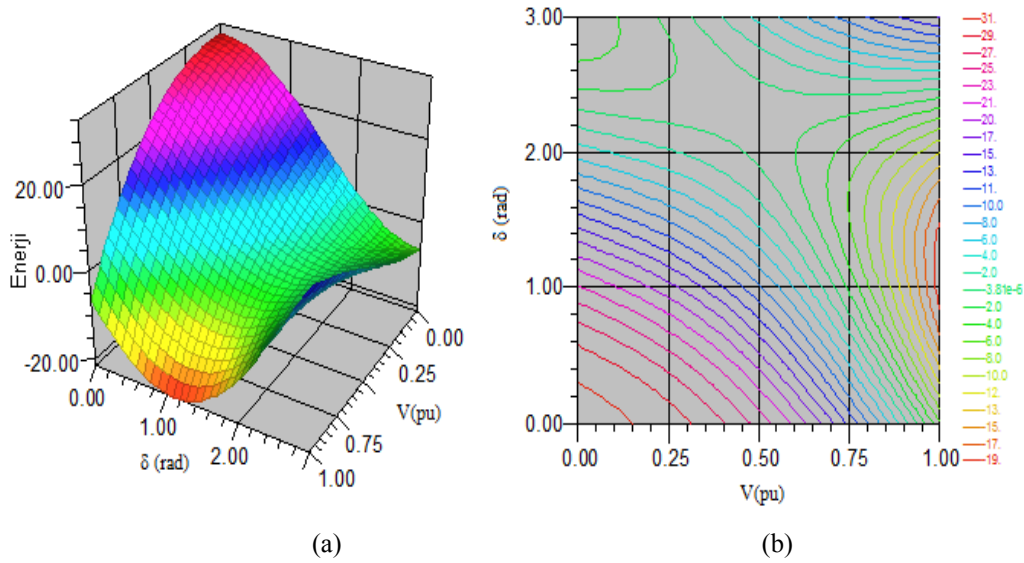
$(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)$ 'ın bir denge noktası için, (5.137) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((5.137) denkleminin sağ tarafında görülen (6x1) gradiyent matris) elde edilebilir ve böylece (3.44) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (3.44) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$V(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2) = \int_{(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, \omega_1^0, \omega_2^0)}^{(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, \omega_1, \omega_2)} \begin{bmatrix} a(\delta_3, V_3) \\ a(\delta_4, V_4) \\ b(\delta_3, V_3) \\ b(\delta_4, V_4) \\ a(\delta_1, V_1) \\ a(\delta_2, V_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\delta_3 \\ d\delta_4 \\ dV_3 \\ dV_4 \\ d\omega_1 \\ d\omega_2 \end{bmatrix} \quad (5.138)$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.138) denkleminde yerine konulursa, SVC'li dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu Ek A'da görülen (A.9) denklemi gibi elde edilir.

SVC'li dört baralı güç sistemi için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan beş analiz içerecektir. Bu analizlerle SVC'nin güç sisteminin gerilim kararlılığına etkileri incelenecektir.

### 5.5.2.6. $\delta_1=0$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



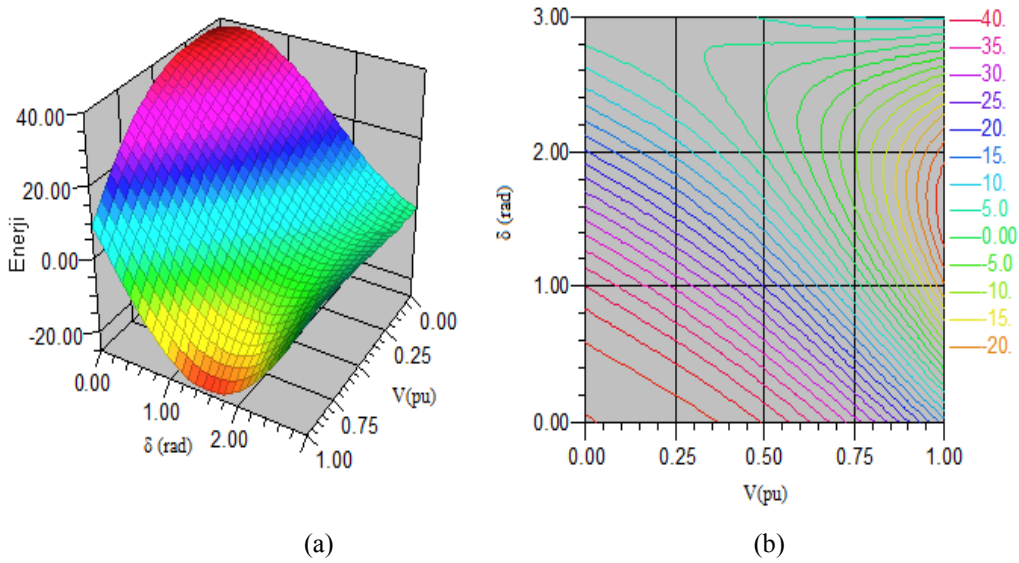
Şekil 5.65.  $\delta_1=0$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0$  durumu için Şekil 5.65'ten ve Tablo 5.46'dan, sistemin depolanan enerjisinin 32.42 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 0.9 p.u ile 1 p.u arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun negatif değerler almakta olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistemin  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı altında çalışması mümkün değildir ve sistemin  $\delta_1=0$  radyanlık generatör açısı altında yüksek gerilimlerde çalışmasına kararsızdır denir. SVC eklenmiş olmasına rağmen, sistem yüksek gerilim değerlerinde kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.46.  $\delta_1=0$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>     | 32,42         | 32,38      | 31,48      | 29,76      | 27,32      | 24,27    | 20,74      | 16,89      | 12,89      | 8,92       |
| <b>0,1</b>   | 32,30         | 31,75      | 30,40      | 28,30      | 25,58      | 22,34    | 18,73      | 14,92      | 11,06      | 7,34       |
| <b>0,2</b>   | 31,61         | 30,57      | 28,80      | 26,38      | 23,43      | 20,08    | 16,49      | 12,80      | 9,19       | 5,81       |
| <b>0,3</b>   | 30,27         | 28,75      | 26,60      | 23,90      | 20,79      | 17,42    | 13,92      | 10,45      | 7,18       | 4,25       |
| <b>0,4</b>   | 28,18         | 26,20      | 23,69      | 20,76      | 17,56      | 14,23    | 10,92      | 7,77       | 4,94       | 2,55       |
| <b>0,5</b>   | 25,24         | 22,81      | 19,98      | 16,87      | 13,65      | 10,44    | 7,40       | 4,67       | 2,37       | 0,61       |
| <b>0,6</b>   | 21,36         | 18,49      | 15,37      | 12,14      | 8,95       | 5,94     | 3,26       | 1,04       | -0,63      | -1,65      |
| <b>0,7</b>   | 16,43         | 13,14      | 9,77       | 6,46       | 3,37       | 0,64     | -1,59      | -3,21      | -4,15      | -4,34      |
| <b>0,8</b>   | 10,38         | 6,68       | 3,08       | -0,26      | -3,19      | -5,55    | -7,25      | -8,18      | -8,29      | -7,55      |
| <b>0,9</b>   | 3,09          | -1,00      | -4,80      | -8,12      | -10,81     | -12,74   | -13,81     | -13,95     | -13,14     | -11,38     |
| <b>1</b>     | -5,53         | -10,00     | -13,95     | -17,20     | -19,60     | -21,02   | -21,38     | -20,64     | -18,80     | -15,92     |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

### 5.5.2.7. $\delta_1=0.4$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



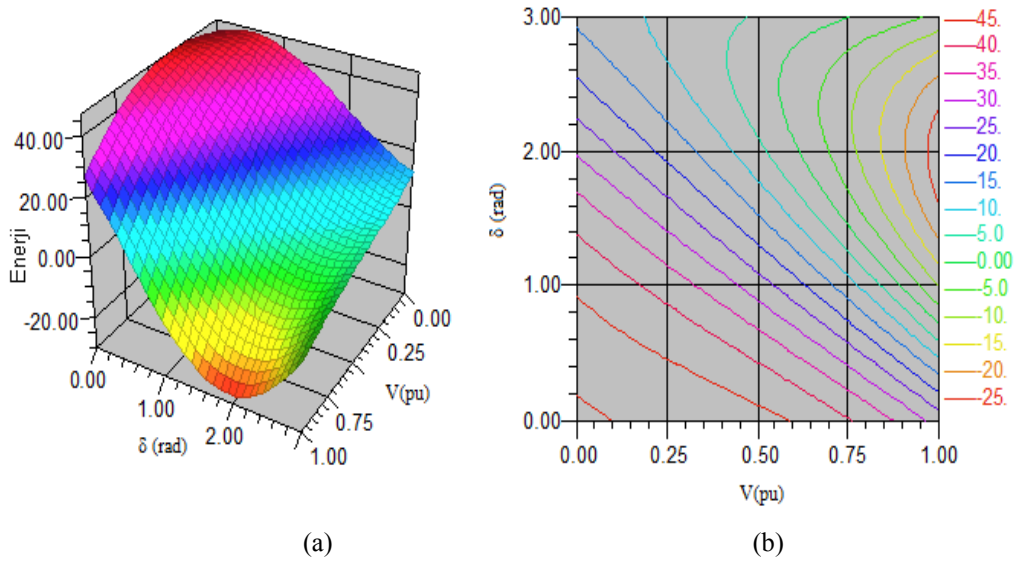
Şekil 5.66.  $\delta_1=0.4$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

Şekil 5.66'dan ve Tablo 5.47'den  $\delta_1=0.4$  durumu için, sistemin depolanan enerjisinin 40.33 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.6 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 0.6$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 0.6$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.47.  $\delta_1=0.4$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>                   | 37,66         | 38,62      | 38,72      | 37,96      | 36,40      | 34,11    | 31,21      | 27,81      | 24,08      | 20,18      |
| <b>0,1</b>                 | 39,13         | 39,37      | 38,77      | 37,37      | 35,22      | 32,44    | 29,15      | 25,50      | 21,65      | 17,77      |
| <b>0,2</b>                 | 40,05         | 39,58      | 38,29      | 36,25      | 33,56      | 30,35    | 26,74      | 22,92      | 19,03      | 15,26      |
| <b>0,3</b>                 | 40,33         | 39,13      | 37,16      | 34,52      | 31,33      | 27,73    | 23,89      | 19,96      | 16,13      | 12,57      |
| <b>0,4</b>                 | 39,89         | 37,94      | 35,30      | 32,08      | 28,43      | 24,50    | 20,49      | 16,55      | 12,86      | 9,58       |
| <b>0,5</b>                 | 38,62         | 35,92      | 32,60      | 28,83      | 24,76      | 20,57    | 16,44      | 12,57      | 9,10       | 6,21       |
| <b>0,6</b>                 | 36,43         | 32,96      | 28,98      | 24,67      | 20,22      | 15,82    | 11,67      | 7,93       | 4,78       | 2,37       |
| <b>0,7</b>                 | 33,21         | 28,96      | 24,33      | 19,52      | 14,73      | 10,18    | 6,05       | 2,54       | -0,21      | -2,06      |
| <b>0,8</b>                 | 28,89         | 23,85      | 18,57      | 13,27      | 8,19       | 3,53     | -0,49      | -3,70      | -5,96      | -7,16      |
| <b>0,9</b>                 | 23,35         | 17,51      | 11,58      | 5,83       | 0,49       | -4,20    | -8,05      | -10,88     | -12,56     | -13,02     |
| <b>1</b>                   | 16,50         | 9,85       | 3,29       | -2,90      | -8,45      | -13,13   | -16,74     | -19,10     | -20,13     | -19,75     |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

### 5.5.2.8. $\delta_1=0.8$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



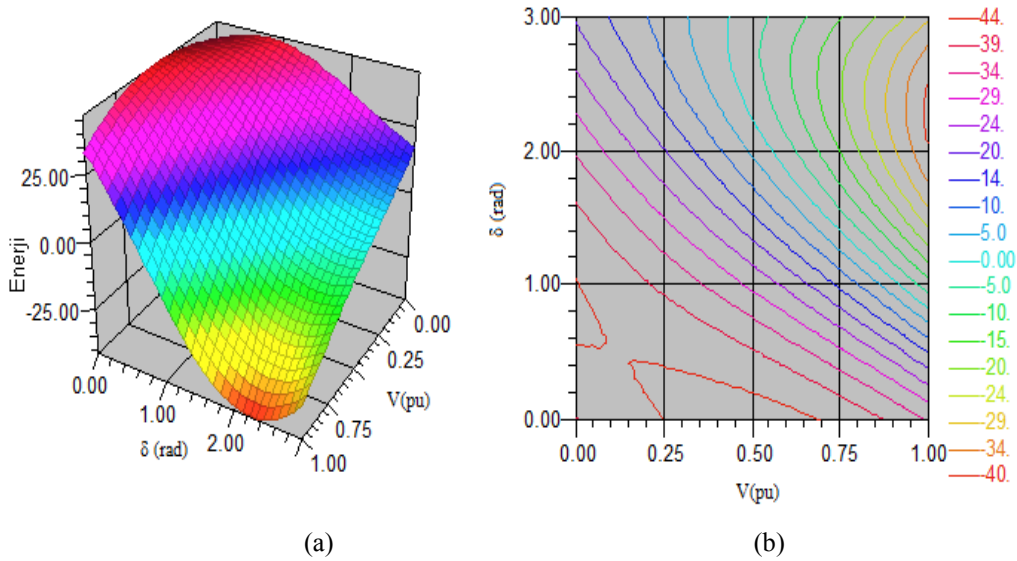
Şekil 5.67.  $\delta_1=0.8$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=0.8$  durumu için Şekil 5.67'den ve Tablo 5.48'den, sistemin depolanan enerjisinin 47.12 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 0.8 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 0.8$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bunu aşan yük değerlerinde sistemin kararsızlığa gideceği grafiklerden ve tablodan açıkça görülmektedir.

Tablo 5.48.  $\delta_1=0.8$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>     | 43,26         | 45,10      | 46,15      | 46,40      | 45,83      | 44,50    | 42,48      | 39,85      | 36,74      | 33,30      |
| <b>0,1</b>   | 45,04         | 46,08      | 46,29      | 45,69      | 44,30      | 42,21    | 39,51      | 36,32      | 32,79      | 29,08      |
| <b>0,2</b>   | 46,34         | 46,56      | 45,92      | 44,47      | 42,29      | 39,47    | 36,15      | 32,48      | 28,61      | 24,72      |
| <b>0,3</b>   | 47,07         | 46,43      | 44,94      | 42,66      | 39,70      | 36,21    | 32,32      | 28,23      | 24,10      | 20,12      |
| <b>0,4</b>   | 47,12         | 45,62      | 43,25      | 40,15      | 36,45      | 32,31    | 27,92      | 23,47      | 19,16      | 15,17      |
| <b>0,5</b>   | 46,41         | 44,00      | 40,77      | 36,85      | 32,42      | 27,69    | 22,85      | 18,12      | 13,70      | 9,79       |
| <b>0,6</b>   | 44,84         | 41,50      | 37,38      | 32,66      | 27,54      | 22,25    | 17,01      | 12,07      | 7,62       | 3,88       |
| <b>0,7</b>   | 42,30         | 38,02      | 33,01      | 27,48      | 21,69      | 15,89    | 10,31      | 5,22       | 0,83       | -2,66      |
| <b>0,8</b>   | 38,71         | 33,46      | 27,54      | 21,23      | 14,79      | 8,51     | 2,66       | -2,51      | -6,77      | -9,92      |
| <b>0,9</b>   | 33,97         | 27,72      | 20,89      | 13,80      | 6,74       | 0,03     | -6,05      | -11,23     | -15,27     | -18,00     |
| <b>1</b>     | 27,99         | 20,71      | 12,96      | 5,10       | -2,55      | -9,66    | -15,91     | -21,02     | -24,78     | -27,00     |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |

### 5.5.2.9. $\delta_1=1.2$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.68.  $\delta_1=1.2$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

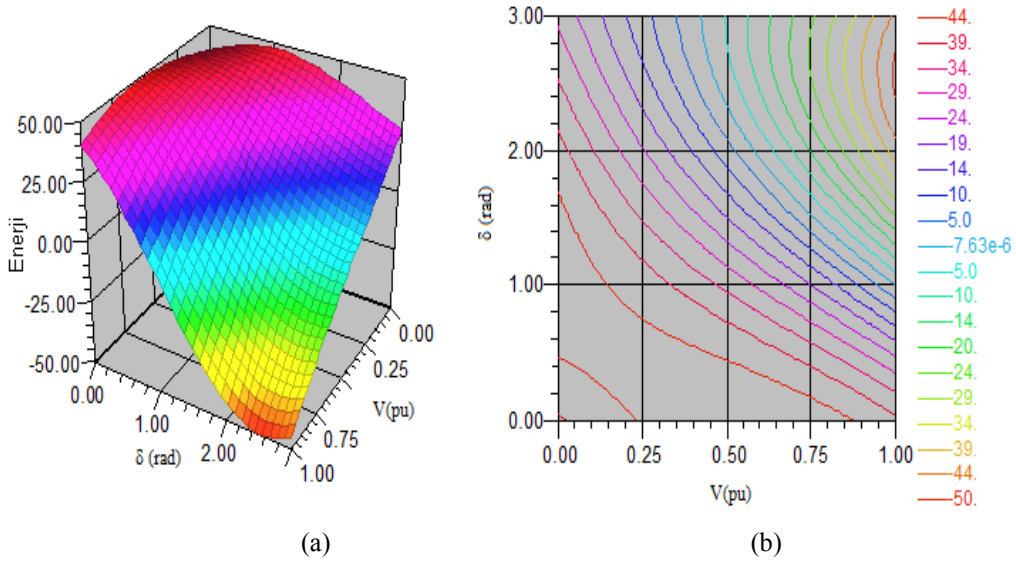
$\delta_1=1.2$  durumu için Şekil 5.68'den ve Tablo 5.49'dan, sistemin depolanan enerjisinin 46.82 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 1$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 1$  değerleri için kararsızlık baş gösterecektir.

Tablo 5.49.  $\delta_1=1.2$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V            | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>0</b>     | 39,78         | 42,24      | 44,06      | 45,18      | 45,58      | 45,25    | 44,22      | 42,55      | 40,32      | 37,64      |
| <b>0,1</b>   | 42,16         | 43,85      | 44,80      | 44,98      | 44,40      | 43,11    | 41,16      | 38,66      | 35,72      | 32,47      |
| <b>0,2</b>   | 44,15         | 45,03      | 45,08      | 44,31      | 42,76      | 40,53    | 37,70      | 34,41      | 30,82      | 27,07      |
| <b>0,3</b>   | 45,66         | 45,69      | 44,81      | 43,08      | 40,57      | 37,41    | 33,74      | 29,72      | 25,53      | 21,35      |
| <b>0,4</b>   | 46,58         | 45,72      | 43,90      | 41,19      | 37,73      | 33,67    | 29,18      | 24,48      | 19,75      | 15,21      |
| <b>0,5</b>   | 46,82         | 45,04      | 42,24      | 38,55      | 34,14      | 29,19    | 23,94      | 18,59      | 13,39      | 8,56       |
| <b>0,6</b>   | 46,29         | 43,55      | 39,75      | 35,07      | 29,71      | 23,90    | 17,90      | 11,97      | 6,36       | 1,31       |
| <b>0,7</b>   | 44,89         | 41,15      | 36,33      | 30,64      | 24,34      | 17,69    | 10,99      | 4,51       | -1,46      | -6,65      |
| <b>0,8</b>   | 42,52         | 37,74      | 31,87      | 25,17      | 17,93      | 10,47    | 3,09       | -3,88      | -10,14     | -15,42     |
| <b>0,9</b>   | 39,10         | 33,23      | 26,29      | 18,57      | 10,40      | 2,13     | -5,88      | -13,29     | -19,78     | -25,08     |
| <b>1</b>     | 34,51         | 27,53      | 19,49      | 10,73      | 1,64       | -7,41    | -16,02     | -23,83     | -30,49     | -35,73     |
| <b>delta</b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |



### 5.5.2.10. $\delta_1=1.6$ rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğunun incelenmesi



Şekil 5.69.  $\delta_1=1.6$  rad seçildiğinde SVC'li sistemin enerji yoğunluğu a) Üç boyutlu olarak gösterilim b) İki boyutlu olarak gösterilim

$\delta_1=1.6$  durumu için Şekil 5.69'dan ve Tablo 5.50'den, sistemin depolanan enerjisinin 48.77 enerji birimine ulaştığı ve yük gerilimi 1 p.u ve üç numaralı baranın yük açısı 0 rad ile 1.2 rad arasındayken, sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun pozitif değerler almakta olduğu görülmektedir. Buna göre sistem,  $0 < \delta_3 < 1.2$  aralığında kararlı olarak çalışacaktır. Bununla birlikte,  $\delta_3 > 1.2$  değerleri için sistem kararsızlığa gitmektedir.

Tablo 5.50.  $\delta_1=1.6$  rad durumu için üç numaralı baradaki enerji ölçümü

| V                          | Enerji Ölçümü |            |            |            |            |          |            |            |            |            |  |
|----------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|--|
| <b>0</b>                   | 39,33         | 42,06      | 44,33      | 46,08      | 47,24      | 47,79    | 47,72      | 47,05      | 45,82      | 44,10      |  |
| <b>0,1</b>                 | 41,94         | 44,04      | 45,53      | 46,36      | 46,52      | 46,01    | 44,87      | 43,17      | 40,99      | 38,42      |  |
| <b>0,2</b>                 | 44,26         | 45,69      | 46,36      | 46,25      | 45,39      | 43,83    | 41,65      | 38,94      | 35,84      | 32,48      |  |
| <b>0,3</b>                 | 46,20         | 46,92      | 46,73      | 45,66      | 43,78      | 41,16    | 37,94      | 34,26      | 30,28      | 26,18      |  |
| <b>0,4</b>                 | 47,67         | 47,62      | 46,54      | 44,49      | 41,57      | 37,90    | 33,66      | 29,03      | 24,22      | 19,42      |  |
| <b>0,5</b>                 | 48,56         | 47,71      | 45,71      | 42,65      | 38,67      | 33,96    | 28,71      | 23,16      | 17,55      | 12,11      |  |
| <b>0,6</b>                 | 48,77         | 47,08      | 44,12      | 40,03      | 35,00      | 29,24    | 23,00      | 16,56      | 10,19      | 4,15       |  |
| <b>0,7</b>                 | 48,23         | 45,64      | 41,69      | 36,55      | 30,44      | 23,64    | 16,43      | 9,12       | 2,03       | -4,55      |  |
| <b>0,8</b>                 | 46,82         | 43,30      | 38,32      | 32,10      | 24,92      | 17,07    | 8,90       | 0,75       | -7,02      | -14,09     |  |
| <b>0,9</b>                 | 44,45         | 39,95      | 33,91      | 26,60      | 18,32      | 9,43     | 0,32       | -8,64      | -17,05     | -24,57     |  |
| <b>1</b>                   | 41,03         | 35,51      | 28,37      | 19,93      | 10,55      | 0,63     | -9,42      | -19,15     | -28,17     | -36,08     |  |
| <b><math>\delta</math></b> | <b>0</b>      | <b>0,2</b> | <b>0,4</b> | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,4</b> | <b>1,6</b> | <b>1,8</b> |  |

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde teknolojiye meydana gelen yeniliklerle birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bir güç sisteminin en önemli görevlerinden biri, enerjinin tüketicilere ekonomik ve güvenli bir biçimde ulaştırılmasının yanı sıra sistemin gerilim ve frekans gibi büyüklüklerinin belirli sınırlar içerisinde tutulmasıdır. Büyük ve karmaşık bir hal alan elektrik güç sistemleri aşırı çalışma koşulları altında birçok problemle karşı karşıya kalmaktadır. Son yıllarda, dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen gerilim kararlılığı problemi nedenli olumsuz durumlar, çoğu enerji sisteminin çökmesine sebep olmuştur. Bu yüzden, gerilim kararlılığı konusu araştırmacılar tarafından vazgeçilmez bir çalışma alanı haline gelmiştir.

Güç elektroniğinde yaşanan son gelişmeler elektrik güç sistemlerinde kullanılan FACTS cihazlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. FACTS cihazları esnek olduklarından ve hızlı kontrol karakteristiklerine sahip olduklarından güç şebekesinin gerilim kararlılığı sınırlarını arttırlar. SVC, gerilim kararlılığını etkileyici bir şekilde artırma özelliği olan en önemli ve en bilinen FACTS cihazlarından biridir. SVC'ler güç sistemlerinde ağırlıklı olarak gerilim kontrolü ve sistem kararlılığını iyileştirme amaçlı kullanılır.

Bu çalışmada, güç sistem modelleri olarak tek makine sonsuz bara güç sistemi, indirgenmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemi ve dört baralı güç sistemi incelenmiştir. Lyapunov'un ikinci metoduyla ortaya çıkan değişken gradiyent metot incelenen güç sistemlerine uygulanarak, sistemlerin enerji fonksiyonu oluşturulmuş ve böylece sistemlerdeki enerji seviye değişikliklerinin sistemlerin gerilim kararlılığına etkisi gösterilmiştir. Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen güç sistemlerine SVC eklenerek enerji fonksiyonları elde edilmiş ve SVC'nin gerilim kararlılığına etkileri gözlemlenmiştir. Ele alınan elektrik güç sistemleri, dinamik bir yükün ya da bir sistemin aşırı

yüklenmesi durumunda nasıl bir gerilim kararsızlığına sebep olduğunu göstermek için seçilmiştir. Ayrıca farklı yük karakteristiklerine sahip güç sistemlerinin gerilim kararsızlığı mekanizmasında nasıl bir rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Gerilim kararlılığı ile ilgili yapılan bu tezin ana katkıları maddeler halinde aşağıda özetle verilmiştir.

- Lyapunov'un ikinci metoduyla ortaya çıkan değişken gradiyent metodun kullanılmasıyla tek makine sonsuz bara, indirgenmiş tek makine sonsuz bara, değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve dört baralı güç sistemlerinin kararlılık tavrını açıkça gösterebilecek daha uygun bir enerji fonksiyonunun elde edilebileceği gösterilmiştir.

- Elde edilen enerji fonksiyonlarıyla güç sistemlerinin enerji yoğunlukları grafiksel olarak gösterilmiş, böylece enerji yoğunluklarındaki değişimlerin yük açısına ve yük gerilimine bağlı güç sistemlerinin kararlılıklarına etkileri kolay bir şekilde incelenmiştir.

- SVC'siz tek makine sonsuz bara, SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara ve SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara güç sistemlerine ait analizlerden yük açısının artırılmasıyla enerji yoğunluğunun düştüğü gözlemlenmiştir. Enerji yoğunluğundaki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. Yükteki bir değişimin enerji yoğunluğunda bir artışa neden olduğu durumda, sistemin kararsızlık noktasından uzaklaşma eğilimi gösterdiği sonucuna varılmıştır.

- Dört baralı güç sistemine ait analizlerden üç numaralı barada bulunan yükün dört numaralı baradaki yüke karşı kararsızlığa daha yakındır sonucuna varılabilir. Çünkü üç numaralı barada  $\delta_2$ 'nin tüm değerlerinde sistem enerji yoğunluğu dört numaralı baradan daha az seviyelerde olmuştur. Bu durum üç numaralı barada bulunan yükün bozucu etkilere karşı daha hassas olduğunu göstermektedir. Ayrıca, enerji fonksiyonunun çok baralı ve çok makineli güç sistemlerine uygulanabileceği de gösterilmiştir.

- İlk kez bu tezle, SVC'li tek makine sonsuz bara, SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara, SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara ve SVC'li dört baralı güç sistemlerinin değişken gradiyent metot kullanılarak enerji fonksiyonları oluşturulmuş ve gerilim kararlılıkları incelenmiştir.

- Elektrik güç sistemlerine SVC'nin eklenmesinin güç sistemlerinin kararlılıklarını ve maksimum yüklenme sınırlarını arttırdığı gösterilmiştir. Ayrıca gerilim kararsızlık probleminin de önlendiği ortaya konmuştur.

Lyapunov'un ikinci metoduyla ortaya çıkan diğer metotlar kullanılarak da enerji fonksiyonları yardımıyla güç sistemlerinin gerilim kararlılığı incelemesi çalışılabilir. Analizleri yapılan güç sistemlerine farklı FACTS cihazları eklenerek enerji fonksiyonları ile gerilim kararlılığı çalışmaları yapılabilir. Farklı FACTS cihazlarının güç sisteminin uygun yerlerine yerleştirilmesiyle maksimum yüklenme sınırları arttırılabilir ve güç sisteminin daha kolay kontrolü sağlanabilir. Son olarak, bu tezin güç sistem kararlılığı problemleri için kullanılacak uygun bir enerji fonksiyonunun oluşturulmasına yardımcı olacağı umulmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] ABED, AM., WSCC voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology. In Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Alta, July 18 - 22, 1999.
- [2] KUNDUR, P., Power system stability and control. Mc Graw-Hill Inc, Toronto, 1994.
- [3] TAYLOR, CW., Power system voltage stability, Mc Graw-Hill Inc, New York, pp. 17–40, 1994.
- [4] YALÇIN, MA., Enerji sistemlerinde gerilim kararlılığının yeni bir yaklaşımla incelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995.
- [5] ESLAMI, M., SHAREEF, H., MOHAMED A., KHAJEHZADEH, M., A survey of flexible AC transmission systems (FACTS). Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2012(1a): pp. 1–11, 2012.
- [6] PEREZ, MA., MESSINA, AR., FUERTE-ESQUIVEL, CR., Application of FACTS devices to improve steady state voltage stability. In Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, July 16 - 20, 2000.
- [7] SODE-YOME, A., MITHULANANTHAN, N., LEE, KY., A comprehensive comparison of FACTS devices for enhancing static voltage stability. In Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tapma, June 24 - 28, 2007.
- [8] DOBSON, I., CHIANG, HD., THORP, JS., FEKIH-AHMED, L., A model of voltage collapse in electric power systems. In Proc IEEE 27<sup>th</sup> Conference on Decision and Control, Austin, Texas, December, 1988.
- [9] DOBSON, I., CHIANG, HD., Towards a theory of voltage collapse in electric power systems. Systems & Control Letters, 13: pp. 253–262, 1989.
- [10] CHIANG, HD., DOBSON, I., THOMAS, RJ., THORP, JS., FEKIH-AHMED, L., On voltage collapse in electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 5(2): pp. 601–611, 1990.

- [11] AJJARAPU V., LEE, B., Bifurcation theory and its application to nonlinear dynamic phenomena in an electric power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(1): pp.424–431, 1992.
- [12] WANG HO., ABED EH., Control of nonlinear phenomena at the inception of voltage collapse. In *Proc. 1993 American Control Conference*, San Fransisco, June, 1993.
- [13] CHIANG, HD., LIU, CW., VARAIYA, PP., WU, FF., LAUBY, MG., Chaos in a simple power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(4): pp. 1407–1414, 1993.
- [14] TAN, CW., VARGHESE, M., VARAIYA, P., WU, FF., Bifurcation, chaos, and voltage collapse in power systems. In *Proc. IEEE*, 83(11): pp. 1484–1496, 1995.
- [15] DONG, ZY., MAKAROV, YV., HILL, DJ., Computing the aperiodic and oscillator small signal stability boundaries in the modern power grids. In *Proc. Thirtieth Hawaii International Conference on System Sciences*, 5: pp. 668–675, Wailea, 1997.
- [16] TRIPATHY, SC., Study of dynamic voltage stability of power systems. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 37(4): pp.374–383, 2000.
- [17] WANG, Y., CHEN, H., ZHOU, R., A nonlinear controller design for SVC to improve power system voltage stability. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 22: pp. 463–470, 2000.
- [18] BUDD CJ., WILSON, JP., Bogdanov-Takens bifurcation points and Sil'nikov homoclinicity in a simple power-system model of voltage collapse. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 49(5): pp.575–590, 2002.
- [19] YU, Y., JIA, H., LI, P., SU, J., Power system instability and chaos. *Electric Power Systems Research*, 65(3): pp. 187–195, 2003.
- [20] KASUSKY, RG., FUERTE-ESQUIVEL, CR., TORRES-LUCIO, D., Assessment of the SVC's effect on nonlinear instabilities and voltage collapse in electric power systems. In *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 4: pp. 2659–2666, July, 2003.
- [21] KURU L., KURU E., YALÇIN MA., An application of chaos and bifurcation in nonlinear dynamical power systems. In *Proc. 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Intelligent Systems*, 3: pp 11–15, 2004.
- [22] WINZENICK, I., FETTE, M., HOM, J., Control of power systems with FACTS devices considering different load characteristics. In *Proc. 16<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Prague, pp. 239–244, 2005.

- [23] SAAD MS., HASSOUNEH MA., ABED EH., EDRIS AA., Delaying instability and voltage collapse in power systems using SVCs with washout filter-aided feedback. In Proc. 2005 American Control Conference, 6: pp. 4357–4362, Portland, 2005.
- [24] KOBRAVI, K., KINSNER, W., FILIZADEH, S., Analysis of bifurcation and stability in a simple power system using MATCONT. In Proc. 20<sup>th</sup> IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1150-1154, 2007.
- [25] YANG, X-S., LI, Q., CHENG, S., Horseshoe chaos and topological entropy estimate in a simple power system. Applied Mathematics and Computation, 211: pp. 467–473, 2009.
- [26] SUN, Q., QIU, Y., ZHOU, J., Yu, J., ZHANG, R., Observation of chaos in smart grid and stabilization condition via generalized fuzzy hyperbolic model. In Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, March, 2011.
- [27] PADMA SUBRAMANIAN, D., KUMUDINI DEVI RP., SARAVANASELVAN R., A new algorithm for analysis of SVC's impact on bifurcations, chaos and voltage collapse in power systems. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 33: pp. 1194–1202, 2011.
- [28] VARAN, M., UYAROĞLU Y., YALÇIN, MA., Viable hopf bifurcation points elimination with SVC for an electrical power system falling into voltage collapse. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 9(4): pp. 1627–1636, 2013.
- [29] GINARSA IM., SOEPRIJANTO A., PURNOMO MH., Controlling chaos and voltage collapse using an ANFIS-based composite controller-static var compensator in power systems. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 46: pp. 79–88, 2013.
- [30] ABED, EH., ALEXANDER, JC., WANG, H., HAMDAN, AMA., LEE, H-C., Dynamic bifurcations in a power system model exhibiting voltage collapse. Technical Research Report, University of Maryland, TR92-26, pp. 1–15, 1992.
- [31] WANG, HO., ABED, EH., HAMDAN, AMA., Bifurcations, chaos and crises in power system voltage collapse, Technical Research Report, University of Maryland, TR92-72, pp. 1–23, 1992.
- [32] HISKENS, IA., HILL, DJ., Energy functions, transient stability and voltage behaviour in power systems with nonlinear loads. IEEE Transactions on Power Systems, 4(4): pp. 1525–1533, 1989.

- [33] ALVARADO, F., GU M., HU Y., Direct detection of instability points using an augmented formulation. In Proc. 24th North American Power Symposium, 1992.
- [34] SRIVASTAVA, KN., SHRIVASTAVA, SC., KALRA, PK., Chaotic oscillations in power system under disturbances. In Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, pp.705–711, 1993.
- [35] WANG, Y., TAN, YL., Guo, G., Robust nonlinear coordinated generator excitation and SVC control for power systems. In Proc 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, November, pp. 415–420, 1997.
- [36] LEE, S-J., Calculation of optimal generation for system loss minimization using loss sensitivities derived by angle reference transposition. IEEE Transactions on Power Systems, 18(3): pp. 1216–1217, 2003.
- [37] GORDON M., Coupled and decoupled nonlinear control of generator excitation and SVC. IEEE Lausanne Power Tech, Piscataway, pp. 255–260, 2007.
- [38] TSOLAS, N., ARAPOSTATHIS A., VARAIYA PP., A structure preserving energy function for power system transient stability analysis. IEEE Transactions on Circuits and Systems, CAS-32(10): pp.1041–1049, 1985.
- [39] PAI, MA., SAUER PW., Stability analysis of power systems by Lyapunov's direct method. IEEE Control System Magazine, 9: pp. 23–27, 1989.
- [40] HISKENS, IA., HILL, DJ., Incorporation of SVCs into energy function methods. IEEE Transactions on Power Systems, 7(1): pp.133–140, 1992.
- [41] JURADO, F., CARPIO J., Energy functions analysis in voltage collapse. European Transactions on Electrical Power, 11(4): pp. 235–240, 2001.
- [42] BRETAS, N., ALBERTO, LFC., Lyapunov function for power systems with transfer conductances: extension of the invariance principle. IEEE Transactions on Power Systems, 18(2): pp. 769–777, 2003.
- [43] JIANGA Q., CHENGA S., CAO Y., Lyapunov stability analysis of turbine-generator including shaft system. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 25: pp. 741–746, 2003.
- [44] HAQUE, MH., Application of energy function to assess the first-swing stability of a power system with a SVC. In Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, 152(6): pp. 806–812, 2005.



- [45] FERNÁNDEZ-VARGAS, J., NIEWIEROWICZ, T., Excitation control for multimachine power systems. *Electric Power Systems Research*, 76: pp. 476–484, 2006.
- [46] ALBERTO LFC., CHIANG, H-D., Towards development of generalized energy functions for electric power systems. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, July, 2012.
- [47] CECATI, C., LATAFAT, H., Time domain approach compared with direct method of Lyapunov for transient stability analysis of controlled power system. *International Symposium on Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion*, Sorrento, June, 2012.
- [48] MAZUMDER, SK., DE LA FUENTE, EP., Transient stability analysis of power system using polynomial Lyapunov function based approach. *IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition*, National Harbor, July, 2014.
- [49] WANG, Y., CHEN, H., ZHOU R., HILL, DJ., Studies of voltage stability via a nonlinear SVC control. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2: pp.1348–1353, January, 2000.
- [50] ROSEHART, WD., CANIZARES, CA., QUINTANA, VH., Effect of detailed power system models in traditional and voltage-stability-constrained optimal power-flow problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1): pp. 27–35, 2003.
- [51] GU W., MILANO F., JIANG P., TANG G., Hopf bifurcations induced by SVC controllers: A didactic example. *Electric Power System Research*, 77: pp. 234–240, 2007.
- [52] NWOHU, MN., Voltage stability improvement using static var compensator in power systems. *Leonardo Journal of Sciences*, 14: pp. 167–172, 2009.
- [53] LIAW, D-C., CHANG, S-T., HUANG, Y-H., HUANG, J-T., YENN, T-C., Load voltage tracking of electric power systems by using backstepping design. *ICCAS-SICE*, Fukuoka, pp. 608–613, August, 2009.
- [54] DÖŞOĞLU, K., DUMAN, S., ÖZTÜRK, A., TOSUN, S., The investigation of static voltage stability in power system by SVC and TCSC. *SDU International Journal of Technological Science*, 2(2): pp. 14–25, 2010.
- [55] DU, Q., SU, Z., LI, S., Some design and simulation of sliding mode variable structure control for hopf bifurcation in power systems. *Energy and Power Engineering*, 3: pp. 24–28, 2011.

- [56] MOHAMMADI M., Voltage stability analysis with static var compensator (SVC) for various faults in power system with and without power system stabilizers (PSS). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3(7): pp. 668–676, 2011.
- [57] NAGENDRA, P., DEY, SHN., PAUL, S., DATTA, T., A novel approach for global voltage stability assessment of a power system incorporating static var compensator. *European Transactions on Electrical Power*, 22: pp. 1016–1026, 2012.
- [58] MATHCAD User's Guide. Parametric Technology Corporation, 2007.
- [59] MACSYMA User's Guide, Macsyma Inc., 1996.
- [60] STEINMETZ, CP., Power control and stability of electric generating stations. *AIEE Transactions*, XXXIX(II): pp. 1215–1287, 1920.
- [61] EVANS RD., BERGVALL RC., Experimental analysis of stability and power limitations. *AIEE Transactions*, pp. 39–58, 1924.
- [62] AIEE Subcommittee on Interconnections and Stability Factors. First Report of Power System Stability. *AIEE Transactions*, pp. 51–80, 1926.
- [63] BOA, Z., SHAOJIEB, O., JIANHUAA, Z., HUIB, S., GENGB, W., MINGB, Z., An analysis of previous blackouts in the world: Lessons for China's power industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: pp. 1151–1163, 2015.
- [64] KUNDUR, P., PASERBA J., AJJARAPU V., ANDERSON G., BOSE A., CANIZARES C., HATZIARGYRIOU N., HILL D., STANKOVIC A., TAYLOR C., CUTSEM TV., VITTAL V., Definition and classification of power system stability. *IEEE Transaction of Power System*, 19(2): pp. 1387–1401, 2004.
- [65] IEEE Committee Report, Voltage stability of power system: Concepts, analytical tools, and industry experience. *IEEE/PES*, 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [66] VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C., Voltage stability of electric power systems. Kluwer, 1998.
- [67] ÇAKIR, H., Elektrik güç sistemleri analizi. İstanbul, 1986.
- [68] CIGRE Task Force 38-02-14 Report, Large frequency disturbances: analysis and modeling needs. New York, Jan 31-Feb 04, pp. 554–558, 1999.

- [69] KUNDUR, P., LEE, DC., BAYNE, JP., DANDENO, PL., Impact of turbine generator overspeed controls on unit performance under system disturbance conditions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(6): pp. 1262–1269, 1985.
- [70] KWANTY, HG., PASRIJA, AK., BAHAR, LY., Static bifurcations in electric power networks: loss of steady-state stability and voltage collapse. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Cas-33(10): p.p. 981–991, 1986.
- [71] ANDERSON, PM., FOUAD, AA., *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [72] ALSHAMLI, Y., HOSSEINZADEH, N., YOUSEF, H., AL-HINAI, A., A Review of concepts in power system stability. In *Proc. 8<sup>th</sup> IEEE GCC Conference and Exhibition*, Muscat, Oman, February 1–4, 2015.
- [73] HILL, DJ., Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. *IEEE Trans. Power Systems*, 8: pp. 166–176, 1993.
- [74] VAN CUTSEM, T., Voltage instability: phenomenon, countermeasures and analysis methods. In *Proc. IEEE*, 88: pp. 208–227, 2000.
- [75] CIGRE Task Force 38-02-10, Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena. *Summary in Electra*, 147, 1993.
- [76] CIGRE Task Force 38-02-12, Criteria and countermeasures for voltage collapse. *CIGRE Publication*, 1994.
- [77] GONG, Y., Development of an improved on – line voltage stability index using synchronized phasor measurement. Ph.D. thesis, Mississippi State University, Electrical Engineering in the department of Electrical and Computer Engineering, 2005.
- [78] AINSWORTH, JD., GABRILOVIC, A., THANAWALA, HL., Static and synchronous compensators for HVDC transmission converters connected to weak AC systems, 28<sup>th</sup> Session, CIGRE, pp. 31–01, 1980.
- [79] CIGRE Working Group 14.05 Report, Guide for planning dc links terminating at ac systems locations having low short circuit capacities part I: ac/dc interaction phenomena. *CIGRE Guide No: 95*, 1992.
- [80] VAN CUTSEM, T., MAILHOT, R., Validation of a fast voltage stability analysis method on the hydro-quebec system. *IEEE Trans. Power Systems*, 12: pp. 282–292, 1997.
- [81] CIGRE Working Group 14.05 Report, Interaction between HVDC converters and nearby synchronous machines. *CIGRE Brochure 119*, October, 1997.

- [82] HILL, DJ., LOF, PA., ANDERSON, G., Analysis of long-term voltage stability. In Proc. 10<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference, pp. 1252–1259, Aug. 1990.
- [83] MORISON, GK., GAO, B., KUNDUR, P., Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. IEEE Trans. Power Systems, 8: pp. 1159–1171, 1993.
- [84] Prepared by: Power system Planning and Development version No 1.0 NEMCO Assessment of potential Security Risks due to High Levels of Wind Generation in South Australia. Summary of DIGSILENT Studies (Stage1)
- [85] NGUYEN, DT., Contributions to analysis and prevention of power system blackouts. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [86] DUGAN, RC., SANTOSO, S., BEATY, HW., MCGRANAGHAN, MF., Electrical power systems quality. Mc Graw-Hill Inc, 2002.
- [87] IEEE Std. 1159, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [88] ÖZTÜRK, A., Güç sistemi gerilim kararlılığının genetik algoritma ile incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006.
- [89] MILANOVIC, JV., ZHANG, Y., Modeling of FACTS devices for voltage sag mitigation studies in large power systems. IEEE Trans. Power Del., 25(4): pp. 3044–3052, 2010.
- [90] REPO, S., On-line voltage stability assessment of power system – an approach of black-box modelling. Ph.D. thesis, Tampere University of Technology, 2001.
- [91] HIRVONEN, R., POTTONEN, L., Low voltages after a disturbance in the Finnish 400 kV network in Bulk Power System Voltage Phenomena—II: Voltage Stability Security and Control. L. H. Fink, Ed. Davos, Switzerland: ECC/NSF Workshop, pp. 231–239, Aug. 1994.
- [92] DİRİK, H., STATCOM ve SSSC denetleyicilerinin güç sistemi gerilim kararlılığı üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2006.
- [93] Interim Report: Causes of the august 14<sup>th</sup> blackout in The United States and Canada. Tech. Rep., November, 2003.

- [94] US-Canada Power Systems Outage Task Force, First Report on the August 14 2003, blackout in the United States and Canada: causes and recommendations. April, 2004.
- [95] SCHLÄPFER, M., Comparative case studies on recent blackouts. In Workshop on Interdependencies and Vulnerabilities of Energy, Transportation and Communication, Zurich, Switzerland, September 22–24, 2005.
- [96] ANDERSSON, G., et al, Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. IEEE Transactions on Power Systems, 20(4): pp. 1922–1928, November, 2005.
- [97] FARMER, RG., ALLEN, EH., Power system dynamic performance advancement from history of North American blackouts. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 293–300, 2006.
- [98] ALLEGATO, A., Report on events of September 28th, 2003 Italia. April, 2004.
- [99] CORSI, S., SABELLI, C., General blackout in Italy Sunday September 28, 2003, h. 03:28:00. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2: pp. 1691–1702, June, 2004.
- [100] BERIZZI, A., Security issues regarding the Italian blackout. In Presentation at the IEEE PES General Meeting, Milano, Italia, June, 2004.
- [101] VOURNAS, CD., NIKOLAIDIS, VC., TASSOULIS, A., Experience from the Athens blackout of July 12, 2004. In IEEE Power Tech Russia, 2005.
- [102] MÜLLER, PC., Stability theory. Control Systems, Robotics and Automation, III, , in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the auspices of the UNESCO, H. Unbehauen (ed); Eolss Publishers, Oxford, 2004.
- [103] HADDAD, WM., CHELLABOINA, V., Nonlinear dynamical systems and control: a Lyapunov-based approach. Princeton University Press, 2008.
- [104] SHINNERS, SM., Modern control system theory and design. John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 340–362, 1998.
- [105] LYAPUNOV, AM., The general problem of the stability of motion. Kharkov, Russia: Kharkov Mathematical Society, 1892.

- [106] LYAPUNOV, AM., Probl'eme Generale de la Stabilit'e du Mouvement. in *Annales de la Facult'e Sciences de l'Universit'e de Toulouse*, 'E. Davaux, (ed), 9: pp. 203–474, 1907. Reprinted by Princeton University Press, Princeton, NJ, 1949.
- [107] LYAPUNOV, AM., The general problem of stability of motion (A. T. Fuller, trans. and ed.): Taylor and Francis, Washington, DC, 1992.
- [108] OGATA, K., *Discrete-time control systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [109] MURRAY, RM., LI, Z., SASTRY, SS., *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 1994.
- [110] SLOTINE, JJE., LI, W., *Applied nonlinear control*. Prentice-Hall, Inc., pp. 57–97, 1991.
- [111] GACHTER, S., Decentralized PID control for zero-bias active magnetic bearings. Koyo Seiko Co., Ltd. Mechatronic Systems Research Department, Research and Development Center Toichi-cho 333 Kashihara-shi Nara-ken, Japan, 2003.
- [112] PARKS, PC., HAHN, V., *Stability theory*. Prentice-Hall, 1992.
- [113] BAYIR, İ., Belirsizlik içeren dinamik sistemlerin Lyapunov metoduyla kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2003.
- [114] KHALIL, HK., *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, 1996.
- [115] SARIOĞLU, MK., *Otomatik kontrol II*, Sistem Yayıncılık, Ağustos, 1996.
- [116] LA SALLE J., LEFSCHETZ S., *Stability by Liapunov's direct method with applications*. Elsevier, Burlington, MA, 1961.
- [117] NIKRAVESH, SKY., *Nonlinear systems stability analysis: Lyapunov-based approach*. CRC Press, 2013.
- [118] HANG, CC., CHANG, JA., An algorithm for constructing Lyapunov functions based on the variable gradient method. *IEEE Trans. Automatic Control*, 15: pp. 510–512, 1970.
- [119] MACHIAS, A. V. Analysis of transient stability of a multimachine power system using a variable gradient Lyapunov function. In *Proc. Generation, Transmission and Distribution*, 133(2): pp. 81–86, 1986.

- [120] ITAKETO, UT., OGBOGU, SOE., CHUKWUDEBE, GA., Application of Lyapunov's second method in the stability analysis of oil/gas separation process. *Nigerian Journal of Technology*, 21(1): pp. 60–70, 2002.
- [121] HAMADA, YM., Liapunov's stability on autonomous nuclear reactor dynamical systems. *Progress in Nuclear Energy*, 73: pp. 11–20, 2014.
- [122] KRASOVSKII, NN., Problems of the theory of stability of motion. CA: Stanford University Press, Stanford, 1959.
- [123] ÇAKMAK, D., Lyapunov fonksiyonlarının oluşturulması üzerine. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [124] INGWERSON, DR., A modified Lyapunov method for nonlinear stability analysis. *IRE Transactions on Automatic Control*, AC-6: pp. 199–210, 1961.
- [125] ELLIS, J., STOREY, C., Stability in process control: a review of the use of Liapunov functions. In *Proc. Institution of Mechanical Engineers*, SAGE Publications, 178(13): pp. 36–46, 1963.
- [126] ZUBOV, VI., Methods of A. M. Lyapunov and their application. P. Noordhoff, Groningen, 1964.
- [127] SCHULTZ, DG., GIBSON JE., The variable gradient method for generating Lyapunov functions. *Transactions on American Institute of Electrical Engineers*, 81(4): pp. 203–210, 1962.
- [128] GOPAL, M., Digital control and state variable methods: conventional and intelligent control systems. Tata McGraw-Hill, 2009.
- [129] DEMARCO, CL., A new method of constructing Lyapunov functions for power systems. In *Proc. IEEE Inc. Symp. Circuits and Systems*, Helsinki, Finland, pp. 905–908, June, 1988.
- [130] DEMARCO, CL., Approximating power system dynamics and energy functions by quasi-gradient models. In *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Portland, pp. 1966–1969, 1989.
- [131] EMİNOĞLU, U., FACTS elemanları kullanılan güç akış sistemlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2003.
- [132] HINGORANI, NG., Flexible AC transmission. *IEEE Spectrum*, 30: pp. 40–45, 1993.

- [133] HINGORANI, NG., GYUGYI, L., Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, New York, 2000.
- [134] HINGORANI, NG., FACTS technology—State of the art, current challenges and the future prospects. In Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, June 24–28, pp. 1–4, 2007.
- [135] EDRIS, AA., ADAPA, R., BAKER, MH., BOHMANN, L., CLARK, K., HABASHI, K., GYUGYI, L. LEMAY, J., MEHRABAN, AS., MYERS, AK., REEVE, J., SENER, F., TORGERSEN, DR., WOOD, RR., Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS), IEEE Transactions on Power Delivery, 12(4): pp. 1848–1853, 1997.
- [136] MATHUR, RM., VARMA, RK., Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, IEEE Press, USA, 2002.
- [137] BAYSAL, M., Harmonik içeren güç sistemlerinin gerilim kararlılığının yük modellemeleri ve facts elemanları bakımından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [138] SINGH, B., VERMA, KS., SINGH, D., SINGH, CN., SINGH, A., AGRAWAL, E., DIXIT, R., TYAGI, B., Introduction to FACTS controllers a critical review. International Journal of Reviews in Computing, 8: pp. 17–34, 2011.
- [139] GELEN, A., YALCINOZ, T., Analysis of TSR-based SVC for a three-phase system with static and dynamic loads. In Proc. ICEE 2007: IEEE International Conference on Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan, pp. 1–6, April 11 - 12, 2007.
- [140] ABIDO, MA., Power system stability enhancement using FACTS controllers: a review. The Arabian Journal for Science and Engineering, 34(1B): pp 153–172, 2009.
- [141] ERTAY, MM., AYDOĞMUŞ, Z., Güç sistemlerinde FACTS uygulamaları. SDU International Technologic Science, 4(2): pp. 40–58, 2012.
- [142] UZUNOVIC, E., EMTP, transient stability and power flow models and controls of VSC based FACTS controllers. Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada, 2001.



- [143] SINGH, B., VERMA, KS., MISHRA, P., MAHESHWARI, R., SRIVASTAVA, U., BARANWAL, A., Introduction to FACTS controllers: a technological literature survey. *International Journal of Automation and Power Engineering*, 1(9), December, 2012.
- [144] MARAM, S., Hierarchical fuzzy control of the UPFC and SVC located in AEP's Inez area. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [145] FUCHS, EF., MASOUM, MAS., *Power quality in power systems and electrical machines*, Elsevier Academic Press, London, UK, 2008.
- [146] HINGORANI, NG., FACTS technology and opportunities, flexible AC transmission systems (FACTS). *IEE Colloquium on the Key to Increased Utilisation of Power Systems*, London, pp. 4/1–4/10, 1994.
- [147] KAZEMI, A., ANDAMI, H., FACTS devices in deregulated electric power systems: a review. *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DWT2004)*, Hong Kong, pp. 337–342, 2004.
- [148] GANDHAR, A., SINGH, B., KHANNA, R., Impacts of facts technology- a state of art review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 1(4): pp. 28–31, 2012.
- [149] GELEN, A., YALÇINÖZ, T., Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 18(2): pp. 147–157, 2010.
- [150] NGUYEN, KT., ZHU, H., HAN, T., ZHANG, Y., A hybrid system approach to static var compensator modeling and control. *International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, Singapore, May 20 - 22, pp. 122–128, 2015.
- [151] IEEE Special Stability Controls Working Group, Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1): pp. 229–240, 1994.
- [152] *Discover the World of FACTS Technology: Technical Compendium*, 2010, [Catalogue], SIEMENS.
- [153] ZHANG, XP., REHTANZ, C., PAL, B., *Flexible AC transmission systems: modelling and control*. Springer, Berlin, 2012.
- [154] KODSI, SKM., CANIZARES, CA., KAZERANI, M., Reactive current control through SVC for load power factor correction. *Electric Power Systems Research*, 76(9-10): pp. 701–708, 2006.

- [155] ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, CR., AMBRIZ-PEREZ H., ANGELES-CAMACHO, C., FACTS modelling and simulation in power networks, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2004.
- [156] RICO, JJ., ACHA, E., MILLER, TJE., Harmonic domain modeling of three phase thyristor-controlled reactors by means of switching vectors and discrete convolutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3): pp. 1678–1684, 1996.
- [157] LI, Z., QUN-ZHAN, L., Application of TSC in reactive compensation in traction substations. *IEEE Autonomous Decentralized Systems, International Workshop*, pp. 149–153, 2000.
- [158] CELLI, G., PILO, F., TENNAKOON, SB., Voltage regulation on 25 kV AC railway systems by using thyristor switched capacitor. 9. *International Conf. on Harmonics and Quality of Power*, 2: pp. 633–638, October 1 - 4, 2000.
- [159] KRISHNA, BV., Significance of TSC on reactive power compensation. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 3(4): pp. 17–23, 2012.
- [160] PADIYAR, KR., FACTS controllers in power transmission and distribution. New Age International Publishers, New Delhi, 2007.
- [161] JIN H., GOOS G., LOPES L., An efficient switched reactor based static var compensator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4): pp. 998–1005, 1994.
- [162] GUTIERREZ, J., MONTANO, JC., CASTILLA, M., LOPEZ, A., Power-quality improvement in reactive power control using FCTCR circuits. *IEEE 28<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, 2: pp. 880–885, Nov. 5 - 8, 2002.
- [163] DIXON, J., MORÁN, L., RODRÍGUEZ J., DOMKE R., Reactive power compensation technologies: state of the art review. In *Proc. IEEE*, 93(12): pp. 2144–2164, December, 2005.
- [164] GYUGYI, L., Power electronics in electric utilities: static var compensators. In *Proc. IEEE*, 76(4): pp.483–494, 1988.
- [165] CORSI, S., Voltage control and protection in electrical power systems: from system components to wide-area control. Springer: London, 2015.
- [166] KOTHARI, DP., NAGRATH, IJ., Modern power system analysis. 3<sup>rd</sup> edition, Tata McGraw-Hill: New Delhi, 2003.
- [167] SONG, YH., JOHNS, AT., Flexible AC transmission systems (FACTS). The Institution of Electrical Engineers, London, 1999.

- [168] STRZELECKI R., BENYSEK, G., Power electronics in smart electrical energy networks. Springer-Verlag: London, 2008.
- [169] UZUNOVIC E., CANIZARES A., REEVE J., Fundamental frequency model of static synchronous compensator. North American Power Symposium (NAPS), Laramie, Wyoming, pp. 49–54, 1997.
- [170] GYUGYI, L., Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources. IEEE Transactions on Power Delivery, 9(2): pp. 904–911, 1994.
- [171] LARSEN, EV., CLARK, K., MISKE SA., URBANEK J., Characteristics and rating considerations of thyristor controlled series compensation. IEEE Transactions on Power Delivery, 9(2): pp. 992–1000, 1994.
- [172] CAÑIZARES, CA., Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies. In Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2: pp. 1447–1454, Singapore, January, 2000.
- [173] PASERBA, JJ., MILLER, NW., LARSEN, EV., PIWKO, RJ., A thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(3): pp.1471–1478, 1995.
- [174] HAN, HG., PARK, JK., LEE, BH., Analysis of thyristor controlled series compensator dynamics using the state variable approach of a periodic system model. IEEE Transactions on Power Delivery, 12(4): pp. 1744–1750, 1997.
- [175] HUANG, GM., LI, Y., Impact of thyristor controlled series capacitor on bulk power system reliability. In Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2: pp. 975–980, Chicago, America, 2002.
- [176] MEDINA, A., RAMOS-PAZ, A., FUERTE-ESQUIVEL CR., Swift computation of the periodic steady state solution of power systems containing TCSCs. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25(9): pp.689–694, 2003.
- [177] TAHERI, H., SHAHABI, S., TAHERI, Sh., GHOLAMI A., Application of synchronous static series compensator (SSSC) on enhancement of voltage stability and power oscillation damping. IEEE EUROCON, pp. 533–539, St. Petersburg, May 18 - 23, 2009.
- [178] POSHTAN, M., SINGH BN., RASTGOUFARD, P., A nonlinear control method for SSSC to improve power system stability. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, pp.1–7, New Delhi, Dec. 12 - 15, 2006.

- [179] GYUGYI, L., SCHAUDER, CD., SEN, KK., Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1): pp. 406–417, 1997.
- [180] QING, L., ZENGPING, W., ZHENHUA, Z., Study and simulation of SSSC and TCSC transient control performance. *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, pp.1–6, New Delhi, Oct.12 – 15, 2008.
- [181] UZUNOVIC, E., CAÑIZARES CA., REEVE J. Fundamental frequency model of unified power flow controller. In *Proc. North American Power Symposium (NAPS)*, Cleveland, Ohio, pp. 294–299, 1998.
- [182] GYUGYI, L., SCHAUDER, CD., WILLIAMS, SL., RIETMAN, TR., TORGERSON, DR., EDRIS, A., The unified power flow controller: a new approach to power transmission control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2): pp.1085–1097, 1995.
- [183] GYUGYI, L., SEN, KK., SCHAUDER, CD., The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3): pp. 1115–1123, 1999.
- [184] ZHANG, J., YOKOYAMA, A., Optimal power flow control for congestion management by interline power flow controller (IPFC). *International Conference on Power System Technology*, pp. 1–6, Chongqing, 2006.
- [185] GLANZMANN, G., Flexible alternating current transmission systems. *EEH-Power Systems Laboratory, Technical Report, ETH Zürich*, 2005.
- [186] KAZEMI, A., KARIMI, E, The effect of interline power flow controller (IPFC) on damping interarea oscillations in the interconnected power systems. In *Proc. 41<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference*, 2: pp. 769–773, Newcastle-upon-Tyne, September, 2006.
- [187] G. REED, J. PASERBA, P. SALAVAMIS, The FACTS on resolving transmission gridlock: the case for implementing power electronics control technologies to enhance system reliability and upgrade capacity. *IEEE PES Power and Energy Magazine*, pp. 41–46, September/October 2003.
- [188] PASERBA, JJ., How FACTS controllers benefit AC transmission systems. In *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 02: pp. 1257–1262, June, 2004.

- [189] BINDAL, RK., A review of benefits of FACTS devices in power system. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3(4): pp. 105–108, 2014.
- [190] ERSAMUT, R., Statik VAR kompanzasyonu sistemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [191] DÖŞOĞLU, MK., Rüzgar santralinde gerilim ve güç kontrolünün facts cihazları ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2010.
- [192] WALVE, K., Modelling of power system component at severe disturbances. *CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, pp. 18–38, 1986.
- [193] HILL, DJ., MAREELS, IMY., Stability theory for differential/algebraic systems with applications to power systems. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, 37: pp. 1416–1423, 1990.
- [194] VENKATASUBRAMANIAN, V., SCHATTLER, H., ZABORSZKY, J., On the dynamics of differential-algebraic systems such as the balanced large electric power system. In *Systems and Control Theory for Power Systems*, Chow, J. H., Kokotovic, P. V., Thomas, R. J., (ed); New York:Springer, 1995.
- [195] TAKENS, F., Constrained equations: A study of implicit differential equations and their discontinuous solutions. In *Structural Stability, The Theory of Catastrophes and Applications in the Sciences*, Hilton, P., (ed); New York: Springer, pp. 143–234, 1976.
- [196] VITACCO, WR., MICHEL, AN., Qualitative analysis of interconnected dynamical systems with algebraic loops: Well-posedness and stability. *IEEE Trans. Circuits and Systems, CAS-24*: pp. 625–637, 1977.
- [197] PRAPROST, KL., LOPARO, KA., A stability theory for constrained dynamical systems with applications to electric power systems. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 41: pp. 1605–1617, 1996.

## EKLER

### EK A. Analizlerde Kullanılan Güç Sistemlerinin Enerji Fonksiyonları

SVC'siz tek makine ve sonsuz bara güç sisteminde,  $a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.23) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m\delta_m - E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m - \theta_m)V - E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)\delta_m \dots \\ & + 0.7855 P_m + 0.5E_m Y_m \cos(-\delta + 0.7855 + \theta_m)V + 0.7855 E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) + 0.2K_{qv2}V^2 \dots \\ & - Q_0\delta - K_{qv2}\delta V^2 - Q_1\delta - K_{qv}\delta V + E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0')V - Y_0'\delta \cos(\theta_0')V^2 \dots \\ & + E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m)V - Y_m\delta \cos(\theta_m)V^2 + 0.2Q_1 + 0.2K_{qv}V + 0.2Y_0' \cos(\theta_0')V^2 \dots \\ & - E_0' Y_0' \sin(0.2 + \theta_0')V + 0.2Y_m \cos(\theta_m)V^2 + 0.2Q_0 - E_m Y_m \sin(0.2 - \delta_m - \theta_m)V \dots \\ & - \frac{1}{3}K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') - 0.5K_{qw}K_{pv}V^2 + 0.5K_{pw}K_{qv}V^2 - \frac{1}{3}K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) + \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2}V^3 \dots \\ & - \frac{1}{3}K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') - \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2} - K_{pw}Q_1 + K_{qw}P_1 - K_{qw}P_0V - K_{qw}P_1V + K_{qw}P_0 \dots \\ & + 0.5K_{qw}K_{pv} - 0.5K_{pw}K_{qv} - \frac{1}{3}K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) + K_{pw}Q_1V - K_{pw}Q_0 \dots \\ & + 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) + 0.5E_0' Y_0' K_{qw} \sin(\delta + \theta_0') + \frac{1}{3}K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0')V^3 \dots \\ & + 0.5K_{pw}E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + K_{pw}Q_0V + \frac{1}{3}K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0')V^3 + \frac{1}{3}K_{pw} Y_m \cos(\theta_m)V^3 \dots \\ & + \frac{1}{3}K_{qw} Y_m \sin(\theta_m)V^3 - 0.5K_{pw}E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0')V^2 - 0.5K_{pw}E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m)V^2 \dots \\ & - 0.5K_{qw}E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0')V^2 - 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m)V^2 + 0.5E_m Y_m K_{pw} \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) \quad (A.1) \end{aligned}$$

SVC'li tek makine ve sonsuz bara sisteminde,  $a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.42) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m \delta_m - E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m - \theta_m)V - E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) \delta_m \dots \\
& + 0.7855 P_m + 0.5 E_m Y_m \cos(-\delta + 0.7855 + \theta_m)V + 0.7855 E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) + 0.2 K_{qv2} V^2 \dots \\
& - Q_0 \delta - K_{qv2} \delta V^2 - Q_1 \delta - K_{qv} \delta V + E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0')V - Y_0' \delta \cos(\theta_0')V^2 \dots \\
& + E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m)V - Y_m \delta \cos(\theta_m)V^2 + 0.2 Q_1 + 0.2 K_{qv} V + 0.2 Y_0' \cos(\theta_0')V^2 \dots \\
& - E_0' Y_0' \sin(0.2 + \theta_0')V + 0.2 Y_m \cos(\theta_m)V^2 + 0.2 Q_0 - E_m Y_m \sin(0.2 - \delta_m - \theta_m)V - 0.2586 V^2 \dots \\
& - \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') - 0.5 K_{qw} K_{pv} V^2 + 0.5 K_{pw} K_{qv} V^2 - \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) + \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} V^3 \dots \\
& - \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') - \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} - K_{pw} Q_1 + K_{qw} P_1 - K_{qw} P_0 V - K_{qw} P_1 V + K_{qw} P_0 \dots \\
& + 0.5 K_{qw} K_{pv} - 0.5 K_{pw} K_{qv} - \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) + 0.431 K_{pw} + K_{pw} Q_1 V - K_{pw} Q_0 \dots \\
& + 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) + 0.5 E_0' Y_0' K_{qw} \sin(\delta + \theta_0') + \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') V^3 \dots \\
& + 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + K_{pw} Q_0 V + \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') V^3 + \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) V^3 \dots \\
& + \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) V^3 - 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') V^2 - 0.5 K_{pw} E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 \dots \\
& - 0.5 K_{qw} E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0') V^2 - 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 + 0.5 E_m Y_m K_{pw} \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) \dots \\
& 1.293 \delta V^2 - 0.431 K_{pw} V^3 \tag{A.2}
\end{aligned}$$

SVC'siz indirgenmiş tek makine sonsuz bara modeli için,  $a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  (5.52) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m \delta_m - E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m - \theta_m)V - E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)\delta_m \dots \\
& + 0.7855 P_m + 0.5 E_m Y_m \cos(-\delta + 0.7855 + \theta_m)V + 0.7855 E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) \dots \\
& - \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') - 0.5 K_{qw} K_{pv} V^2 + 0.5 K_{pw} K_{qv} V^2 - \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) - K_{pw} Q_0 \dots \\
& + \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} V^3 - \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') - \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} - K_{pw} Q_1 + K_{qw} P_1 + K_{qw} P_0 \dots \\
& + 0.4232 K_{qw} K_{pv} - 0.5 K_{pw} K_{qv} - \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) + 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) \dots \\
& + 0.5 E_0' Y_0' K_{qw} \sin(\delta + \theta_0') + 0.5 E_m Y_m K_{pw} \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) + K_{pw} Q_1 V \dots \\
& + 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') V^3 + K_{pw} Q_0 V + \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') V^3 \dots \\
& + \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) V^3 + \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) V^3 - 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') V^2 \dots \\
& - 0.5 K_{pw} E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 - 0.5 K_{qw} E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0') V^2 - K_{qw} P_0 V - K_{qw} P_1 V \dots \\
& - 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 \tag{A.3}
\end{aligned}$$



SVC'li indirgenmiş tek makine sonsuz bara modeli için,  $a(\delta_m, V)$  ve  $c(\delta_m, V)$  (5.62) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m \delta_m - E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m - \theta_m)V - E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)\delta_m \dots \\
& + 0.7855 P_m + 0.5 E_m Y_m \cos(-\delta + 0.7855 + \theta_m)V + 0.7855 E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) \dots \\
& - \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') - 0.5 K_{qw} K_{pv} V^2 + 0.5 K_{pw} K_{qv} V^2 - \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) - K_{pw} Q_0 \dots \\
& + \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} V^3 - \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') - \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} - K_{pw} Q_1 + K_{qw} P_1 + K_{qw} P_0 \dots \\
& + 0.4232 K_{qw} K_{pv} - 0.5 K_{pw} K_{qv} - \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) + 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) \dots \\
& + 0.5 E_0' Y_0' K_{qw} \sin(\delta + \theta_0') + 0.5 E_m Y_m K_{pw} \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) + K_{pw} Q_1 V \dots \\
& + 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + \frac{1}{3} K_{pw} Y_0' \cos(\theta_0') V^3 + K_{pw} Q_0 V + \frac{1}{3} K_{qw} Y_0' \sin(\theta_0') V^3 \dots \\
& + \frac{1}{3} K_{qw} Y_m \sin(\theta_m) V^3 + \frac{1}{3} K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) V^3 - 0.5 K_{pw} E_0' Y_0' \cos(\delta + \theta_0') V^2 \dots \\
& - 0.5 K_{pw} E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 - 0.5 K_{qw} E_0' Y_0' \sin(\delta + \theta_0') V^2 + 1.293 \delta V^2 \dots \\
& - 0.5 K_{qw} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 - 0.2586 V^2 + 0.431 K_{pw} - K_{qw} P_0 V - K_{qw} P_1 V \dots \\
& - 0.431 K_{pw} V^3
\end{aligned} \tag{A.4}$$

SVC'siz değiştirilmiş tek makine sonsuz bara modeli için,  $a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.75) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m\delta_m - E_m Y_m (\cos(\delta - \delta_m) - \cos(-\delta + 0.7855))V + 0.2K_{qv2}V^2 \dots \\
& - Q_0\delta - Q_1\delta - K_{qv}\delta V - Y_0'\delta V^2 - K_{qv2}\delta V^2 + 0.5K_{pw}E_0'Y_0'\cos(\delta) \dots \\
& + 0.7855P_m + E_m Y_m (\sin(\delta_m - 0.2) + \sin(\delta - \delta_m))V + 0.2K_{qv}V + 0.2Y_0'V^2 \dots \\
& + E_0'Y_0'(\sin(\delta) - 0.1986)V + 0.2Y_m V^2 - Y_m\delta V^2 + 0.2Q_0 + 0.2Q_1 \dots \\
& - \frac{1}{3}K_{qw}Y_0'\sin(\theta_0') - 0.5K_{qw}K_{pv}V^2 + 0.5K_{pw}K_{qv}V^2 - \frac{1}{3}K_{qw}Y_m\sin(\theta_m) + \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2}V^3 \dots \\
& - \frac{1}{3}K_{pw}Y_0' - \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2} - K_{pw}Q_1 + K_{qw}P_1 - K_{qw}P_0V - K_{qw}P_1V + K_{qw}P_0 \dots \\
& + 0.5K_{qw}K_{pv} - 0.5K_{pw}K_{qv} - \frac{1}{3}K_{pw}Y_m + K_{pw}Q_1V - K_{pw}Q_0 + K_{pw}Q_0V \dots \\
& + 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta_m - \delta) + 0.5E_0'Y_0'K_{qw}\sin(\delta) + \frac{1}{3}K_{pw}Y_0'V^3 + \frac{1}{3}K_{pw}Y_mV^3 \dots \\
& + 0.5E_m Y_m K_{pw}\cos(\delta_m - \delta) - 0.5K_{pw}E_0'Y_0'\cos(\delta)V^2 - 0.5K_{pw}E_m Y_m \cos(\delta_m - \delta)V^2 \dots \\
& - 0.5K_{qw}E_0'Y_0'\sin(\delta)V^2 - 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta_m - \delta)V^2
\end{aligned} \tag{A.5}$$

SVC'li değiştirilmiş tek makine sonsuz bara modeli için,  $a(\delta_m, \delta, V)$ ,  $b(\delta_m, \delta, V)$  ve  $c(\delta_m, \delta, V)$  (5.88) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
v(\omega, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2}M\omega^2 - P_m\delta_m - E_m Y_m (\cos(\delta - \delta_m) - \cos(-\delta + 0.7855))V + 0.2K_{qv2}V^2 \dots \\
& - Q_0\delta - Q_1\delta - K_{qv}\delta V - Y_0'\delta V^2 - K_{qv2}\delta V^2 + 0.5K_{pw}E_0'Y_0'\cos(\delta) + 0.431K_{pw} \dots \\
& + 0.7855P_m + E_m Y_m (\sin(\delta_m - 0.2) + \sin(\delta - \delta_m))V + 0.2K_{qv}V + 0.2Y_0'V^2 \dots \\
& + E_0'Y_0'(\sin(\delta) - 0.1986)V + 0.2Y_m V^2 - Y_m\delta V^2 + 0.2Q_0 + 0.2Q_1 \dots \\
& - \frac{1}{3}K_{qw}Y_0'\sin(\theta_0') - 0.5K_{qw}K_{pv}V^2 + 0.5K_{pw}K_{qv}V^2 - \frac{1}{3}K_{qw}Y_m\sin(\theta_m) + \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2}V^3 \dots \\
& - \frac{1}{3}K_{pw}Y_0' - \frac{1}{3}K_{pw}K_{qv2} - K_{pw}Q_1 + K_{qw}P_1 - K_{qw}P_0V - K_{qw}P_1V + K_{qw}P_0 \dots \\
& + 0.5K_{qw}K_{pv} - 0.5K_{pw}K_{qv} - \frac{1}{3}K_{pw}Y_m + K_{pw}Q_1V - K_{pw}Q_0 + K_{pw}Q_0V \dots \\
& + 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta_m - \delta) + 0.5E_0'Y_0'K_{qw}\sin(\delta) + \frac{1}{3}K_{pw}Y_0'V^3 + \frac{1}{3}K_{pw}Y_mV^3 \dots \\
& + 0.5E_m Y_m K_{pw}\cos(\delta_m - \delta) - 0.5K_{pw}E_0'Y_0'\cos(\delta)V^2 - 0.5K_{pw}E_m Y_m \cos(\delta_m - \delta)V^2 \dots \\
& - 0.5K_{qw}E_0'Y_0'\sin(\delta)V^2 - 0.5K_{qw}E_m Y_m \sin(\delta_m - \delta)V^2 - 1.293\delta V^2 - 0.2586V^2 \dots \\
& - 0.431K_{pw}V^3 \tag{A.6}
\end{aligned}$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.110) denkleminde yerine konulursa, SVC'siz dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
& -\cos(\delta_1 + 0.022)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{23} + \cos(-0.068 + \delta_2)V_2V_4b_{24} + \cos(0.022 + \delta_2)V_2V_3b_{23}\dots \\
& + 0.022P_3 - 0.068P_4 - \cos(\delta_1 - 0.068)V_1V_4b_{14} - 1.02Q_{D4} + 0.353b_{24} - P_1\omega_1 - 0.976Q_{D3}\dots \\
& + P_4\delta_4 + P_3\delta_3 - \frac{1}{3}V_3^3b_{13} - \frac{1}{3}V_4b_{14} + Q_{D3}V_3 + \cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4b_{14} + Q_{D4}V_4\dots \\
& + [\sin(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23} + \sin(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - P_2]\omega_2 - \cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23}\dots \\
& + \cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{13} + 0.353b_{14} - \cos(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2V_4^2b_{24}\dots \\
& - \frac{1}{3}V_4^3b_{24} - \frac{1}{3}V_3^3b_{23} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4^2b_{14} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3^2b_{13}\dots \\
& - 0.5\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3^2b_{23} + 0.476\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2b_{23} + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1b_{14}\dots \\
& + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2b_{24} + 0.476\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1b_{13}
\end{aligned} \tag{A.7}$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.124) denklemde yerine konulursa, üç numaralı yük sabitken SVC'li dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
& -\cos(\delta_1 + 0.022)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{23} + \cos(-0.068 + \delta_2)V_2V_4b_{24} + \cos(0.022 + \delta_2)V_2V_3b_{23}\dots \\
& + 0.022P_3 - 0.068P_4 - \cos(\delta_1 - 0.068)V_1V_4b_{14} - 1.02Q_{D4} + 0.353b_{24} - P_1\omega_1 - 0.976Q_{D3}\dots \\
& + P_4\delta_4 + P_3\delta_3 - \frac{1}{3}V_3^3b_{13} - \frac{1}{3}V_4b_{14} + Q_{D3}V_3 + \cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4b_{14} + Q_{D4}V_4\dots \\
& + [\sin(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23} + \sin(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - P_2]\omega_2 - \cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23}\dots \\
& + \cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{13} + 0.353b_{14} - \cos(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2V_4^2b_{24}\dots \\
& - \frac{1}{3}V_4^3b_{24} - \frac{1}{3}V_3^3b_{23} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4^2b_{14} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3^2b_{13}\dots \\
& - 0.5\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3^2b_{23} + 0.476\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2b_{23} + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1b_{14}\dots \\
& + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2b_{24} + 0.476\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1b_{13} + 1.262V_4^2\delta_4 + 0.002844V_4^2\dots \\
& - 0.431V_4^3 + 3.4007
\end{aligned} \tag{A.8}$$

(5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93) ve (5.94) denklemleri (5.95) ve (5.96) denklemlerine göre (5.138) denklemine yerine konulursa, dört numaralı yük sabitken SVC'li dört baralı güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
& -\cos(\delta_1 + 0.022)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{23} + \cos(-0.068 + \delta_2)V_2V_4b_{24} + \cos(0.022 + \delta_2)V_2V_3b_{23} \dots \\
& + 0.022P_3 - 0.068P_4 - \cos(\delta_1 - 0.068)V_1V_4b_{14} - 1.02Q_{D4} + 0.353b_{24} - P_1w_1 - 0.976Q_{D3} \dots \\
& + P_4\delta_4 + P_3\delta_3 - \frac{1}{3}V_3^3b_{13} - \frac{1}{3}V_4b_{14} + Q_{D3}V_3 + \cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4b_{14} + Q_{D4}V_4 \dots \\
& + [\sin(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23} + \sin(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - P_2]w_2 - \cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3b_{23} \dots \\
& + \cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3b_{13} + 0.309b_{13} + 0.353b_{14} - \cos(\delta_2 - \delta_4)V_2V_4b_{24} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2V_4^2b_{24} \dots \\
& - \frac{1}{3}V_4^3b_{24} - \frac{1}{3}V_3^3b_{23} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1V_4^2b_{14} - 0.5\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1V_3^2b_{13} \dots \\
& - 0.5\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2V_3^2b_{23} + 0.476\cos(\delta_2 - \delta_3)V_2b_{23} + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_1b_{14} \dots \\
& + 0.5202\cos(\delta_1 - \delta_4)V_2b_{24} + 0.476\cos(\delta_1 - \delta_3)V_1b_{13} + 1.262V_3^2\delta_3 + 0.002776V_3^2 \dots \\
& - 0.4206V_3^3 + 0.3911 \tag{A.9}
\end{aligned}$$

## ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ÇİFCİ, 1985 yılında Antakya'da doğdu. İlk ve ortaokul eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2003 yılında İstanbul Haydarpaşa Anadolu Lisesi'nden ve 2007 yılında da Sakarya Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 – 2009 yılları arasında özel bir şirkette bakım ve onarım mühendisi olarak çalıştı. 2009 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme bölümünden mezun oldu. Bir yıla yakın bir süre Londra'da yabancı dil eğitimi aldıktan sonra yurda döndü. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi unvanı aldı. 2009 yılından beri Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü Elektrik Programı'nda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır ve EMO üyesidir.