

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÖZDE THEVENİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ  
KULLANILARAK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM  
KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Talha Enes GÜMÜŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali YALÇIN**

**Şubat 2021**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahribat yapılmadığını başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitenin herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Talha Enes GÜMÜŞ

25.01.2021

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalıőmalarım esnasında bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaőan, çalıőmalarıma önemli katkılarda bulunan danıőman hocam Sayın Prof.Dr. Mehmet Ali Yalçın'a teőekkürü bir borç bilirim.

Doktora tezimin hazırlanmasında, bilgi ve fikirleri ile katkı sağlayan, çalıőmalarım esnasında her türlü destek ve yardımda bulunan hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mustafa Turan'a teőekkürlerimi sunarım.

Tez izlemelerimde bana yardımcı olan Prof. Dr. Ertan Yanıkoğlu ve Prof. Dr. Ali ztrk'e, çalışma arkadaőlarıma ve Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümüne verdikleri destek ve imknlardan dolayı teşekkür ederim.

Ve ayrıca, çalıőmalarım boyunca beni sabırla destekleyen aileme Őukranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Literatür Taraması .....	3
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	10
BÖLÜM 2.	
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK .....	13
2.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık Tanımı ve Sınıflandırması .....	13
2.1.1. Rotor açısı kararlılığı .....	14
2.1.1.1. Küçük işaret kararlılığı.....	14
2.1.1.2. Geçici kararlılık.....	15
2.1.2. Frekans kararlılığı.....	16
2.1.3. Gerilim kararlılığı.....	17
2.1.3.1. CIGRE gerilim kararlılık tanımı .....	17
2.1.3.2. IEEE gerilim kararlılık tanımı.....	18
2.2. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri .....	18
2.2.1. Güç akışı analizi .....	19

2.2.2. P-V eğrileri .....	22
2.2.3. Q-V eğrileri .....	24
2.2.4. Sürekli güç akışı .....	25
2.2.5. Bara indirgeme yöntemi .....	27
2.2.6. Thevenin eşdeğer devre yaklaşımı .....	29
BÖLÜM 3.	
SÖZDE THEVENİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ	
KULLANILARAK GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ.....	30
3.1. Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametrelerinin Elde Edilmesi .....	30
3.2. Kritik Gerilim İfadesinin Elde Edilmesi.....	37
3.3. Maksimum Güç Transferi ve Kritik Gerilim .....	39
3.4. Kritik Gerilim ve Gerilim Kararlılık İndeksi (VSM <sub>v</sub> ) .....	42
3.5. Kritik Gerilimin Analitik Çözüm Yöntemleri ile Elde Edilmesi.....	43
3.5.1. Yöntem 1 .....	43
3.5.2. Yöntem 2 .....	44
3.6. Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri ve $\theta$ 'dan Bağımsız VSM <sub>v</sub> .....	46
3.7. Optimizasyon ve Analitik Çözümlerinin Karşılaştırılması .....	49
BÖLÜM 4.	
BENZETİM ÇALIŞMALARI .....	51
4.1. IEEE 9 Bara Test Sistemi .....	52
4.2. IEEE 30 Baralı Test Sistemi.....	58
4.3. Farklı Teta Açılıarı ( $\theta$ ) için Gerilim Kararlılık İndeksi .....	63
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR .....	68
BÖLÜM 6.	
ÖNERİLER.....	71

KAYNAKÇA.....	73
ÖZGEÇMİŞ .....	82

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

*	: Eşlenik
CIGRE	: The International Council on Large Electric Systems
E	: Hat Başı Gerilim
$E_{Th}$	: Thevenin Gerilimi
$E_{Ths}$	: Söзде Thevenin Gerilimi
$E_{\alpha}$	: $\alpha$ Ekseni Thevenin Gerilimi İzdüşümü
$E_{\beta}$	: $\beta$ Ekseni Thevenin Gerilimi İzdüşümü
FVSI	: Hızlı Gerilim Kararlılık İndeksi
I	: Akım
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
$I_{end}$	: Endüktif Akım
$I_k$	: k. Bara Yük Akımı
$I_{kap}$	: Kapasitif Akım
$I_m$	: Kompleks Sayı Sanal Kısım
$I_{omik}$	: Omik Akım
$I_{Yük}$	: Yük Akımı
k	: Bara Numarası
$k_{li}$	: Baradaki yük değişim oranını
L-M	: Levenberg-Marquet
$L_{mn}$	: Hattın Kararlılık İndeksi
LQP	: Hat Kararlılık İndeksi
MW	: Mega Watt
N	: Güç Sistemi Bara Sayısı
NLS	: Nonlinear En Küçük Kareler
P	: Aktif Güç
$P_0$	: Barada İlk Aktif Güç Değeri

$P_{Gi}$	: Üretim Barası Aktif Güç Değeri
$P_i$	: i. Bara Aktif Gücü
PMU	: Fazör Ölçüm Birimi
Q	: Reaktif Güç
$Q_{Gi}$	: Üretim Barası Reaktif Güç Değeri
$Q_i$	: i. Bara Reaktif Gücü
R	: Direnç
Re	: Kompleks Sayı Reel Kısım
$R_{Th}$	: Thevenin Direnci
RVSI	: Gerçek Zamanlı Gerilim Kararlılık İndeksi
$S_i$	: j. Bara Görünür Gücü
STEDP	: Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametre
t	: Tanjant Vektörü
Th	: Thevenin
V	: Gerilim
$V_i$	: i. Bara Gerilimi
$V_j$	: j. Bara Gerilimi
$V_k$	: k. Bara Gerilimi
$VSM_V$	: Gerilim Kararlılık İndeksi (Voltage Stability Margin)
$W_C$	: Kritik Değer Faktörü
x	: Durum Değişkeni
X	: Reaktans
$X_{Th}$	: Thevenin Reaktansı
$Y_{ij}$	: i-j Düzümleri Arasındaki Admitans
Z	: Empedans
$Z_{Th}$	: Thevenin Empedansı
$Z_{Ths}$	: Sözde Thevenin Empedansı
$Z_{Yük}$	: Yük Empedansı
$\alpha$	: Alfa, Dikey Eksen
$\beta$	: Beta, Yatay Eksen
$\delta$	: Bara Yük Açısı Değeri
$\Delta E$	: Gerilimdeki Değişim



$\delta_i$	: i. Bara Yük Açısı
$\delta_j$	: j. Bara Yük Açısı
$\delta_s$	: Sözde Bara YkAısı
$\theta$	: Empedans Açısı
$\theta_s$	: Sözde Empedans Açısı
$\lambda$	: Bara Yüklenme Oranı
$\varphi$	: G Açısı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Güç Sistemleri Kararlılık Sınıflandırması .....	13
Şekil 2.2. Güç Sistemi i. Bara .....	21
Şekil 2.3. P-V Eğrisi .....	23
Şekil 2.4. Q-V Eğrisi.....	24
Şekil 2.5. N baralı Güç Sistemi.....	28
Şekil 2.6. 2 Baraya İndirgenmiş Güç Sistemi .....	28
Şekil 2.7. İlgili Bara Thevenin Eşdeğer Devre Modeli .....	29
Şekil 3.1. N Baralı Güç Sistemi Modeli.....	31
Şekil 3.2. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğer Devresi .....	32
Şekil 3.3. Şekil 3.2.'deki Eşdeğer Devrenin Fazör Diyagramı .....	33
Şekil 3.4. Kritik Andaki Thevenin Eşdeğer Devresi.....	37
Şekil 3.5. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğer Devresi .....	40
Şekil 3.6. Maksimum Güç Fazör Diyagramı .....	41
Şekil 3.7. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğeri ve Fazör Diyagramı.....	42
Şekil 3.8. Thevenin Eşdeğeri Fazör Diyagramı Eksen Takımları.....	44
Şekil 3.9. Kabullere Dayalı Olarak, Normal İşletimde, Farklı $\theta$ Açılımları İçin Fazör Diyagram .....	47
Şekil 3.10. Kabullere dayalı olarak, kritik durumda, farklı $\theta$ açılımları için fazör diyagram.....	48
Şekil 4.1. IEEE 9 Bara Test Sistemi .....	52
Şekil 4.2. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 5. Yük Barası Kritik Değerler.....	53
Şekil 4.3. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 5. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri.....	53
Şekil 4.4. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 6. Yük Barası Kritik Değerler.....	55
Şekil 4.5. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 6. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri.....	55
Şekil 4.6. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Yük Barası Kritik Değerler.....	56
Şekil 4.7. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri.....	57

Şekil 4.8. IEEE 30 Baralı Test Sistemi .....	58
Şekil 4.9. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Yük Barası Kritik Değerler .....	59
Şekil 4.10. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri.....	59
Şekil 4.11. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Yük Barası Kritik Değerler.....	60
Şekil 4.12. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri....	61
Şekil 4.13. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Yük Barası Kritik Değerler.....	62
Şekil 4.14. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri....	62
Şekil 4.15. $\theta = 30^\circ$ , $\theta = 40^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	64
Şekil 4.16. $\theta = 50^\circ$ , $\theta = 60^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	64
Şekil 4.17. $\theta = 70^\circ$ , $\theta = 80^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	65
Şekil 4.18. $\theta = 30^\circ$ , $\theta = 40^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	66
Şekil 4.19. $\theta = 50^\circ$ , $\theta = 60^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	66
Şekil 4.20. $\theta = 70^\circ$ , $\theta = 80^\circ$ için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri.....	67

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Güç Akışı Bara Türleri ve Değişkenler .....	20
Tablo 3.1. İletim Hatları Gerilim Seviyesine Göre X/R oranları.....	35
Tablo 3.2. Transformator Gerilim Seviyesine Göre X/R oranları .....	35
Tablo 3.3. Önerilen ve Karşılaştırılan Yöntemler .....	45
Tablo 4.1. IEEE Test Sistemi 5. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri .....	54
Tablo 4.2. IEEE Test Sistemi 6. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri .....	56
Tablo 4.3. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri.....	57
Tablo 4.4. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri.....	60
Tablo 4.5. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri.....	61
Tablo 4.6. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri.....	63
Tablo 4.7. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Farklı Teta Değerleri İçin Kritik Güç VSM <sub>v</sub> Değerleri .....	65
Tablo 4.8. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Farklı Teta Değerleri İçin Kritik Güç VSMV Değerleri .....	67

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Gerilim Kararlılığı, Thevenin Eşdeğer Devresi, Nonlinear Optimizasyon, Güç Sistemleri

Elektrik enerjisine olan talep artımına bağlı olarak büyüyen güç sistemlerinde kararlılık önemli problemlerden biri olmaya devam etmektedir. İyi bilinen açılı kararlılığı problemi yanında gerilim kararlılığı da son yıllarda önemi artan bir problem olarak karşılaşılmakta ve üzerinde bilimsel araştırmalar yapılmaktadır. Gerilim kararlılığı incelemeleri açısından güç sistemleri büyüdükçe bilinmeyen parametre sayısı artmakta ve sistemin analizi daha karmaşık hale gelmektedir. İletim sistemleri dinamik sistemler olduğu için hangi yük durumunda kararsızlık sınırına ulaşılacağını önceden kestirmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle sistemlerin kararlı bir şekilde işletilebilmesi için, sistemin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve kararlılık durumunun anlık değerlendirilmesi gerekmektedir. Güç sisteminin ilgilenilen barasını anlık olarak takip edebilmek için sistemin ilgili barasından görülen Thevenin Eşdeğer devre parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bütün parametreleri bilinen bir sistemde eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için, bara indirgeme yöntemi kullanılıp ilgilenilen bara ve salınım barası haricindeki bütün elemanlar bara admitans matrisine pasif eleman olarak eklenerek, sistemin iki baralı eşdeğer devresi kullanılabilir. Bu yöntem bütün sistem verilerin bilinmesini ve bunun yanı sıra çok işlem yükü gerektiren bir yöntemdir. Son zamanlarda kullanılan fazör ölçüm birimleri ile sistemin farklı baralarından ölçümler alıp, sistemde ilgili baraya ait eşdeğer devre parametreleri hakkında bilgi edinmek mümkün olmakla beraber çok sayıda verinin senkron olarak işlenmesi zorlukları bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir güç sisteminde gerilim kararlılığı analizi yapılacak baraya ait Thevenin eşdeğer devresi parametreleri, yerel bara ölçümleri ve sabit empedans açısı kullanılarak optimizasyon yaklaşımı ile kestirilmiştir. Kestirim sonucu elde edilen eşdeğer devre parametreleri ilgili baradan gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılabilmesi için güç sistemini yeterli doğrulukta temsil etmektedir. Güç sistemini yeterli doğrulukta temsil eden bu Thevenin eşdeğer devre parametre setlerine Sözde (Temsili) Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri (STEDP) denilmiştir. İlgili baradan yapılan ardışıl gerilim, akım ve güç faktörü ölçümleri ile Sözde Thevenin Eşdeğer devre parametreleri kestirimi yapılmış ve ilgili baraya ait kritik gerilim değeri anlık olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kritik gerilim değeri ve bara gerilimi ile baranın kararlılık durumunun daha kolay anlaşılabilmesi için baraya ait gerilim kararlılık indeksi anlık olarak hesaplanmış ve baranın kararlılık durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi edinilmiştir. Önerilen yöntem IEEE 9 ve IEEE 30 baralı test sistemlerinin farklı yük baralarına uygulanmıştır. Önerilen yöntemden elde edilen gerilim kararlılık sınırlarının güç akışı analizinden elde edilen gerilim kararlılık sınırları ile örtüştüğü görülmüştür.

# **VOLTAGE STABILITY ASSESSMENT IN POWER SYSTEMS BY USING PSEUDO THEVENIN EQUIVALENT PARAMETERS**

## **SUMMARY**

Keywords: Voltage Stability, Thevenin Equivalent, Optimization, Power Systems

Stability continues to be one of the major problems in growing power systems in consequence of the increment in demand for electrical energy. In addition to the well-known angle stability problem, voltage stability has also been faced as an increasingly important problem in recent years and a number of scientific studies has been conducted. In terms of voltage stability investigations, the number of unknown parameters increases and the analysis of the system becomes more complex due to the growth in power system. Since transmission systems are dynamic systems, it is not possible to predict at which load the instability limit will be reached. For this reason, it is necessary to monitor the system in real time and evaluate its stability status instantly, in order to operate the system in a stable state. In order to be able to monitor the bus of interest of the power system real time, it is necessary to know the Thevenin Equivalent circuit parameters seen from the relevant bus of the system. In order to obtain the equivalent circuit parameters, in a system with all parameters known, two bus equivalent of the system can be used by utilizing the bus reduction method, all the elements except the bus of interest and slack bus are added in the bus admittance matrix as passive elements. This is a method that requires all system data as well as a lot of processing power. With the recently used phasor measurement units, it is possible to take measurements from different busses of the system and obtain information about the equivalent circuit parameters of the relevant bus in the system, however, there are difficulties in processing a large number of data synchronously. In this thesis study, the Thevenin equivalent circuit of the bus to be analyzed for voltage stability in the power system has been estimated with the optimization approach using local bus measurements and a constant impedance angle. The equivalent circuit parameters obtained from the estimation represent the power system with sufficient accuracy to make voltage stability evaluation from the related bus. The Thevenin equivalent circuit parameter sets representing the power system with sufficient accuracy are so called Pseudo Thevenin Equivalent Circuit Parameters (STEDP). The Pseudo Thevenin Equivalent circuit parameters were estimated with the sequential voltage, current and power factor measurements made from the related bus, and the critical voltage of the related bus was calculated instantaneously. With the calculated critical voltage and bus voltage, the voltage stability index has been calculated instantaneously and real-time information about the stability status of the bus has been obtained more easily to understand the stability state of the bus. The proposed method is applied to different load buses of IEEE 9 and IEEE 30 bus test systems. Conclusively, it was observed that the voltage stability limits obtained from the proposed method coincided with the voltage stability limits obtained from the power flow analysis.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Elektrik enerjisine olan talebin gün geçtikçe artması, güç sistemlerinin kararlı bir şekilde işletilmesini önemli hale getirmektedir. Güç sistemleri günümüzde birçok ülkenin enterkonnekte olduğu büyük ağlara dönüşmüştür. Güç sistemlerinde gerilim ve frekans önemli büyüklükler olarak değerlendirilmektedir. Güç sistemi anlık olarak güç talebini karşılayabilmeli ve çeşitli arıza veya bozululara karşı gerilim – frekans büyüklüklerini kararlı bir şekilde sürdürebilmelidir [1], [2].

Gerilim kararlılığı, elektrik güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde temel bir konudur ve güç aktarım limitlerini belirleyen önemli bir faktördür. Güç sistemindeki gerilim kararlılığı, bozucu etkiye maruz kalan sistemin, bara gerilimlerini belirli işletme limitleri içinde tutabilmesi ile ilgilidir. Bu durumda bara gerilim seviyelerinin kontrol edilemeyecek düzeyde azalması halinde gerilim kararsızlığı meydana gelir. Gerilim çökmelerinin temel nedeni reaktif güç temininin yetersizliğidir. Son 30-40 yıl içerisinde dünyada büyük ölçekli gerilim çökmesi olayları yaşanmıştır. Bunlardan bazıları;

- 19 Aralık 1978 Fransa
- 4 Ağustos 1982 Belçika
- 27 Aralık 1983 İsveç
- 17 Mayıs 1985 Güney Florida, ABD
- 12 Ocak 1987 Fransa
- 5 Temmuz 1990 Baltimore, Washington DC, ABD

tarihlerinde meydana gelmiş olup bu olaylar iletim sistemlerinde dikkatlerin gerilim kararlılığı problemine yönelmesine neden olmuştur [3]. Gerilim kararlılığının tam olarak anlaşılması, gerilim kararsızlığının önlenmesi ve etkilerinin azaltılması güç sistemlerinin sağlıklı işletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Böylelikle, gerilim kararlılığı konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır.

Gerilim kararlılığı değerlendirmeleri güç sistemlerinin verimli ve kabul edilebilir bir çalışma noktası etrafında işletilmesi ve bozucu etki meydana geldiğinde işletme gerilimini belirli aralıkta tutabilmesi için yapılır.

Güç sistemleri; diferansiyel, ayrık ve cebirsel olarak modellenebilir ve bu analiz yöntemleri ile kısa veya uzun dönem analizleri yapmak ve güç sisteminde dinamik etki yapan bileşenleri izlemek mümkündür [4]. Çok sayıda baraya sahip olan gerçek güç sistemlerinin modellenmesi ve doğru verilerin sürdürülmesi zor olmaktadır. Tüm denklem setini ele almak ağır bir yaklaşım olduğundan ve gerilim kararsızlığı çoğunlukla orta vadeli dinamiklerden kaynaklandığından geçici dinamiklerin denge denklemleriyle değiştirilerek kararlılık analizi yapılabilir [5].

Güç sistemi gerilim kararlılığı analizlerinde kullanılan en yaygın yöntem güç akışı analizidir. Güç akışı analizi ile güç sisteminde baralara ait gerilimlerin genlikleri ve açıları, generatörlerin güç üretim değerleri ve hat kayıpları hakkında bilgi edinilir. Güç akışı analizlerinde Newton Raphson veya Fast Decoupled kullanılan en temel iteratif yöntemlerdir [6], [7]. Newton Raphson yönteminde Jacobian matrisinin tekil olduğu nokta gerilim kararlılığı açısından kritik noktadır. Güç akışı ile güç sisteminde ilgilenilen bara için P-V ve Q-V eğrileri çizilerek güç sistemin kritik değerleri bulunabilir. Güç akışı analizi temelli yaklaşımlar genellikle güç sistemlerin planlanması ve yeniden yapılandırılması için uygun olmaktadır. [8], [9].

Fazör Ölçüm Birim'lerin (PMU) geliştirilmesi ile kararlılık analizlerinde yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. PMU'ların kullanımı ile çok sayıda baradan senkron olarak veri alınabilmektedir. Güç sisteminin baralarından senkronize toplanan veriler ile gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılabilmektedir [10], [11]. Ayrıca güç



sistemlerinde Thevenin eşdeğer devresi kullanılarak gerilim kararlılığı analizi çalışmaları yapılmıştır [12], [13]. Thevenin eşdeğeri temelli analizler güç sisteminin kritik değerlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Thevenin eşdeğeri temelli çalışmalarda en büyük sorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesidir. Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesi için en küçük kareler tekniğini kullanan yaklaşımlar [13] ayrıca ters matris çözümü esli kestirimler geliştirilmiştir [10], [14], [15].

PMU esaslı çalışmalarda, çok sayıda baradan alınan verilerle yapılan kestirimlerde, güç sistemi topoloji hızlı değişebildiği için güç sistemi Thevenin eşdeğeri kestirimlerinde hatalar olabilmektedir. Güç sisteminde yerel baradan görülen Thevenin eşdeğer devresine ait hiçbir parametre bilinmemektedir. Thevenin eşdeğer devresini temsil eden, modeli doğrulayan, farklı eşdeğer devre parametre setleri olabilir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda, yerel baradan yapılan ölçümler ve çeşitli yöntemler ile gerçek eşdeğer devre parametrelerine en yakın sonuçlar kestirilmeye çalışılmıştır [16]. Thevenin eşdeğer devre modeli temelli çalışmaların ortak amacı, eşdeğer devre parametrelerinin doğru kestirilmesidir [17]. Oysaki bu çalışmada Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin doğru kestirilmesinin yapılacak kararlılık değerlendirmesi için gerekli olmadığı gösterilecektir.

Bu çalışmada Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için nonlinear optimizasyon teknikleri kullanılmış ve güç sistemini en iyi temsil eden eşdeğer devre parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile güç sisteminin ilgili barasına ait gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılmıştır.

## 1.2. Literatür Taraması

Gerilim kararlılığı değerlendirmesi güç sistemi kararlılığın takip edilmesinde önemli bir husustur. Gerilim kararlılığı değerlendirmesi için literatürde farklı gerilim kararlılık indeksleri önerilmiştir. Kararlılık indeksleri yeni nesil dağıtık üretim santrallerinin yerleşimi ve boyutlandırması, kritik hat ve baraların belirlenmesi ve sistemde gerilim kararsızlığına sebep olacak durumlara karşı önceden önlem alınması

için kullanılır. Gerilim kararlılık indekslerini üç ana başlıkta özetlemek mümkündür [18];

- Hat Gerilim Kararlılık İndeksi [19-21]
- Bara Gerilim Kararlılık İndeksi [22-26]
- Sistem Gerilim Kararlılık İndeksi [27-29]

Hat gerilim kararlılık analizi, güç sistemine hatların taşıma kapasitelerine atıfta bulunan kararlılık indeksleri ile değerlendirilebilir. Tüm değerlendirmeler şönt elemanların ihmal edildiği, iki baralı bir sistemi esas alarak formüle edilmiştir. Dolayısıyla hat gerilim kararlılık indekslerinin çoğunun teorik temeli aynıdır ve aralarındaki fark her bir indekste yapılan farklı kabullerdir.

Musirin ve ark. tarafından önerilen hat gerilim kararlılık indeksi; Hızlı Gerilim Kararlılık indeksi (FVSI) güç akışı temelli bir yaklaşımdır. Önerilen yöntemde iki bara arasındaki iletim hattı için kararlılık indeksi Denklem 1.1.'deki gibi hesaplanır;

$$FVSI_{12} = \frac{4 \cdot Z^2 \cdot Q_2}{V_1^2 \cdot X} \quad (1.1)$$

Z iletim hattının empedansı, X iletim hattının reaktansı,  $Q_2$  ise alıcı baradaki reaktif güçtür.  $V_1$  gönderici baradaki gerilim değeridir. İndeks değeri 1'e yakın hat güç sisteminin en kritik hattı olduğu anlamına gelir. FVSI indeksi güç sistemindeki en zayıf hattı belirlemek için ve güç sisteminin kritik güç ve gerilim değerlerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermişlerdir. İndeks 1'e geldiğinde sistemin kritik noktaya ulaştığını belirtmişlerdir. FVSI indeksi  $L_{mn}$  [30] ve LQP [31] indeksleri ile doğrulanmış ve FVSI indeksinin gerilim çökmesini önlemek için erken uyarı aracı olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir [32].

Bara gerilim kararlılık indeksleri güç sisteminde uygulandığı baranın kararlılığı hakkında bilgi verir. Fakat sistemin geneli hakkında bilgi vermezler. Bu sebeple bara gerilim kararlılık indeksleri sistemlerin zayıf baraları hakkında bilgi verir. Sistem

gerilim kararlılık indeksleri sistemin zayıf baraları ve hatları ile ilgili bilgi vermez ve sadece güç sistemin kritik noktasını tahmin edebilir.

Gerilim kararlılığı analiz yöntemleri arasında yerel bara parametrelerini kullanarak yapılan analizler, önemli yer tutar. Yerel bara temelli analizler, analiz yapılacak sisteme ait bütün sistem parametrelerine ihtiyaç duymamasından dolayı diğer yöntemlere göre hesap kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Yerel bara temelli analizlerde, yerel baradan ölçülen gerilim, akım, güç faktörü gibi elektriksel büyüklükler ile sisteme ait Thevenin Eşdeğeri elde edilerek, güç sistemi kararlılık analizi yapılabilir. Bu kısımda literatürde Thevenin Eşdeğer Devresi kullanılarak yapılan kararlılık analizlerine yer verilecektir.

Khoi Vu ve arkadaşları güç sisteminin ilgili barasından yapılan yerel ölçümlerle, ilgili bara arkasında kalan Thevenin Eşdeğer devre parametrelerini deterministik yöntemler kullanarak belirlemişlerdir. Önerilen yöntem ile yerel bara arkasında kalan Thevenin empedansı değişimi, yerel baradaki yük değişimlerine bağlı olarak sürekli takip edilmiştir. Yük değişimine bağlı olarak elde edilen Thevenin Empedansı değeri ve yük empedans değeri birbirine eşit olduğunda sistemde gerilim çökmesi meydana geldiğini bildiren bir akıllı takip cihazı yapmışlardır. İlave olarak yük gerilimi ve Thevenin empedansı üzerindeki gerilim düşümü birbirine eşit olduğunda gerilim çökmesi meydana geldiğini bildiren akıllı bir takip cihazı yapmışlardır. Önerilen yöntem IEEE 39 baralı Test sisteminde denenmiş ve bütün baralarda aynı karakterde sonuçlar çıktığı belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar güç akışı sonuçları ile karşılaştırıldığında çökmenin generatörlerin reaktif güç limitlerine girdiğinde gerçekleştiğini görmüşlerdir ve güç akışı çözümü ile elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır [12].

M.H.Haque yerel bara büyüklükleri olan gerilimin genliği, aktif güç, reaktif güç bileşenlerini kullanarak, mevcut çalışma noktası hakkında bilgi vermekte ve bir güç sisteminin maksimum izin verilen yüklenme ve gerilim kararlılık marjını belirlemek için kolay bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemde sistemin ilgili barasından yapılan ardışıl iki ölçüm sonrasında ilgili bara arkasında kalan Thevenin Eşdeğer devre parametreleri ters matris yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ardışıl iki ölçüm

arasında sistem topolojisi ve Thevenin Eşdeğer devre parametrelerinin sabit kaldığı kabulü yapılmıştır. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri bir empedans çemberi üzerinde değerlendirilmiş ve gerilim kararlılığı sınırları çember üzerinde gösterilmiştir. Thevenin eşdeğer devre parametreleri ile ilgili baraya ait kritik güç değeri hesaplanmış, gerilim kararlılık indeksi üzerinde değerlendirilmiş ve 0-1 arasında değişen bir indeks elde etmişlerdir. İndeks değeri küçüldükçe sistemin kararsızlığa gittiği gösterilmiştir. Önerilen kararlılık indekslerinde görünür güç temelli olan indeksin sistem yük değişimlerine daha hassas olduğu belirlenmiştir [14].

Brusilowicz Bartosz ve arkadaşları ilgili barada güç sisteminin yerel gerilim kararlılığını izlemek için bir yöntem sunmaktadır. Gerilim kararlılık marjini tahmin etmek için Thevenin eşdeğer devre parametreleri kullanılır. Çalışmada üç ana konu öne çıkmaktadır; Thevenin eşdeğer devre modelinin oluşturulması ve güncellenmesi, gerilim kararlılık indeksinin belirlenmesi ve önerilen yöntemin doğrulanması aşamalarından oluşur. İlgili bara arkasında kalan Thevenin empedans değeri baradaki yük değişiminin, baradaki gerilim değişimine oranından hesaplanır ve baradaki değişikliklerle sürekli olarak güncellenir. Gerilim kararlılık limitini belirlemek için kritik faktör ( $W_C$ ) önermişlerdir.  $W_C$  hesaplanan Thevenin empedansı ve yük empedansının oranından elde edilmektedir. Thevenin empedansı ve yük empedansı birbirine eşit olduğunda  $W_C=1$  olmakta ve sistemin kararlılık limitlerine ulaştığını,  $W_C=0$  olduğunda sistem boşa çalıştığı anlamına gelmektedir. Yapılan benzetim çalışmaları, elde edilen eşdeğer devre parametreleri çizdirilen P-V eğrilerinin maksimum %7 hata ile elde edildiğini göstermişlerdir. İlgili bara arkasındaki Thevenin empedans açısının doğru tahmin edilmesi durumunda gerilim kararlılık indeksinin doğru sonuçlar verdiği, hatalı tahmin edilmesi durumunda kararlılık indeksi belirlemede hatalı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada incelenen sistem empedansın doğru açısı  $88^\circ$  olup, çalışmada  $90^\circ$ ,  $88^\circ$  ve  $83^\circ$  değerleri alınmış ve şayet yük empedans değeri düşük ise hatanın %10 seviyesine çıktığı, yük empedansı büyük ise hatanın tolere edilebildiği belirtilmiştir [33].

Jorge Esteban Tobon ve arkadaşları güç sistemlerinde gerilim çökme noktasının algılanması için gerilim destek yüzeyi ve lokal dengeleme denklemi kavramlarını

kullanmışlardır. Bir referans sinyale ihtiyaç duymadan yerel bara ölçümlerinden empedans eşleştirmesi önermişlerdir. Empedans eşleştirmesi denklemleri en küçük kareler algoritması kullanılarak çözülmüştür. Kestirilen empedans değeri yük empedansının bir katı haline gelir ve böylece sadece gerilim büyüklükleri gerektiren çökme noktası indeksi bulunur. Yazarlar gerilim kararlılık indeksini güç akışı denklemlerine ihtiyaç duymadan hesaplamışlar, IEEE 14 baralı test sisteminde önerilen yöntemi denemiş ve sürekli güç akışı yöntemi ile kararlılık performansını karşılaştırmışlardır. Önerilen yöntemin kısa ve uzun dönem çalışma koşullarında güvensiz çalışma bölgesini tespit etmek için uygun bir yöntem olduğunu göstermişlerdir [34].

Bahram Shakerighadi ve arkadaşları yerel bara ölçümlerden yararlanarak iki veya daha fazla farklı ölçüm seti ile, ölçüm esnasında güç sisteminin değişmediği kabulü ile yerel bara arkasında kalan sistemi temsil eden Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasını önermişlerdir. Önerilen yöntemde yerel bara arkasında kalan Thevenin empedansı, baradaki gerilim değişimlerinin akım değişimlerine oranından hesaplanmış, Thevenin gerilimi ise baradaki yük değişimlerinin baradaki akım değişimlerine oranından hesaplanmıştır. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri iki baralı sisteme dönüştürülen n baralı sistemde sadece ilgili baradaki aktif güç artırılarak, yerel barada gerilim düşmesine ve akımın artmasına sebep olmuş, akım ve gerilim arasındaki ilişkiden yeni bir indeks olan RVSI (Gerçek Zamanlı Gerilim Kararlılık İndeksi) önerilmiştir. Kararlı durumlarda gerilim değeri yaklaşık sabittir bu nedenle gerilim büyüklüğünün değişim oranı sifıra yakın olacağından RVSI değeri 1'den küçüktür. Sistem kararsız çalışma bölgesinde RVSI değeri 1'den büyük değer alır. Önerilen yöntem ile güç sisteminde yerel barada sadece gerilim ve akım değişimleri kullanılarak yeni bir indeks üretilmiştir. Önerilen yöntem karmaşık hesaplar yerine kolay hesaplanabilme özelliğine de sahiptir [35].

S.A. Arefifar ve arkadaşları online olarak yük barasından görülen Thevenin empedansı parametresini takip etmek için üç nokta metodu önermiştir. Önerilen yöntem senkronize ölçümlere ihtiyaç duymamakta ve yük modeline bağımlı değildir. Hat sonundan ölçülen üç ardışıl gerilim ve akım değerleri ile güç sisteminin ilgili barasına

ait Thevenin empedansı kestirimi yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen denklemler nonlinear Gauss-Newton algoritması kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yöntem ile empedans parametreleri hat sonundan sadece yerel ölçümler ile izlenmiştir. Hesaplamalar için senkronize ölçümler gerekli değildir ve yöntem, sistem frekansı ve harmoniklerindeki değişikliklere duyarlı değildir. Pratik uygulamalarda gerekli bilgiler trafo merkezlerinden kolaylıkla elde edilebilme özelliğine sahiptir[36].

Yerel baradan yapılan ölçümler ile Thevenin Eşdeğer devre parametreleri kestirimi için yapılan çalışmaların bir kısmında, ardışıl iki ölçüm arasında ilgili baraya ait Thevenin Gerilimi sabit kaldığı kabulü yapılmıştır [36], [37]. Bazı çalışmalarda ise ardışıl iki ölçüm arasında Thevenin Gerilimlerinin aynı kalmadığı ve fark geriliminin olduğu belirtilmiştir [38]–[40].

S.J.Steven Tsai ve arkadaşları değişen sistem büyüklüklerine dayalı yeni bir Thevenin eşdeğeri hesaplaması yöntemi önermiştir. Önerilen yöntem online Thevenin eşdeğerini tahmin etmek ve sistem gerilim kararlılığını izlemek için en küçük kareler tahmin tekniğini uygulamıştır. Hat sonundan yapılan ardışıl ölçümlerle hesaplanan Thevenin gerilimleri arasında çıkan fark ile ilgili baradaki yük değişimleri arasındaki fark, birbirinden bağımsız değişkenler olduğu için, bu iki değişkenin kovaryansının sıfır olduğunu ve buradan ilgili bara arkasındaki Thevenin empedansını hesaplanmış ve yükün empedans değeri ile kesiştiği noktanın sisteme ait kritik nokta olduğu belirtilmiştir. Önerilen yöntem New England 39 baralı test sisteminde uygulanmış ve değişken yük gücü veya sistemdeki arızalarla, Thevenin eşdeğer empedansını ve yük empedansı izlenmiş, iki empedansın büyüklüğü eşit olduğunda, sistemin kararsız hale geldiği, aksi takdirde sistemin stabil kaldığı gösterilmiştir [41].

Son yıllarda gelişen fazör ölçüm birimlerin (PMU) ile kararlılık analizi için yeni yaklaşımlar ortaya konmuştur. PMU'lar çok noktadan veri toplayabilme imkânı sunduğu için sistemin büyük bölümü hakkında bilgi edinilebilir ve sistem kontrolüne imkân sağlanabilmektedir. PMU ölçümleri ile elde edilen akım gerilim fazörlerinin çok kısa sürelerde senkronize olması beklenmektedir. Güç sisteminin farklı baralarından toplanan senkronize verilerin saklanması ve hızlı değerlendirilmesi yeni

sorunlar meydana getirecektir. Bu alanda yeni çalışmalar yapılmaktadır. Elde edilen bu veriler gerilim kararlılığı ve diğer değerlendirmelerin çok kısa sürede yapılabilmesi mümkün olacaktır[42-45].

Heng-Yi ve arkadaşları güç sisteminin gerilim kararlılığını tahmin etmek ve sistem yöneticilerinin farkındalıklarını arttırmak için fazör ölçümlerine dayalı yeni bir yöntem sunmuşlardır. Yöntem, ani yük bozulmalarından kaynaklanan veri tutarsızlığını ortadan kaldırmak için PMU ölçümleri bir ön işleme tekniği uygulanır. Ölçümler daha sonra birleştirilerek iki kapılı Thevenin Eşdeğer devre modeli kullanarak gerilim kararlılık indeksi hesaplamalarında kullanılır. Önerilen yöntemde, PMU ölçümlerinden elde edilen datalar ile ilgili bara arkasında kalan Thevenin Empedansı hesaplanmış, Thevenin empedansı ve yük empedansını karşılaştıran bir gerilim kararlılık indeksi üzerinde, sistemin kararlılığı değerlendirilmiştir. Uygulanan yöntemin reel karşılığını değerlendirebilmek için sistemdeki jeneratörlerin reaktif güç sınırları dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem IEEE 30,118 ve 300 baralı test sisteminde uygulanmış ve test sonuçları önerilen yöntemin ölçme hataları olmadığı durumlarda maksimum %3,67 hata ile sonuç verdiği gösterilmiştir [46].

Ali Bidadfar ve arkadaşları gerilim kararlılığı değerlendirmelerinde kullanılan klasik yaklaşım olan Thevenin eşdeğeri modelinde, yük barasından görülen Thevenin eşdeğerinin ölçüm zaman aralığında sabit kaldığı kabulüne alternatif olarak senkron fazör ölçümlerine dayalı gerilim kararlılık analizi önermişlerdir. Önerilen yöntem ile sistem değişikliklerini sabit kabul etmeyen dinamik Thevenin eşdeğer modeli geliştirmişlerdir. Dinamik bir sistem üzerinde PMU ile elde edilen ölçümler ile ilgili bara arkasında kalan Thevenin empedansı önerilen yöntem olan nonlineer en küçük kareler kestirim (NLS) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan Thevenin empedansı yük empedansı ile karşılaştırılarak sisteme ait kararlılık analizi yapılmıştır. Önerilen yöntem IEEE 14 baralı test sistemi ve Nordic 32 Baralı Dinamik modeli üzerinde denenmiş ve yöntemin ve bütün baralardan ölçüm yapmak yerine ilgili baradan ölçüm yaparak sistem kararlılığı hakkında bilgi edinilebileceği gösterilmiştir [47].

Sobhy M. Abdelkader ve arkadaşları bir güç sisteminin yerel barasına ait Thevenin eşdeğer parametrelerini belirlemek için yeni bir yöntem sunmuşlardır. PMU ölçümlerini kullanarak Thevenin eşdeğeri parametrelerini hesaplamak için grafiksel bir yöntem, karmaşık gerilim düzlemindeki ölçülen gerilim fazörlerinin temsil edilmesine ve manipüle edilmesine dayanılarak geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, bireysel hesaplama için çok sayıda ölçüm kullanma yeteneğine sahiptir, böylece kötü ve hatalı ölçümlere daha fazla tolerans sağlar. Önerilen yöntem ilgili bara arkasında kalan Thevenin eşdeğer devre parametrelerini PMU ölçümleri ile hesaplamış ve hesap kolaylığını ortaya koymuştur. Yöntemin literatürdeki geçmiş yöntemlerle karşılaştırıldığında doğru bir çözüm önerdiği gösterilmiştir [48].

Literatürde yapılan çalışmalarda hat sonundan Thevenin eşdeğer devresi kestirimi için çeşitli analiz yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Kestirim yapılabilmesi için hat sonundan akım, gerilim ve güç faktörü ölçümleri alınmış ve bu ölçümlerle kestirim çalışmaları yapılmıştır. Bazı çalışmalarda kestirim yapmak için ardışıl üç data kullanılmış [36], bazı çalışmalarda ise ardışıl iki data kullanılmıştır [17]. Analizi yapılacak baradan kestirim yapmak için sisteme ait bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu kabuller ölçüm aralığında sistemin Thevenin Geriliminin sabit kaldığı, Thevenin Empedans açısının belirli aralıklarda olduğu kabulüdür [33], [49], [50]. Thevenin temelli kararlılık analiz çalışmalarında deterministik çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kestirim çalışmasının bir optimizasyon problemi olarak modellenmesi ve yapılacak kabulleri, optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak modellemek, güç sistemindeki ilgili baranın Thevenin Eşdeğer devresinin sistemi daha iyi temsil etmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen Thevenin Eşdeğer devre parametreleri ile sistemin kritik değerlerinin daha doğru hesaplandığı görülmüştür.

### **1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı**

Güç sistemleri gerilim kararlılığı analizlerinde, hesaplama kolaylığı olması adına, ilgili baradan yapılan akım, gerilim ve güç faktörü ölçümleri ile ilgili baradan görülen Thevenin eşdeğer devresi temelli gerilim kararlılık indisleri geliştirilmiştir [51,52].



Thevenin eşdeğer devresi temelli yaklaşımlarda güç sisteminin maksimum güç transferi noktasının belirlenmesine dayanmaktadır. Hat sonu ölçümlerine dayanan kararlılık analizi yöntemlerinde en büyük sorun Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesidir.

Bu tez çalışmasında, yerel baradan yapılan gerilim, akım ve güç faktörü ölçümleri ile güç sistemlerinde kararlılık analiz değerlendirmesi yapılacak olan baranın Thevenin Eşdeğer devresi kestirimi için yeni bir yöntem önerilmiş ve elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile ilgili bara için gerilim kararlılığı değerlendirmesi, kritik gerilim ve güç değerleri hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılan baraya ait Thevenin Eşdeğer devresinin kestirimi için deterministik yöntemler kullanan çalışmalarda elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile hesaplanan kritik değerlerin sistemin gerçek kritik değerlerini temsil etmediği görülmüş olup, bu tez çalışmasında önerilen yöntem kestirim problemini bir optimizasyon problemi olarak değerlendirmiş, deterministik yöntem çözümlerinde kullanılan kabuller optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak hesaba katılmış ve ilgili bara arkasında kalan Thevenin Eşdeğer devre parametreleri kestirilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile sisteme ait kritik değerlerinin sistemin gerçek kritik değerlerine çok daha yakın olduğu tez çalışmasının sonunda gösterilmiş ve sonuçlar güç akışı sonuçları ile doğrulanmıştır. Thevenin eşdeğer devre parametreleri kestirimi ile ilgili literatürdeki kaynaklarda ilgili baradan yapılan ardışıl ölçümlerde iki, üç ve daha fazla ölçüm alınması ile kestirim yapılmış olup [17,36] bu çalışmada kayan pencere mantığı ile ardışıl iki ölçüm alınarak analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. İlgili baradan alınan ölçüm değerleri gerilim ve akımın genlik değerleri olup, kompleks ölçümlere ihtiyaç duyulmamış ve ölçme hatalarına daha duyarlı bir yöntem önerilmiştir.

Literatürde Thevenin Eşdeğer devre parametreleri kestirimi yapılırken, güç sistemine ait yük modelleri olan “sabit güç, sabit empedans ve sabit akım yükleri” ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçları tartışılmıştır [53]. Tez çalışmasında ilgili bara arkasında kalan yük modellerinin orijinal hali korunmuş ve güç sistemi olduğu gibi değerlendirilmiştir, herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır.

Güç sistemleri gerilim kararlılığı analizlerinde Thevenin Eşdeğer devre modeli temelli yaklaşımlarda güç sistemine ait bilinmeyen parametre olan Thevenin Empedansı açısının, literatürde yapılan kestirim çalışmalarında belli bir aralıkta kabul edildiği görülmüştür [49,50]. Bu tez çalışmasında güç sistemin ilgili barasına ait kararlılık analizi yapılırken Thevenin eşdeğer devresinin empedans açısından bağımsız olan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım empedans açısı değerine bağımlı olmaksızın güç sistemi kritik noktasını doğru tahmin etmektedir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Dünyada kararlılık probleminin ortaya çıkışı, meydana gelen büyük kararlılık problemlerine dair özet ve güç sistemlerinde literatürde daha önce yapılan gerilim kararlılık analizleri ve kullanılan yöntemler hakkında bilgi sunulmuş ve bu bilgiler ışığında tezin kapsamı anlatılmıştır.

İkinci bölümde, gerilim kararlılık probleminin tanımlanması, sınıflandırması hakkında ayrıntılar anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, ilgili bara arkasında kalan Thevenin Eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için önerilen yöntem anlatılmış ve elde eşdeğer devre parametreleri ile güç sistemine ait kararlılık analizinin yapılması için gereken gerilim kararlılık indeksi ve uygulama yöntemi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, önerilen yöntem IEEE 9 Baralı test sistemi ve IEEE 30 Baralı test sistemine ait farklı yük baralarında denenmiş ve elde edilen benzetim çalışması sonuçları verilmiştir.

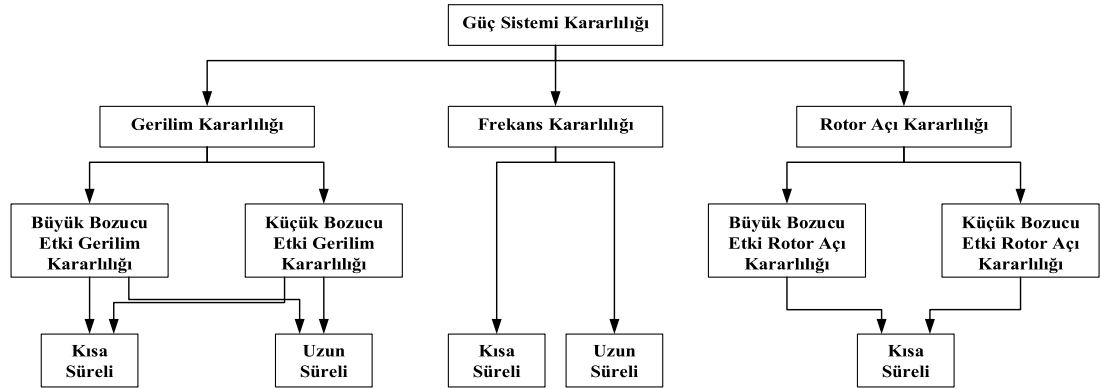
Beşinci bölümde, benzetim çalışması sonunda elde edilen sonuçların sağladığı avantajlar ve güç sistemine sağlayacağı faydalar, güç sistemi kritik değerlere ulaşmadan alınabilecek önlemler anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, yapılabilecek yeni çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

## BÖLÜM 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

### 2.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık Tanımı ve Sınıflandırması

Güç sistemi kararlılığı, güç üretimi ve iletiminin ilk zamanlarından şimdiye kadar güncelliğini yitirmeyen bir çalışma alanı olmuştur. Güç sistemleri büyüdükçe sistem karmaşık hale gelmiş ve sistemin kararlı çalışması daha da önemli bir durum olmuştur. Güç sistemi kararlılığı, bir elektrik güç sisteminin, belirli bir ilk çalışma koşulu için, güç sistem değişkenlerinin çoğu sınırlandırılarak, bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra, tekrar kararlı duruma dönebilme kabiliyetidir [54-57]. Sistemde meydana gelebilecek bozucu etkiler, arızalar, ani yük değişiklikleri, generatör devreden çıkması, hat kopması, gerilim çökmesi veya bu etkilerin birden fazlasını aynı anda içeren durumlar olabilir. Güç sistemi kararlılığı genel olarak rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.1.'de güç sistemleri kararlılık sınıflandırması verilmiştir.



### 2.1.1. Rotor açısı kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, enterkonnekte güç sistemlerindeki senkron makinelerinin bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra senkronizasyonda kalma yeteneği olarak tanımlanır. Bu durum sistemdeki bütün senkron makinelerin elektromanyetik tork ve mekanik torku arasındaki dengeyi koruma yeteneğine bağlıdır. Bazı generatörlerin artan açısal salınımları şeklinde ortaya çıkabilecek kararsızlık, diğer generatörlerle senkronizasyonlarını kaybetmelerine neden olabilir.

Rotor açısı kararlılık problemi, güç sistemlerinde bulunan elektromekanik salınımların incelenmesini içerir. Bu problemdeki temel faktör, senkron makinelerin güç çıkışlarının rotor açıları değiştikçe değişmesidir. Kararlı durum koşulları altında, her generatörün giriş mekanik torku ile çıkış elektromanyetik torku arasında denge vardır ve hız sabit kalır. Şayet bozucu etki sonucu sistemde bozulma meydana gelirse, bu denge bozulur ve dönen bir cismin hareket yasalarına göre makinelerin rotorlarının hızlanması veya yavaşlamasıyla sonuçlanır. Bir generatör geçici olarak başka bir generatörden daha hızlı çalışıyorsa, rotorunun açısal konumu, yavaş generatöre göre ileride olacaktır ve ortaya çıkan açısal fark, güç-açı ilişkisine bağlı olarak yükün bir kısmını yavaş generatörden hızlı generatöre aktaracaktır. Bu durum, hız farkını ve dolayısıyla açısal ayırımı azaltma eğilimindedir. Güç-açı ilişkisi doğrusal olmayan bir durumdur ve belli bir sınırın ötesinde, açısal ayırmadaki bir artışa, güç aktarımındaki bir azalmaya eşlik eder, böylece açısal fark daha da artar. Sistem bu rotor hız farklılıklarına karşılık gelen kinetik enerjiyi absorbe edemezse kararsızlık ortaya çıkar. Herhangi bir durum için, sistemin kararlılığı, rotorların açısal konumlarındaki sapmaların yeterli geri yükleme torklarıyla sonuçlanıp sonuçlanmamasına bağlıdır [56]. Rotor açı kararlılığı, küçük işaret kararlılığı ve geçici kararlılık olmak üzere iki alt kategoriye ayrılır.

#### 2.1.1.1. Küçük işaret kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı, güç sisteminin küçük bozucu etkiler esnasında ve sonrasında senkronizasyonu sürdürebilme yeteneğidir. Küçük bozucu etkiler, küçük yüklerin

açılması veya kapatılması, hat açma, küçük generatörlerin devreye girmesi gibi küçük yük değişiklikleri olabilir. Küçük işaret kararlılığı güç sisteminin başlangıçtaki çalışma durumuna bağlıdır ve iki şekilde bozulma meydana gelebilir. Birincisi senkronizasyon torku eksikliğinden dolayı rotor açısında artış, ikincisi yeterli sönümleme torku olmadığından artan genlikte rotor salınımlarıdır.

Günümüzün güç sistemlerinde, küçük işaret rotor açısı kararlılığı sorunu genellikle salınımların yetersiz sönümlenmesi ile ilişkilidir. Periyodik olmayan kararsızlık sorunu, sürekli hareket eden generatör gerilim regülatörlerinin kullanılmasıyla büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır.

Küçük işaret rotor açısı kararlılık sorunları, yerel veya küresel olabilir. Yerel sorunlar, güç sisteminin küçük bir bölümünü içerir ve genellikle tek bir elektrik santralının güç sisteminin geri kalanına karşı rotor açısı salınımları ile ilişkilidir. Bu tür salınımlara yerel tesis durumu salınımları denir. Bu salınımların sönümlenmesi, elektrik santrali, generatör uyarma kontrol sistemleri ve santral çıkışından görülen iletim sisteminin gücüne bağlıdır. Küresel sorunlar, büyük üretici grupları arasındaki etkileşimlerden kaynaklanır ve yaygın etkileri vardır. Bir bölgedeki bir grup generatörün başka bir bölgedeki bir grup generatöre karşı salınımlarını içerirler. Bu tür salınımlara ara alan durumu salınımları denir. Karakteristikleri çok karmaşıktır ve yerel tesis durumu salınımlarından önemli ölçüde farklıdır. Özellikle yük özelliklerinin, ara alan durumlarının kararlılığı üzerinde büyük bir etkisi vardır [56].

Küçük işaret kararlılığı çalışmalarında ilgilenilen zaman çerçevesi, bozucu etki meydana geldikten sonra 10-20 saniye arasındadır.

#### **2.1.1.2. Geçici kararlılık**

Geçici kararlılık, bir güç sistemde iletim hattındaki kısa devre gibi ciddi bir bozucu etkiye maruz kaldığında senkronizasyonu sürdürme yeteneği olarak tanımlanır. Meydana gelen sistem cevabı, generatör rotor açılarının büyük sapmalarına neden olur ve doğrusal olmayan güç açısı ilişkisinden etkilenir. Geçici kararlılık, sistemin ilk

çalışma şartlarına ve arızanın boyutuna bağlıdır. Kararsızlık genellikle yetersiz senkronizasyon torku nedeniyle periyodik olmayan açılma biçimindedir ve ilk salınım kararsızlığı olarak ortaya çıkar. Ancak, büyük güç sistemlerinde, geçici kararsızlık her zaman tek bir durumla ilişkili ilk salınım kararsızlığı olarak ortaya çıkmayabilir. Bu durum, yavaş bir ara alan salınım durumundan ve yerel tesis salınım durumunun süperpozisyonunun bir sonucu olabilir ve ilk salınımın ötesinde büyük bir rotor açısı sapmasına neden olabilir [56]. Aynı zamanda, tek bir durumu etkileyen doğrusal olmayan etkilerin sonucu da ilk salınımın ötesinde kararsızlığa neden olabilir.

Geçici kararlılık çalışmalarında ilgilenilen zaman genellikle bozucu etkinin ardından 3-5 saniye arasındadır. Çok büyük sistemler için 10-20 saniyeye kadar uzayabilir [55].

### **2.1.2. Frekans kararlılığı**

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminin, üretim ve yük arasında önemli bir dengesizlikle sonuçlanan ciddi bir sistem bozukluğunun ardından sabit frekansı sürdürme yeteneğini ifade eder. Frekansın zamana göre değişim oranı güç yetersizliğinin anlık bir göstergesidir ve MW dengesizliğini başlatabilir. Bir güç sisteminin düzgün çalışması için frekansı nominal çalışma aralığında tutmak çok önemlidir. Yarı denge durumu, bir ana bağlantı hattının kaybı, büyük bir üretim kaybı veya büyük bir aşırı yüklenmenin ani bir etkisi gibi büyük bir bozucudan sonra, ciddi bir üretim yük gücü dengesizliği meydana gelebilir. Bu, hızlı bir frekans düşüşüne neden olur ve röle korumaları güç santrali bağlantısını keser. Bu, durumu daha da geri dönülmez hale getirir ve nihayet tüm sistemin çökmesine yol açabilir [57].

Büyük sistem arızaları frekans, güç akışı, gerilim ve diğer sistem değişkenlerinde büyük sapmalara neden olur ve geleneksel geçici kararlılık veya gerilim kararlılığı çalışmalarında modellenmeyen süreçlerin, kontrollerin ve korumaların göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Bu süreç, çok yavaş olabilir veya sadece gerilim ve frekans koruma röleleri gibi sistem elemanları için tetiklenebilir. Enterkonnekte güç sistemlerinde, bu durum en çok sistemlerin adalara bölünmesini izleyen koşullarla ilişkilidir. Bu durumda kararlılık, her adanın minimum yük kaybı ile bir işletme eşitliği

durumuna ulaşıp ulaşmayacağı sorusudur. Bu, makinelerin göreceli hareketinden ziyade ortalama frekansı ile kanıtlandığı gibi adanın genel tepkisi ile belirlenir. Genel olarak, frekans kararlılığı sorunları, donanım yanıtlarındaki yetersizlikler, kontrol ve koruma cihazlarının zayıf koordinasyonu veya yetersiz üretim rezervi ile ilişkilidir.

Frekans bozulması esnasında, yapılan işlem süreleri ve cihazların karakteristik süreleri, düşük frekanslı yük atma, generatör kontrolleri ve koruma cihazların tepkisine bağlı olarak birkaç saniyeden dakikalar mertebesine kadar değişebilir. Bu nedenle, frekans kararlılığı kısa vadeli veya uzun vadeli bir durum olabilir. Kısa vadeli frekans kararsızlığına bir örnek, yetersiz düşük frekans yükü atma ile zayıflatılmış bir adanın oluşmasıdır, öyle ki frekans hızla azalır ve birkaç saniye içinde adanın devre dışı kalmasına neden olur.

### **2.1.3. Gerilim kararlılığı**

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin, normal çalışma koşulları altında bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra sistemdeki bütün bara gerilimlerini belirlenmiş işletme limitleri içinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu durum güç sisteminde üretilen ve talep edilen reaktif güçler arasındaki dengeyi koruma yeteneğine bağlıdır. Gerilim kararsızlığı sistemde yük bara gerilimlerinin kademeli olarak düşmesi veya gerilimin yükselmesi şeklinde ortaya çıkabilir [4]. Literatürde zaman dilimlerini, sistem durumlarını, büyük veya küçük bozucu etki gibi farklı yaklaşımları değerlendirerek çeşitli gerilim kararlılığı tanımları yapılmıştır. Elektrik güç sistemlerinde yenilikçi çalışmalara öncülük eden IEEE ve CIGRE çalışma grubuna ait gerilim kararlılığı tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

#### **2.1.3.1. CIGRE gerilim kararlılık tanımı**

Normal çalışma koşullarındaki bir güç sistemi, herhangi bir küçük bozucu etki ardından, yüklere yakın gerilimler aynı veya bozucu öncesi değerlerine yakınsa, küçük bozuculara karşı kararlıdır. Belirli bir çalışma durumunda ve belirli bir bozulmaya maruz kalan bir güç sistemi, yüklerin yakınındaki gerilimler bozulma sonrası denge

değerlerine yaklaşırsa sistem kararlıdır. Gerilim kararsızlığından sonra, bozucu etki sonrası gerilimler kabul edilebilir sınırların altındaysa, bir güç sistemi gerilim çökmesine uğrar ve bu çökme bütün sistem için ve sistemin bir bölümü için olabilir [58,59].

### **2.1.3.2. IEEE gerilim kararlılık tanımı**

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin gerilimi koruma yeteneğidir. Gerilim çökmesi, gerilim kararsızlığın sistemin önemli bir bölümünde gerilim kaybına neden olduğu süreçtir. Gerilim güvenliği, bir sistemin sadece kararlı bir şekilde çalışması değil, aynı zamanda bir acil durumu veya sistem değişikliğini takiben kararlı kalma yeteneğidir. Bozucu etki, yükteki artış veya sistem değişiklikleri gerilimin hızla düşmesine neden olduğunda ve operatörler ve otomatik sistem kontrolörleri gerilim düşmesini durdurmada başarısız olduğunda, sistem gerilim kararsızlığı durumuna girer. Gerilim düşüşü sadece birkaç saniye veya dakikalar boyunca sürebilir. Bozucu etki azalmadan devam ederse açığı kararsızlığı veya gerilim çökmesi meydana gelecektir [60].

## **2.2. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri**

Güç sistemleri büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında yeni zorluklarla karşı karşıya kalır. Gerilim kararsızlığı, bu tür bir durumda güç sistemi performansında düşüşe neden olan oldukça sık görülen bir durumdur. Sistem çökmelerini önlemek için, güç sistemi gerilim kararlılığı veya çeşitli sistem koşulları açısından analiz edilmelidir. Gerilim kararlılığı analizinde temel amaç, sistemin maksimum yüklenebilirlik sınırını ve gerilim kararsızlığının nedenlerini belirlemektir. Sürekli hal gerilim kararlılık analizi bu bilgiyi verir [61]. Bir güç sistemindeki gerilim kararlılığı problemini analiz etmek için temel olarak iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar dinamik analiz ve statik analizdir.

Dinamik analiz, gerilim kararlılığı probleminin neden ve nasıl meydana geldiğini araştırır ve sistemin zaman yanıtlarının en doğru göstergesini sağlar. Bu nedenle dinamik analiz, özellikle kararsızlığa yol açan karmaşık olay dizisi ile ilgili olarak,



üretim kaybı ve sistem arızaları gibi hızlı gerilim çökmesi durumları için son derece kullanışlıdır. Ancak dinamik analizler zaman alıcıdır ve duyarlılık veya kararlılık derecesi gibi bilgileri sağlamada yetersizdir [62].

Statik yaklaşımlar güç sisteminin belirli bir çalışma noktasının uygulanabilirliğini inceler ve duyarlılık veya kararlılık derecesi gibi bilgiler sağlar. Dinamik yaklaşımlardan çok daha verimli ve daha hızlıdır. Çeşitli sistem koşullarında güç sistemlerinin gerilim kararlılığı analizine daha uygundur ve güç sistemlerinin sınır değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Güç sistemine ait sınır değerlerin bulunmasında en temel yöntem güç akışı yöntemidir. Güç sistemine ait sınır değerler, P-V ve Q-V eğrisi yöntemleri kullanılarak hesaplanabilir ancak bu iki yöntem, birbirini izleyen güç akışı çalışmaları nedeniyle zaman alıcıdır. Hesaplama süresini azaltmak için sürekli güç akışı yöntemi kullanılabilir ve sürekli güç akışı ile gerilime duyarlı baralar hakkında bilgi edinilebilir. Sürekli güç akışı yönteminde, en düşük bara gerilim marjinine sahip olan bara kritik bara olarak tanımlanır. Güç sistemi iki baralı sisteme bir sisteme indirgenerek kararlılık analizi yapılabilir ve ilgili baraya ait maksimum yüklenebilirlik sınırları bulunabilir. Hesap kolaylığı ve daha az veri ile işlem yapabilmek için güç sisteminde analizi yapılacak baradan görülen Thevenin eşdeğer devre modeli kullanılarak, baraya ait kararlılık analizi, maksimum yüklenme sınırları kestirimi yapılabilir. Bahsedilen kararlılık analiz yöntemleri hakkında detaylı bilgiler verilecektir.

### **2.2.1. Güç akışı analizi**

Güç akışı, güç sistemlerini işletilmesinde ve planlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [63]–[65]. Bir güç sisteminin güç akışı modeli, ağ topolojisi, yük ve üretim verileri kullanılarak oluşturulur. Güç akışı çıktıları, bara gerilimleri, güç sistemindeki hatlar üzerindeki güç akışlarını ve sistem kayıplarını içerir. Bu çıktılar, düğüm denklemleri çözülerek elde edilir. Bu denklemler doğrusal olmadığından, Newton-Raphson [66], Gauss-Seidel [67] ve Fast Decoupled [68] gibi iteratif yöntemler bu problemi çözmek için yaygın olarak kullanılır.

Güç akışı analizinin amacı, belirli bir yük, üretim ve ağ durumu için gerilimleri genlik ve açı olarak hesaplamaktır. Tüm baralar için gerilimler bilindiğinde, hatlardaki güç akışları ve kayıplar hesaplanabilir. Güç akışı problemlerini çözmenin başlangıç noktası, sistemdeki bilinen ve bilinmeyen değişkenleri belirlemektir. Bu değişkenlere bağlı olarak, bara tipleri Tablo 2.1.'de gösterildiği gibi üç tipte sınıflandırılır. Bunlar sonsuz güçlü bara, üretim barası ve yük barasıdır.

Tablo 2.1. Güç Akışı Bara Türleri ve Değişkenler

Bara Türü	Kontrol Değişkeni	Durum Değişkeni
Sonsuz Güçlü Bara	V, $\delta$	P, Q
Üretim Barası	P, V	Q, $\delta$
Yük Barası	P, Q	V, $\delta$

Yük barasının hem gerilim büyüklükleri hem de açıları bilinmezken, üretim barasının gerilim açısı ve reaktif gücü bilinmemektedir. Sonsuz güçlü bara gerilim ve açısı bilindiğinden, çözülmesi gereken değişkenler vardır. N baralı ve g adet generatörlü bir sistemde  $2(N-1) - (g-1)$  bilinmeyenler vardır. Bu bilinmeyenleri çözmek için aktif ve reaktif güç dengesi denklemleri kullanılır. Bu denklemleri yazmak için iletim sistemi, bara admitans matrisi (Y-bus) kullanılarak modellenir.

Bir güç sisteminin bara admitans matrisi, sistemin soyut bir matematiksel modelidir. İletim hatlarının admitans değerlerinden oluşur. Bara admitans matrisi, bara sayısına eşit boyutlara sahip bir kare matristir. Bu matris, köşegen boyunca simetriktir. Denklem 2.1.'de bara admitans matrisi sembolik değerlerle gösterimi verilmiştir.

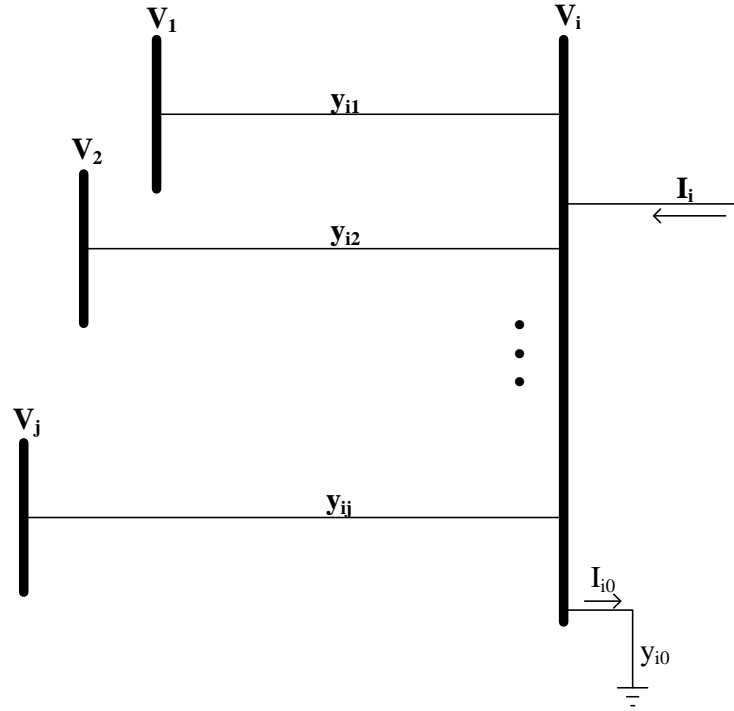
$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Köşegen elemanların ( $Y_{ii}$ ) değerleri, i'inci baraya bağlı hatların admitansının toplamına eşittir. Köşegen dışı elemanlar ( $Y_{ij}$ ), iki barayı (i ve j'yi) bağlayan hat admitansların toplamının negatif değerine eşittir.

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.2)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.2)$$

Güç sistemi bir barasından enjekte edilen net güç, Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi bara gerilimi ( $V_i$ ), komşu bara gerilimleri ( $V_j$ ) ve bara ile komşu bara ( $y_{ij}$ ) arasındaki admitanlar kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2.2. Güç Sistemi i. Bara

Güç sisteminde i. baraya gelen toplam akımlar Denklem 2.4.'te verildiği gibi olur.

$$I_i = V_i \cdot y_{i0} + y_{i1} \cdot (V_i - V_1) + y_{i2} \cdot (V_i - V_2) + \dots + y_{in} \cdot (V_i - V_n) \quad (2.4)$$

Baraya ait güç denklemi Denklem 2.5.'te verildiği gibi olur.

$$S_i^* = P_i - j \cdot Q_i = V_i^* \cdot I_i \quad (2.5)$$

Denklem 2.5. ifadesi açık olarak yazılırsa Denklem 2.6. elde edilir.

$$S_i^* = V_i^* (V_i \sum_{j=0} y_{ij} - \sum_{j=1} y_{ij} V_j) = V_i^* (V_i Y_{ij} + \sum_{j=1} Y_{ij} V_j) \quad (2.6)$$

Denklem 2.6. ifadesi reel ve imajiner kısımlarına ayrılarak, aktif ve reaktif güçler hesaplanır.

$$P_i = Re \left\{ V_i^* \left( V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}} y_{ij} V_j \right) \right\} \quad (2.7)$$

$$Q_i = -Im \left\{ V_i^* \left( V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}} y_{ij} V_j \right) \right\} \quad (2.7)$$

Baradaki aktif ve reaktif güçler aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.8)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.9)$$

Elde edilen aktif ve reaktif güç denklemleri olan Denklem 2.8. ve Denklem 2.9. kullanılarak güç sistemine ait bilinmeyenler hesaplanır ve ilave olarak güç sistemindeki kayıplarda hesaplanır. Güç akışı analizi ile sistemde kararlılık analizi yapılacak baranın güç değeri adım adım arttırılır ve her adımda güç akışı yapılarak, güç akışı denklemlerinin yakınsama yapmadığı noktaya kadar bu işlem devam ettirilir. Güç akışı denklemlerin çözümsüz olduğu noktada, sistemde ilgilenilen baranın kritik değerleri hesaplanmış olur. Güç akışı analizi çalışması aynı zamanda kararlılık analizi çalışmalarında, kritik değerlerin belirlenmesinde referans yöntemidir.

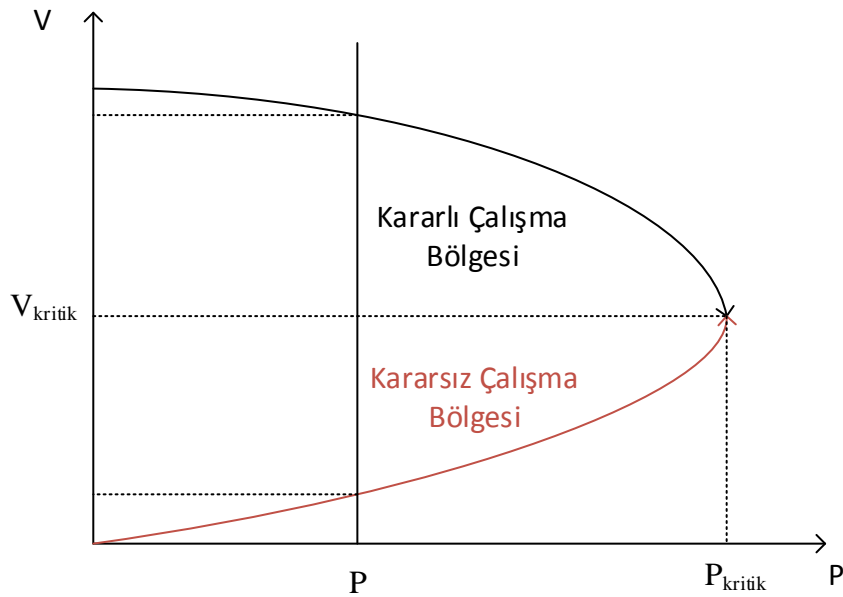
### 2.2.2. P-V eğrileri

Gerilim kararlılık analizinde, yüke aktarılan güç ile yük barasının gerilimi arasında güçlü bir ilişki vardır. Bir baradan diğer baraya güç aktarımındaki değişim, bara gerilimini etkiler. Bu durum, P-V eğrileri kullanılarak incelenebilir. Güç sisteminde yük barasına ait PV eğrileri çizdirmek için, sabit güç yükü modeli kullanılarak Denklem 2.10.'daki gibi hesaplanır.

$$P = P_0 \cdot (1 + \lambda \cdot k) \quad (2.10)$$

Denklem (2.10.)'da  $P_0$  ilgili baradaki güç değeri,  $\lambda$  yüklenme faktörü ve  $k$  ise yük artış faktörüdür. Güç sistemine ait güç akışı çözümü temel durum olarak alınmıştır. PV eğrisi elde etmek için yüklenme faktörü ( $\lambda$ ) ve yük artış faktörü ( $k$ ) kullanılarak yüke ait güç değeri, güç faktörü sabit tutularak değiştirilir. Mevcut yük durumu için güç akışı yapılarak bara gerilimi tekrar hesaplanır. Yüklenme faktörü adım adım arttırılarak, her adım sonunda yeni güç değerine ait bara gerilimi hesaplanır ve bu durum güç akışında yakınsama olmayana kadar devam ettirilir. Temel durumdan gerilim çökmesi meydana gelene kadar elde edilen güç ve gerilim değerleri, analizi yapılacak yük barasına ait PV eğrisini verir [61].

Şekil 2.1.'de gösterilen P-V eğrisinde, gerçek güç yükü  $P$  ile ilgili üç bölge vardır. Kiritik güç değerine kadar olan ilk bölgede, güç akış denkleminin her biri için biri kararlı gerilim ve diğeri kararsız gerilim olmak üzere iki çözümü vardır. Yük artırılırsa, iki çözüm birleşir ve  $P$  maksimum değerine ulaşır. Yük daha da artırılırsa, güç akış denkleminin bir çözümü yoktur. "Maksimum yükleme noktasına" karşılık gelen gerilim kritik gerilim olarak adlandırılır.

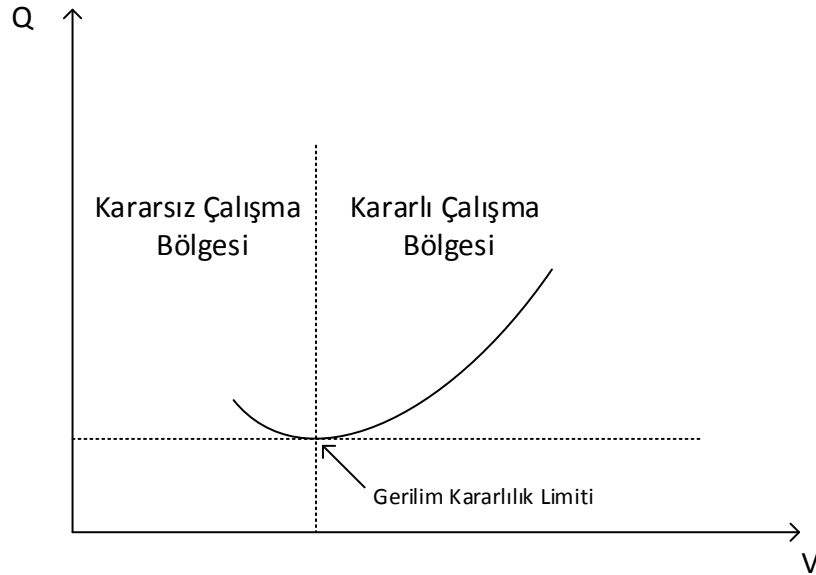


Şekil 2.3. P-V Eğrisi

### 2.2.3. Q-V eğrileri

Q-V eğrileri, reaktif güçteki değişimin sistemin gerilimi üzerindeki etkisini inceler. Q-V ilişkisi, reaktif güç enjeksiyonlarına göre bara gerilimlerinin hassasiyetini ve değişimini gösterir. Q-V duyarlılığı bütün baralar için pozitifse gerilim kararlı ve Q-V duyarlılığı en az bir bara için negatif ise gerilim kararsızdır.

Q-V eğrileri oluşturmak için geleneksel yöntem Q-V eğrisi stres testidir [69]. Güç akışı temelli bir durum için, seçilen bir test barasına hayali bir senkron kondansatör eklenir ve bara tipi hayali bir PV barasına dönüştürülür. Güç akışları, hayali senkron kondansatörden bir dizi gerilim ayarı ile çözülür. Daha sonra Q-V eğrisi, kondansatörden gelen reaktif güç çıkışına karşı bara gerilim eğrisidir. Şekil 2.3.'de bir dizi yük akışı çözümü tarafından üretilen tipik bir Q-V eğrisini göstermektedir. Şekil 2.3.'de, türev ( $dQ/dV$ )'nin sıfır olduğu noktada bir gerilim kararlılığı sınırını göstermektedir. Bu nokta aynı zamanda kararlı bir çalışma için minimum reaktif güç gereksinimini de tanımlar [56].



Şekil 2.4. Q-V Eğrisi

#### 2.2.4. Sürekli güç akışı

Geleneksel güç akışı metodunda Jakobien matrisi gerilim kararlılık sınırında tekil hale gelir. Bu problem, sürekli güç akışı kullanılarak aşılabilir. Sürekli güç akışı belirli bir yük-üretim değişim senaryosu için bir sonraki kararlı çalışma noktası bulur. Sürekli güç akışı, bir devam parametresi içerecek şekilde yeniden formüle edilmiş bir dizi güç akışı denkleminin çözümüdür. Yöntem, tahmin-düzeltilme tekniğine dayanmaktadır [70]. Devam sürecinin ara sonuçları, sistemin gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesine eğilimli alanlar hakkında bilgi verir. Sürekli güç akışı yöntemini uygulamak için, geleneksel güç akışı denklemlerinin bir yük parametresi,  $\lambda$  içerecek şekilde yeniden düzenlenmesi gerekir. Dolayısıyla, yeni güç akışı denklemleri gerilim (V), bara açısı ve yük parametresi  $\lambda$ 'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Güç akışı denklemleri yeniden düzenlenirse;

$$0 = P_{Gi}(V, \delta, \lambda) - P_{Li}(V, \delta, \lambda) - P_{Ti} \quad (2.11)$$

$$0 = Q_{Gi}(V, \delta, \lambda) - Q_{Li}(V, \delta, \lambda) - Q_{Ti} \quad (2.12)$$

$$P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i \cdot V_j \cdot y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.13)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i \cdot V_j \cdot y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.14)$$

$$0 < \lambda < \lambda_{kritik} \quad (2.15)$$

Yukarıda verilen denklemlerde L bara yükünü, G baradaki üretimi ve T bara enjeksiyonunu temsil etmektedir.  $\lambda=0$  durumu güç sistemine ait temel durumu,  $\lambda=\lambda_{kritik}$  güç sisteminin kritik değerlere ulaştığını gösterir.  $V \angle \delta_i$  bara gerilimi ve  $y_{ij} \angle \theta_{ij}$  bara admitans matrisinin i, j'inci elemanıdır.

Farklı yük değişim senaryolarını uygulayabilmek için yükler aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$P_{Li}(\lambda) = P_{Li0} \cdot (1 + \lambda \cdot k_{Li}) \quad (2.16)$$

$$Q_{Li}(\lambda) = Q_{Li0} \cdot (1 + \lambda \cdot k_{Li}) \quad (2.17)$$

$P_{Li}$  ve  $Q_{Li}$  baradaki temel duruma ait aktif ve reaktif güçlerdir.  $k_{Li}$  ve  $\lambda$  baradaki yük değişim oranını belirleyen çarpanlardır. Güç üretim denklemleri Denklem (2.18)'daki gibi düzenlenir.

$$P_{Gi}(\lambda) = P_{Gi0} \cdot (1 + \lambda \cdot k_{Gi}) \quad (2.18)$$

Kararlı durum denklemleri Denklem (2.19)'daki gibi olur.

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.19)$$

Tahmin adımı, bilinen bir çözüme dayanarak bir sonraki P-V eğrisi çözümünü tahmin eder. Tanjant vektörü Denklem (2.20)'den hesaplanır.

$$[F_\delta, F_V, F_\lambda] \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (2.20)$$

Tanjant vektörü güç akışı denklemlerinin türevi alınarak hesaplanır. t tanjant vektörü ve  $e_k$  k. elemanı 1 olan, diğer elemanları 0 olan satır vektörüdür.

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_V & F_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \cdot [t] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Eğer k indeksi doğru seçilmişse, artırılmış Jacobian matrisinin kritik noktada tekil olmadığını garanti eder. Tanjant vektörü Denklem (2.20)'den hesaplandıktan sonra, sonraki çalışma noktasının tahmini Denklem (2.22)'te verildiği gibi yapılır.

$$\begin{bmatrix} \lambda^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.22)$$



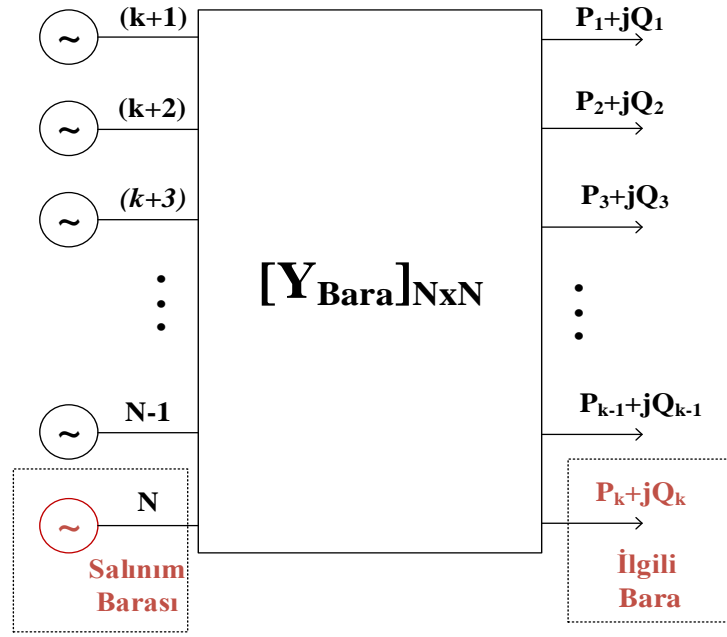
$\sigma$  adım boyutunu gösteren bir değerdir. Bir sonraki adım, öngörülen çözümü düzeltmektir. Bunun yapılabilmesi için yerel parametrelendirme, orijinal denklem kümesinin, durum değişkenlerinden birinin değerini belirten bir denklemlerle eşitlikle arttırmaktır [71].

$$\begin{bmatrix} F(x) \\ x_k - n \end{bmatrix} = 0 \quad (2.23)$$

Denklem 2.23.'te  $\eta$  değeri  $\delta$ ,  $V$ 'yi içeren  $x$  durum değişkeninin  $k$ . ögesi için uygun bir değerdir. Sürekli güç akışında güç sisteminin bütün baralarında yüklenme faktörüne  $\lambda$  adım adım artırılır ve kritik noktaya ulaşıldığında sürekli güç akışı durdurulur. Kritik noktaya, sistemde yüklenme maksimum hale geldiğinde ulaşılır. Kritik noktada, yüklenme faktörüne ( $\lambda$ ) karşılık gelen tanjant vektör bileşeni sıfırdır ve kritik noktayı geçtikten sonra negatif değer alır. Sürekli güç akışında bütün baralar aynı yüklenme faktörü ile artırıldığından gerilimin en çok düştüğü bara sistemin en zayıf barası olur.

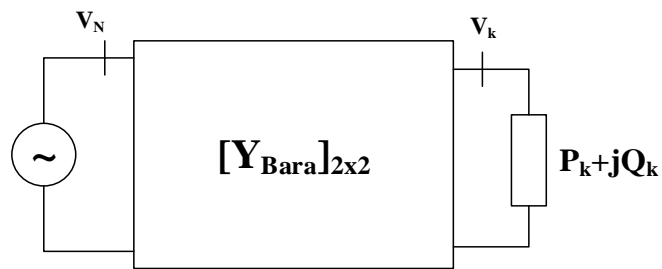
### 2.2.5. Bara indirgeme yöntemi

Bara indirgeme yöntemi,  $N$  baralı bir güç sisteminin, gerilim kararlılığı analizi yapılacak bara ile salınım barası arasına yani iki baraya indirgenmesi şeklinde gerçekleşir. Bara indirgeme yönteminde ilk olarak güç sisteminin bütün baralarına ait gerilim ve güç değerlerinin hesaplanması için güç akışı yapılır.



Şekil 2.5. N baralı Güç Sistemi

Şekil 2.5.'te verilen güç sisteminde analizi yapılacak bara ve salınım barası dışındaki bütün baraların aktif ve reaktif güçleri baraya ait gerilim değerleri kullanılarak şönt elemanlara dönüştürülürler. Elde edilen şönt elemanlar mevcut bara admitans matrisine, akım yönleri dikkate alınarak eklenir. Bara admitans matrisine gerekli eklemeler yapıldıktan sonra, kararlılık analizi yapılacak bara elemanları 1. satır ve sütunda, salınım barasına karşılık gelen elemanlar da 2. satır ve sütuna gelecek şekilde bara admitans matrisi tekrar düzenlenir. Elde edilen yeni bara admitans matrisinde bara indirgeme işlemi uygulanarak bara admitans matrisi (2x2) lik yeni matrisine dönüştürülür. Elde edilen yeni bara admitans matrisi N baralı güç sisteminin sonsuz barası ve ilgili barası temsil eden iki baralı sistemdir. Şekil 2.6.'da güç sistemi indirgeme işlemi yapılmış sistem verilmiştir.



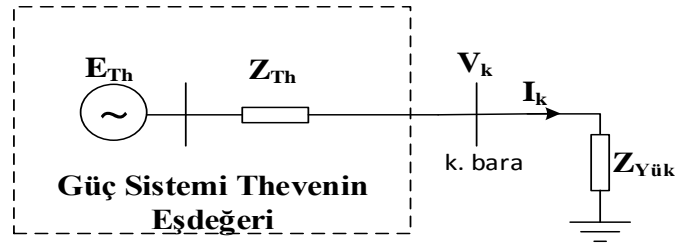
Şekil 2.6. 2 Baraya İndirgenmiş Güç Sistemi

Elde edilen 2 baralı sistemde kararlılık analizi yapılacak baranın gücü adım adım artırılarak, ilgili baraya ait kritik güç, kritik gerilim ve kritik açı değerleri güç akışı değerlerinde yakınsama olmayana kadar devam ettirilerek hesaplanır [72].

### 2.2.6. Thevenin eşdeğer devre yaklaşımı

Güç sistemleri kararlılık çalışmalarında güç akışı temelli yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç akışı temelli yaklaşımlar güç sistemleri büyüdükçe hesaplanması gereken parametre sayısı arttığı için hesap zorlukları artmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için alternatif analiz yöntemi olarak, güç sistemlerinin eşdeğer devre modelini kullanan Thevenin Eşdeğer devre yaklaşımları hesap kolaylığı ve daha az veri ile analiz yapılabildiği için tercih edilir hale gelmiştir.

Thevenin eşdeğer devre modeli temelli yaklaşımlar, güç sisteminde kararlılık analizi yapılacak baradan görülen Thevenin eşdeğerinin ilgili baradan yapılacak ölçümler ile kestirilmesi [73]–[79] ve bu eşdeğer devre modeli kullanılarak kararlılık analizi yapılması temeline dayanır [80]–[84].



Şekil 2.7. İlgili Bara Thevenin Eşdeğer Devre Modeli

Şekil 2.7.'de güç sisteminde ilgili bara arkasında kalan Thevenin Eşdeğer devre modeli verilmiştir. Kararlılık analizi yapılacak ilgili baradan yapılacak ölçümler ile eşdeğer devre elde edilerek, ilgili baraya ait kritik değerlerin hesaplanması yapılabilmektedir.

## **BÖLÜM 3. SÖZDE THEVENİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ KULLANILARAK GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ**

### **3.1. Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametrelerinin Elde Edilmesi**

Güç sistemleri büyüdükçe değerlendirilmesi zorlaşmaktadır. Güç akışı yaklaşımlarıyla sistemde gerilim kararlılığı açısından incelenecek olan barada, güç kademeli olarak arttırılarak her adımda gerilim değeri hesaplanmakta ve gerilim kararlılığına dair değerlendirmeler yapılabilmektedir. Güç akışı temelli yaklaşımlarda sisteme ait bütün verilerin (hatlar, trafolar, generatörler, yükler) bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca güç sistemi büyüdükçe güç akışında denklem sayısı artar ve güç akışı hesapları zaman alıcı hale gelir. Gerilim kararlılığı analizi çalışmalarında güç akışı temel çözüm yaklaşımı olup, güç sistemi büyümelerinde zaman alıcı olması nedeniyle daha hızlı çözüm mekanizmalarına ihtiyaç duyulmuştur [85].

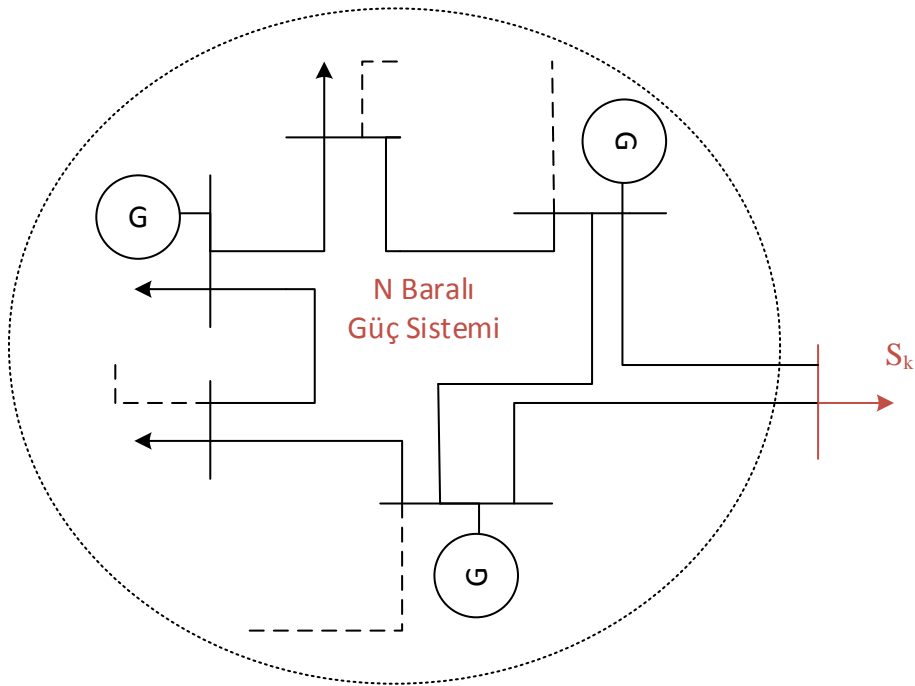
Güç sistemindeki herhangi bir barada gerilim kararlılığı değerlendirmesinin esası, ilgili baraya ait Thevenin Eşdeğer devresinin elde edilerek ilgili baradan çekilebilecek maksimum gücün dolayısı ile kritik güç ve gerilim değerlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır [16], [84], [86].

Thevenin eşdeğer devre parametreleri kullanılarak yapılan kararlılık analizlerinde, analizi yapılacak baradan görülen eşdeğer devreye ait Thevenin empedansı, ilgili bara arkasında kalan şönt elemanların hepsini temsil edememektedir. Bu sistemde oluşacak güç kayıplarının tamamı eşdeğer devre kullanılarak hesaplanamaması anlamına gelmektedir[87].

Bu tez çalışmasında kararlılık analizi yapılacak olan baradan görülen Thevenin Eşdeğer devresinin belirlenmesi için, deterministik yöntemlere alternatif olarak, ilgili

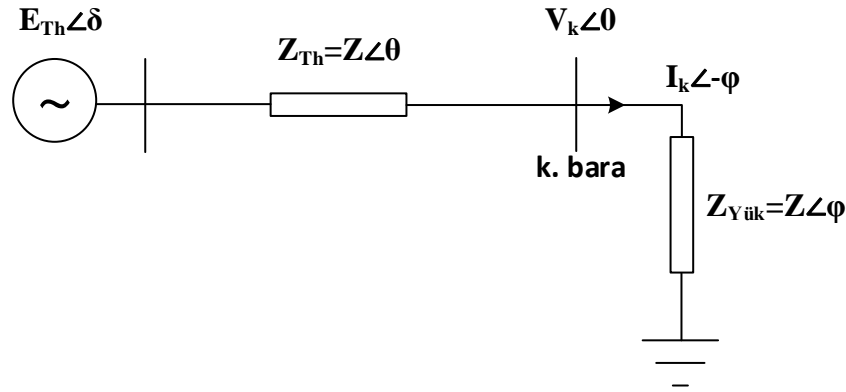
baradan görülen eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmiş ve elde edilen nonlinear denklemler, nonlinear optimizasyon teknikleri kullanılarak çözülmüştür.

Güç sisteminde gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılacak barayı ve geri kalan tüm sistemi ayrı ayrı modellenecek olursa, sistemde analizi yapılacak olan bara ve diğer sistem elemanlarından oluşan bir model elde edilir. Şekil 3.1.'de güç sisteminde analizi yapılacak bara ve diğer güç sistemi elemanları iki ayrı eleman olarak gösterilerek bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan güç sistem modelinde analizi yapılacak olan bara dışında kalan güç sistemi elemanları için Thevenin eşdeğer devresi kullanılarak kararlılık analizi yapılacaktır [82].



Şekil 3.1. N Baralı Güç Sistemi Modeli [52]

Analizi yapılacak olan baradan güç sistemine bakıldığında Thevenin Eşdeğer devresi, bir kaynak (Thevenin Gerilimi,  $E_{Th}$ ) ve kaynaktan sonra analiz yapılacak baraya kadar seri bağlı bir empedanstan (Thevenin Empedansı,  $Z_{Th}$ ) meydana gelmektedir. Aşağıda verilen Şekil 3.2.'de N baralı güç sisteminde kararlılık analizi yapılacak olan bara ve tek kapılı devre olarak modellenen Thevenin Eşdeğer devresi verilmiştir.



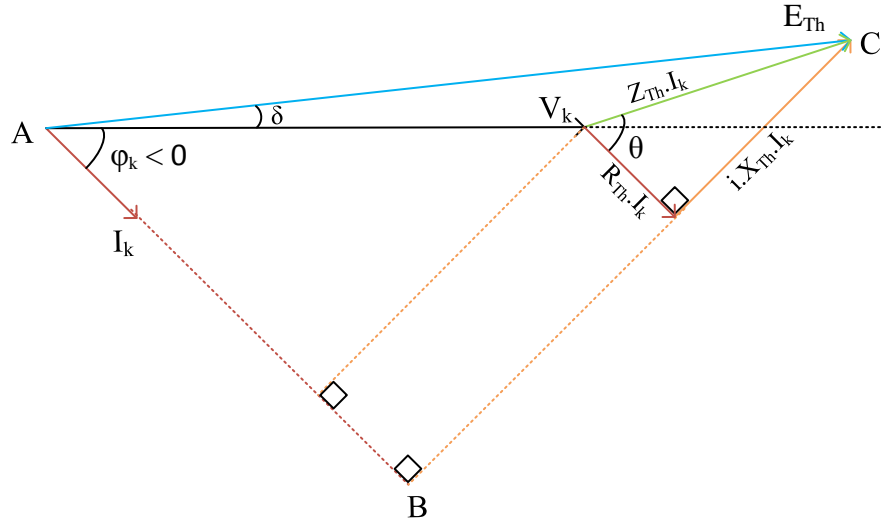
Şekil 3.2. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğer Devresi

Şekil 3.2.'de verilen Thevenin Eşdeğer devresinde, güç sisteminde gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılacak bara k. baradır ve k. baradan çekilebilecek maksimum güç, maksimum güç transferi teoremi yardımıyla hesaplanarak, k. baraya ait kritik nokta hesaplanabilir. Maksimum güç transferi hesabı yapılabilmesi için k. baraya ait Thevenin gerilimi ve empedansının bilinmesi gerekmektedir [12].

Şekil 3.2.'de verilen eşdeğer devrede sadece kararlılık değerlendirmesi yapılacak bara olan k. baraya ait akım, gerilim ve güç faktörü değerleri bilinmekte olup, baraya ait Thevenin gerilimi ve empedansı bilinmemektedir ve bu değerlerin kestirim yöntemi ile bulunması amaçlanmaktadır. Şekil 3.2.'de verilen devreye ait Kirchoff çevre denklemi yazılırsa;

$$\dot{E}_{Th} = \dot{V}_k + \dot{I}_k \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) elde edilir. Elde edilen denklemde  $\dot{E}_{Th}$ ,  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  bilinmeyen parametreler olup,  $\dot{I}_k$  ve  $\dot{V}_k$  bilinen parametrelerdir. Denklem (3.1) N baralı bir güç sisteminin Thevenin eşdeğer devresini temsil etmekte olup, bu devreye ait fazör diyagram Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Şekil 3.2.'deki Eşdeğer Devrenin Fazör Diyagramı

Şekil 3.3.'deki Thevenin eşdeğer devresinin fazör diyagramından  $E_{Th}$  değeri için ABC üçgeninin AC kenarı için Pisagor bağıntısı yazılırsa;

$$E_{Th}^2 = I_k^2 \cdot X^2 - 2 \cdot I_k \cdot V_k \cdot \sin(\varphi_k) \cdot X + I_k^2 \cdot R^2 + 2 \cdot \cos(\varphi_k) \cdot I_k \cdot V_k \cdot R + V_k^2 \quad (3.2)$$

ABC üçgeninde AC kenarı olan  $E_{Th}$  (Thevenin gerilimi) için Denklem (3.2) bağıntısı elde edilir. Elde edilen Denklem (3.2)'de, fazör diyagramından da anlaşılacağı üzere; sistem tarafında  $R_{Th}$ ,  $X_{Th}$  ve  $E_{Th}$  bilinmeyen parametrelerdir. Denklemde üç bilinmeyen bulunmaktadır. Denklem bu haliyle çözülmesi cebirsel olarak mümkün değildir. Cebirsel olarak bilinmeyenlerin bulunabilmesi için üç adet denkleme ihtiyaç vardır. Üç adet denklemi elde etmek için ilgili baradan ardışıl üç ölçüm yapılarak bir denklem sistemi oluşturulur.

$$E_{Th1} = \sqrt{I_{k1}^2 \cdot X^2 - 2 \cdot I_{k1} \cdot V_{k1} \cdot \sin(\varphi_{k1}) \cdot X + I_{k1}^2 \cdot R^2 + 2 \cdot \cos(\varphi_{k1}) \cdot I_{k1} \cdot V_{k1} \cdot R + V_{k1}^2} \quad (3.3)$$

$$E_{Th2} = \sqrt{I_{k2}^2 \cdot X^2 - 2 \cdot I_{k2} \cdot V_{k2} \cdot \sin(\varphi_{k2}) \cdot X + I_{k2}^2 \cdot R^2 + 2 \cdot \cos(\varphi_{k2}) \cdot I_{k2} \cdot V_{k2} \cdot R + V_{k2}^2} \quad (3.4)$$

$$E_{Th3} = \sqrt{I_{k3}^2 \cdot X^2 - 2 \cdot I_{k3} \cdot V_{k3} \cdot \sin(\varphi_{k3}) \cdot X + I_{k3}^2 \cdot R^2 + 2 \cdot \cos(\varphi_{k3}) \cdot I_{k3} \cdot V_{k3} \cdot R + V_{k3}^2} \quad (3.5)$$

Gerilim kararlılığı analizi yapılacak olan baradan yapılan üç ardışıl ölçüm ile Denklem (3.3), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) elde edilir. Elde edilen yeni denklem sisteminde  $E_{Th1}$ ,  $E_{Th2}$ ,  $E_{Th3}$ ,  $R_{Th}$ ,  $X_{Th}$  olmak üzere beş bilinmeyen parametre bulunmaktadır. Yapılan ardışıl ölçümlerde sistemde sadece  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  yani Thevenin empedansı sabit kalmaktadır[88,89,90] ve her yeni ölçümden denklem sistemine bilinmeyen olarak Thevenin gerilimi ( $E_{Th}$ ) eklenmektedir [91].

Güç sisteminde yapılan ardışıl ölçümlerde Thevenin gerilimindeki değişim çok ufak olmasına rağmen, ölçümlerden elde edilen denklem sistemi lineer olmadığı için denklem sistemindeki  $E_{Th}$  değişimi bilinmeden, denklem sisteminin çözülmesi mümkün değildir. Şayet  $E_{Th1}$ ,  $E_{Th2}$ ,  $E_{Th3}$  arasındaki değişim oranı veya artış miktarı ölçüm yapılan bara parametreleri ile bilinebilirse, sisteme ait Thevenin empedansı hatasız bulunabilmekte ve gerilim kararlılığı değerlendirmesi gerçek Thevenin Eşdeğer devresi ile yapılabilmektedir. Fakat Thevenin gerilimindeki değişimlerin, analizi yapılacak olan baradan yapılan ölçümlerle kestirilmesi mümkün değildir. İlgili baradan yapılan ölçümlerle elde edilen denklemler nonlineer olup çok sayıda kökü vardır. Nonlineer denklem takımının gerçek köklerinin bulunabilmesi için;

1. Denklemler birbirine eşit olmalı
2. Denklemler sifıra eşit olmalı

şartlarından birini sağlaması gerekmektedir. Bu şartlardan biri sağlandığında nonlineer denklem takımının kökleri doğru olarak hesaplanabilmektedir. Yapılan ardışıl ölçümlerde her iki şartta sağlanmamaktadır. Bu durumda elde edilen denklem sisteminin çözülebilmesi için,  $E_{Th1}=E_{Th2}=E_{Th3}$  kabulü yapılarak;

$$E_{Th1} - E_{Th2} = 0 \quad (3.6)$$

$$E_{Th2} - E_{Th3} = 0 \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) eşitlikleri elde edilir ve bu eşitliklerin sonucu sıfır olacaktır ve üç ardışıl ölçüm ile elde edilen denklem sayısı ikiye düşürülerek iki



bilinmeyenli iki denklem haline gelecektir. Elde edilen iki denklem nonlineer optimizasyon çözüm yöntemi kullanılarak çözülür ve denklem sistemindeki bilinmeyenler,  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  hesaplanabilir. Hesaplanan  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  değerleri ile  $\dot{E}_{Th}$  hesaplanır ve ilgili baradan çekilebilecek maksimum güç, maksimum güç teoremi ile hesaplanarak analizi yapılacak olan baranın kritik gerilim ve güç değerleri bulunabilmektedir. Hesaplanan  $R_{Th}$  ve  $X_{Th}$  arasındaki Thevenin empedansı açısının ( $\theta$ ) yanlış bulunduğu ve özellikle analizi yapılacak baranın gücü arttıkça, açının doğru değerden uzaklaştığı yapılan benzetim çalışmalarında görülmüştür.

Denklem sayısını azaltmak adına güç sistemlerindeki iletim hatları ve trafolardaki X/R oranının belirli bir aralıkta kabulünün yapılması trafo ve hatların karakteristik yapıları gereği mümkündür.

İletim hatlarında X/R oranının gerilim seviyesine göre değiştiği bilinen bir gerçektir. Tablo 3.1.'de iletim hatlarındaki X/R oranı gerilim seviyesine bağlı olarak verilmiştir [49].

Tablo 3.1. İletim Hatları Gerilim Seviyesine Göre X/R oranları

Gerilim (kV)	X/R	$\tan^{-1}(X/R)$
115	4.6	77.73
138	5.7	80.04
161	6.0	80.53
230	10	84.28

Güç sistemlerindeki trafolarda gerilim seviyesine bağlı olarak X/R oranları aşağıda Tablo 3.2.'de verilmiştir [49].

Tablo 3.2. Transformatör Gerilim Seviyesine Göre X/R oranları

Gerilim (kV)	X/R	$\tan^{-1}(X/R)$
115	53	88.91
138	83	89.3
161	100	89.42
230	203	89.7

Güç sistemlerinde iletim hatları ve transformatörler ayrı ayrı düşünülürse; iletim hatlarında X/R oranının 115 kV'da 4.6 dan başladığı ve bunun da 77.73°'ye tekabül

ettiği, sistemdeki transformatörlerin X/R oranlarının 115 kV'da 53° den başladığı, bunun da 88.91° tekabül ettiği ve gerilim seviyesi yükseldikçe bu oranın arttığı görülmektedir. Türkiye 154 kV enterkonnekte sisteminde iletim hatları için bu değer 77°, 380 kV iletim hatları için bu değerinin 84° olduğu yapılan hesaplamalarda görülmüştür [92].

Bu tez çalışmasında Thevenin empedansı açısının,  $\theta = \tan^{-1} \frac{X_{Th}}{R_{Th}}$  değeri yukarıda verilen bilgilere dayanarak 80° kabul edilmiştir [49,92].

Güç sisteminde analizi yapılacak olan baradan yapılan ardışıl ölçümlerle elde edilen denklem sistemi (Denklem (3.3), Denklem (3.4), Denklem (3.5)) aşağıdaki kabuller ile;

$$\begin{aligned} 1- E_{Th1} &= E_{Th2} = E_{Th3} \\ 2- \theta &= \tan^{-1} \frac{X_{Th}}{R_{Th}} = 80^\circ \end{aligned}$$

Denklem (3.8) ve Denklem (3.9)'da verildiği gibi olacaktır ve denklem sisteminde  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  olmak üzere 2 bilinmeyen olacaktır. Ardışıl üç ölçüm yerine, ardışıl iki ölçüm ile kestirim yapılacaktır.

$$E_{Th1} = \sqrt{(V_1 \cdot \cos\varphi_1 + I_1 \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_1 \cdot \sin\varphi_1 + I_1 \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2} \quad (3.8)$$

$$E_{Th2} = \sqrt{(V_2 \cdot \cos\varphi_2 + I_2 \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_2 \cdot \sin\varphi_2 + I_2 \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2} \quad (3.9)$$

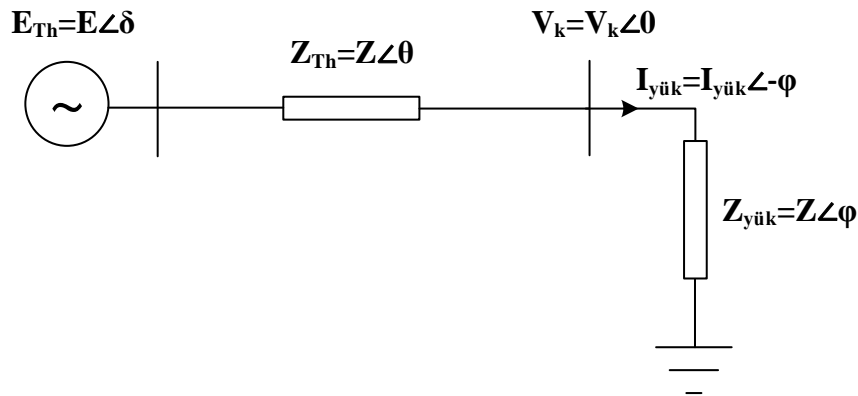
Böylece Elde edilen denklem sistemi, bir optimizasyon problemi olarak çözülebilecektir. Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu;

$$\min(\Delta E) = (E_{Th1} - E_{Th2})^2 \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da verilen eşitlik olacağından, nonlinear denklem sistemi, nonlinear optimizasyon çözüm yöntemlerinden olan Levenberg-Marquet yöntemi [93–95] ile çözülerek güç sistemine ait  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  hesaplanır. Thevenin empedansı açısının ( $\theta_{Th}$ ) değeri  $Z_{Th}$ 'ın genliğine etki etmektedir. Fakat optimizasyon ile farklı ( $\theta_{Th}$ ) değerleri kestirilen  $Z_{Th}$  değerine karşılık gelen  $E_{Th}$  ve  $\delta_{Th}$  değerleri gerilim kararlılığı değerlendirmesi için yeterli olmaktadır. Gerilim kararlılık değerlendirmesi için yeterli olan Thevenin eşdeğer parametre setine Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri (STEDP) denilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile baraya ait kritik gerilim değeri hesaplanır ve kararlılık değerlendirmesinde kullanılır. Elde edilen  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  değerleri, yapılan iki kabulden dolayı güç sisteminin gerçek  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  değerleri değildir fakat sistemi ölçüm alınan andaki yük şartlarında gerilim kararlılığı açısından tutarlı bir şekilde temsil eden en iyi değerlerdir. Bu nedenle elde edilen değerlerin bir gerilim kararlılığı indeksinde değerlendirilmesi güç sistemi kritik değerlerini daha doğru yansıtacaktır [2].

### 3.2. Kritik Gerilim İfadesinin Elde Edilmesi

Şekil 3.4.'te verilen güç sistemi kritik andaki Thevenin Eşdeğer devresi yardımıyla, kritik anda hat empedansı ve yük empedansının genlikleri aynı kalmak üzere farklı güç faktörleri için gerilim kararlılığına ilişkin kritik gerilim değeri aşağıda verildiği gibi bulunur.



Şekil 3.4. Kritik Andaki Thevenin Eşdeğer Devresi

$$\dot{I}_{yük} = \frac{\dot{E}_{Th}}{\dot{Z}_{Th} + \dot{Z}_{yük}} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11.'de yük akımına ait ifade verilmiştir. Hat sonu gerilimi, yük akımı ifadesi ile elde edilir.

$$\dot{V}_{kritik} = \dot{I}_{yük} \cdot \dot{Z}_{yük} = \left( \frac{\dot{E}_{Th}}{\dot{Z}_{Th} + \dot{Z}_{yük}} \right) \cdot \dot{Z}_{yük} = \left( \frac{E_{T\Box} \angle \delta}{Z_{T\Box} \angle \theta + Z_{yük} \angle \varphi} \right) \cdot Z_{yük} \angle \varphi \quad (3.12)$$

Denklem 3.12. ifadesi kompleks çarpma işlemleri yapıldıktan sonra daha açık olarak ifade edilirse;

$$\dot{V}_{kritik} = \frac{E_{T\Box} \cdot (\cos(\delta_{kritik}) + j \cdot \sin(\delta_{kritik}))}{Z \cdot (\cos(\theta) + j \cdot \sin(\theta)) + Z \cdot (\cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi))} \cdot Z \cdot (\cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)) \quad (3.13)$$

$$\dot{V}_{kritik} = \frac{E_{T\Box} [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_{kritik}) - \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_{kritik}) + j \cdot (\cos(\varphi) \cdot \sin(\delta_{kritik}) + \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta_{kritik}))]}{\cos(\varphi) + \cos(\theta) + j \cdot (\sin(\varphi) + \sin(\theta))} \quad (3.14)$$

Denklem 3.14 ifadesinde özdeşlikler yerine yazılır.

$$\dot{V}_{kritik} = \frac{E_{T\Box} \cdot \cos(\varphi + \delta_{kritik}) + j \cdot E_{T\Box} \cdot \sin(\varphi + \delta_{kritik})}{\cos(\varphi) + \cos(\theta) + j \cdot (\sin(\varphi) + \sin(\theta))} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15. ifadesi elde edilir. Elde edilen ifadenin payı ve paydası, paydanın kompleks eşleşimini ile çarpılır.

$$\dot{V}_{kritik} = \frac{(E_{T\Box} \cdot \cos(\varphi + \delta_{kritik}) + j \cdot E_{T\Box} \cdot \sin(\varphi + \delta_{kritik})) \cdot (\cos(\varphi) + \cos(\theta) + j \cdot (\sin(\varphi) + \sin(\theta)))}{(\cos(\varphi) + \cos(\theta))^2 + (\sin(\varphi) + \sin(\theta))^2} \quad (3.16)$$

$$V \angle 0 = \frac{E_{T\Box} \cdot (\cos(\varphi - \theta + \delta_{kritik}) + \cos(\delta_{kritik})) + E_{T\Box} \cdot (\sin(\varphi - \theta + \delta_{kritik}) + \sin(\delta_{kritik}))}{2 \cdot \cos(\varphi - \theta) + 2} \quad (3.17)$$

Elde edilen Denklem 3.17 gerçekte ve sanal kısımlarına ayrılıp, eşitlikte sanal kısımlar birbirine, reel kısımlar birbirine eşitlenir.

$$\text{İm}(\dot{V}_{kritik}) = \frac{E_{T\Box} \cdot (\sin(\varphi - \theta + \delta_{kritik}) + \sin(\delta_{kritik}))}{2 \cdot \cos(\varphi - \theta) + 2} = 0 \quad (3.18)$$

$$\sin(\varphi - \theta + \delta_{kritik} + \delta_{kritik}) = 0 \quad (3.19)$$

Denklem 3.19.'dan  $\delta_{kritik}$  çekilirse;

$$\delta_{kritik} = \frac{\varphi - \theta}{2} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20) ifadesi elde edilir ve  $\delta_{kritik}$  bulunur. Bulunan  $\delta_{kritik}$  ifadesi Denklem (3.17)'nin reel kısmında yerine yazılır.

$$V_{kritik} = Re(\dot{V}_{kritik}) = \frac{E_{T\Box} \cdot (\cos(\varphi - \theta + \delta_{kritik}) + \cos(\delta_{kritik}))}{2 \cdot \cos(\varphi - \theta) + 2} \quad (3.21)$$

$$V_{kritik} = Re(\dot{V}_{kritik}) = \frac{E_{T\Box} \cdot (\cos(\delta_{kritik} - 2 \cdot \delta_{kritik}) + \cos(\delta_{kritik}))}{2 \cdot \cos(-2 \cdot \delta_{kritik}) + 2} = \frac{2 \cdot E_{T\Box} \cdot \cos(\delta_{kritik})}{2 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{kritik}) + 2} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22.'de, Denklem 3.23.'te verilen özdeşlik yerine yazılırsa;

$$\cos(2 \cdot \delta_{kritik}) + 1 = 2 \cdot \cos(\delta_{kritik})^2 \quad (3.23)$$

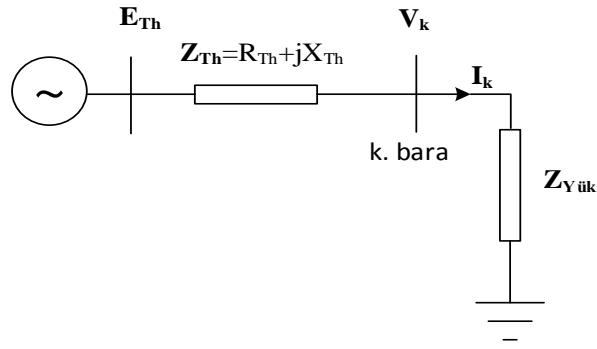
$$V_{kritik} = \frac{2 \cdot E_{T\Box} \cdot \cos(\delta_{kritik})}{2 \cdot (\cos(2 \cdot \delta_{kritik}) + 1)} = \frac{2 \cdot E_{T\Box} \cdot \cos(\delta_{kritik})}{2 \cdot (\cos(\delta_{kritik})^2 + 1)} \quad (3.24)$$

$$V_{kritik} = \frac{E_{T\Box}}{2 \cdot \cos(\delta_{kritik})} \quad (3.25)$$

Denklem (3.25) ifadesi elde edilir ve elde edilen ifade kritik gerilim ifadesidir.

### 3.3. Maksimum Güç Transferi ve Kritik Gerilim

Güç sisteminde gerilim kararlılığı analizi yapılacak barada kararlılık sınırlarının değerlendirilebilmesi için, baradan çekilebilecek maksimum gücün bilinmesi gerekir.



Şekil 3.5. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğer Devresi

Şekil 3.5.'de verilen eşdeğer devrede;

$$\dot{E}_{Th} = E_{Th} \angle \delta, \quad \dot{V} = V \angle 0, \quad \dot{Z}_{Th} = Z \angle \theta, \quad \dot{I}_{Yük} = I \angle \varphi \quad (3.26)$$

olmak üzere denklemleri yazılırsa;

$$\dot{E}_{Th} = \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_{Yük} + \dot{Z}_{Yük} \cdot \dot{I}_{Yük} \quad (3.27)$$

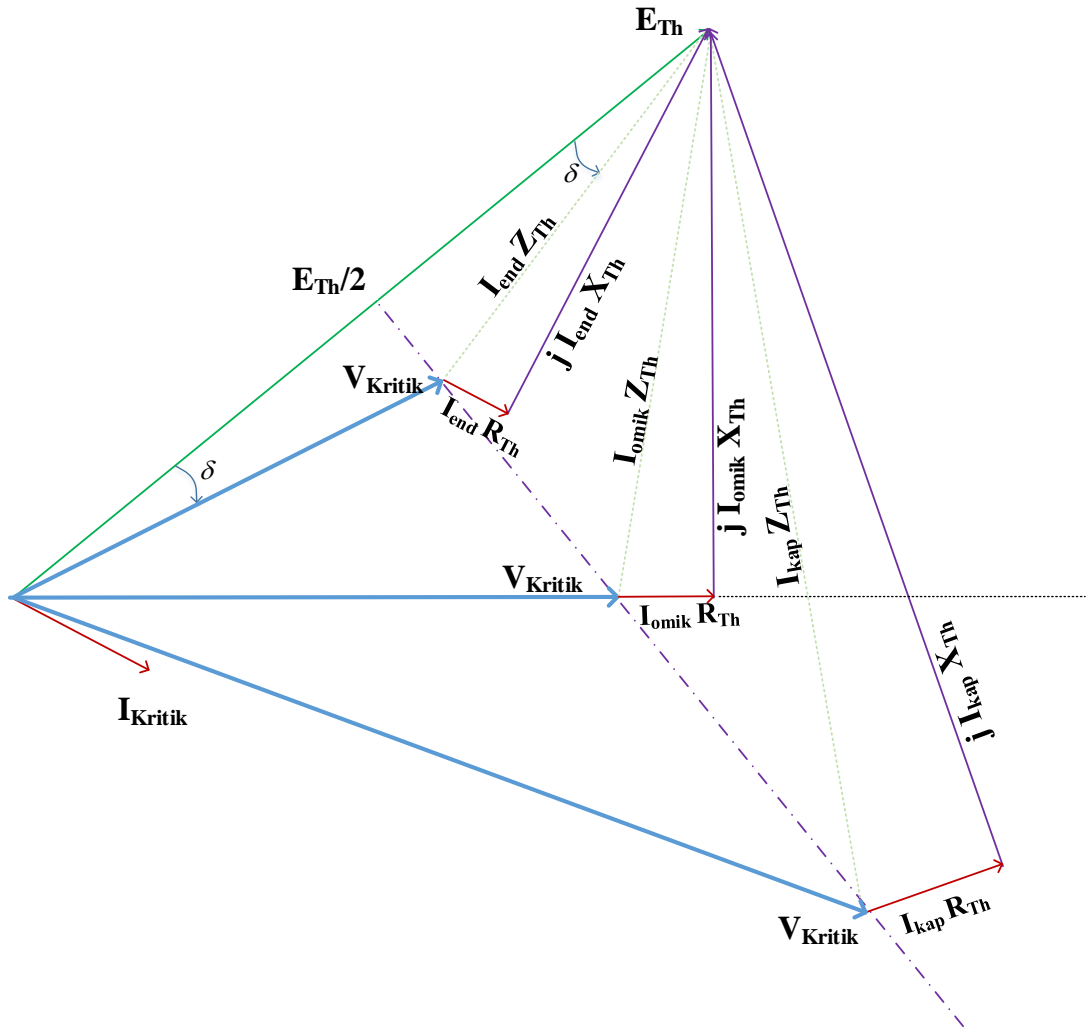
Denklem (3.27) elde edilir.  $|Z_{Th}| = |Z_{Yük}|$  olduğu esnada analizi yapılacak olan baradan maksimum güç çekilecektir

$$|Z_{Yük}| \cdot I_{Yük} = |Z_{Th}| \cdot I_{kritik} \quad (3.28)$$

yani maksimum güç çekildiği esnada sistem kritik duruma geldiğinden yük akımı kritik akıma eşit olacaktır;

$$I_{Yük} = I_{kritik} \quad (3.29)$$

Analizi yapılacak olan baradan kritik akım çekilirken, bara gerilimi de kritik gerilim olacaktır. Güç sisteminde analizi yapılacak olan bara için maksimum güç transferine ait fazör diyagramı Şekil 3.6.'da verildiği gibidir.



Şekil 3.6. Maksimum Güç Fazör Diyagramı [15]

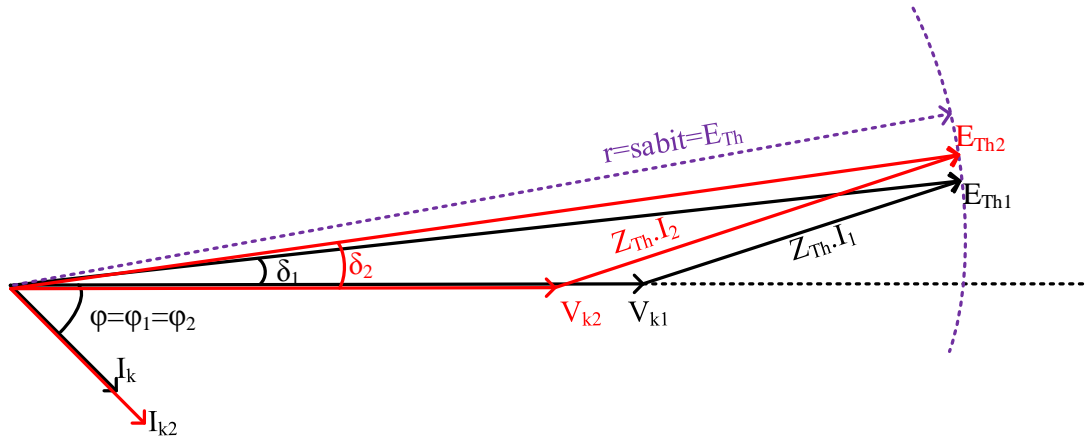
Şekil 3.6.'da verilen maksimum güç transferi fazör diyagramından gerilim kararlılığı analizi yapılacak olan bara için kritik gerilim değerinin, hat empedansı ile hat akımının çarpımına eşit olduğu görülmektedir. Güç sisteminde analizi yapılacak olan baradan çekilen akımın karakteri ohmik, endüktif veya kapasitif olması durumlarında da maksimum güç transferi esnasında kritik gerilim değerinin iz düşümünün Thevenin geriliminin yarısına eşit olduğu görülmektedir. Şekil 3.6.'da verilen fazör diyagramından kritik gerilim formüle edilirse;

$$V_{Kritik} = \frac{E_{Th}}{2 \cdot \cos \delta} \quad (3.30)$$

kritik gerilim ifadesi Denklem (3.30) da verildiği gibi olacaktır [7].

### 3.4. Kritik Gerilim ve Gerilim Kararlılık İndeksi (VSM<sub>v</sub>)

Şekil 3.7.'te güç sisteminde analizi yapılacak ilgili baradan (k. bara) ardışıl olarak alınan iki ölçüme ait fazör diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.7. Güç Sistemi Thevenin Eşdeğeri ve Fazör Diyagramı

$$E_{Th1} = \sqrt{(V_1 \cdot \cos\varphi_1 + I_1 \cdot R_{Th})^2 + (V_1 \cdot \sin\varphi_1 + I_1 \cdot X_{Th})^2} \quad (\text{Birinci Ölçüm}) \quad (3.31)$$

$$E_{Th2} = \sqrt{(V_2 \cdot \cos\varphi_2 + I_2 \cdot R_{Th})^2 + (V_2 \cdot \sin\varphi_2 + I_2 \cdot X_{Th})^2} \quad (\text{İkinci Ölçüm}) \quad (3.32)$$

Denklem (3.31) ve Denklem (3.32) elde edilir. Elde edilen denklemlerde her iki ölçümden gelen Thevenin gerilimi  $E_{Th}$  değerleri ve Thevenin empedansı açısı  $\theta$  (teta);

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (3.33)$$

$80^\circ$  olarak kabul edilerek, denklem takımı nonlineer optimizasyon çözüm yöntemi olan Levenberg-Marquet ile çözülerek sisteme ait Thevenin gerilimi ve Thevenin empedansı hesaplanır. Hesaplanan bu değerler ile analizi yapılacak olan baraya ait kritik gerilim değeri Denklem (3.25) ile hesaplanır.

Güç sistemi üzerindeki bir barada kararsızlık olması için bara geriliminin, o baraya ait kritik gerilim değerine eşit veya daha küçük olması gerekir. Bara gerilim değeri ve



hesaplanan kritik gerilim değeri, Denklem (3.34)'da verilen gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) [18] ile değerlendirilir;

$$VSM_V = \frac{V_{ölçülen} - V_{kritik}}{V_{kritik}} \quad (3.34)$$

Baranın kararlılık durumu hakkında bilgi edinilir. Gerilim kararlılık indisi bir ile sıfır arasında değişerek baranın kararlılık durumu hakkında bilgi verir. İndis sıfıra yaklaştıkça güç sisteminin kritik noktaya yaklaştığı anlaşılmakta olup, indis sıfır olduğu zaman sistemde kritik sınır değerlerine ulaşılmış olur ve güç sisteminde herhangi bir güç akışı olmaz.

Bu çalışmada  $VSM_V$  indeksindeki ( $V_{kritik}$ ) kritik gerilim değeri sistemde analizi yapılacak baradan yapılan ardışıl iki ölçümden gelen değerler ile hesaplan  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  kullanılarak hesaplanan  $V_{(Kritik)}$ ,  $VSM_V$  indeksinde yerine koyularak sistemin kritik noktaya yaklaşp, yaklaşmadığına dair daha doğru bilgi edinilmesi amaçlanmıştır.

### 3.5. Kritik Gerilimin Analitik Çözüm Yöntemleri ile Elde Edilmesi

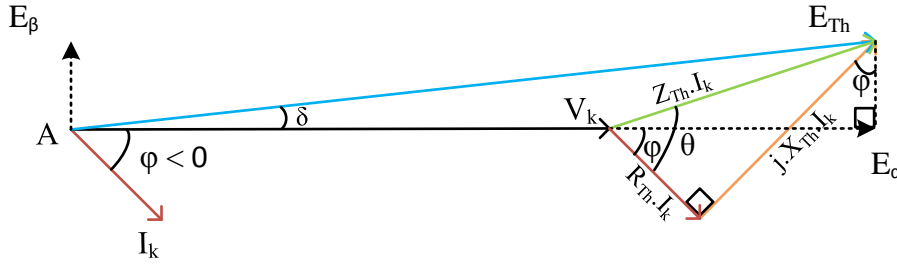
Bu tez çalışmasında önerilen yöntem, kritik gerilim değerini analitik olarak hesaplayan iki farklı yöntemle karşılaştırılmış ve sonuçları verilmiştir.

#### 3.5.1. Yöntem 1

Önerilen yöntemle karşılaştırması yapılan Yöntem 1'de [14] güç sisteminde analizi yapılacak baradan görülen Thevenin eşdeğer devresi modeli kullanılarak, güç sisteminin ilgili barasından yapılan ardışıl iki ölçüm arasında Thevenin gerilimin  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenlerindeki iz düşümlerinin sabit kaldığı, bara gerilimi ile Thevenin gerilimi arasındaki  $\delta$  açısının ve Thevenin empedasının sabit kaldığı kabulleri yapılmıştır. Ardışıl iki ölçümden elde edilen denklemler Şekil 3.7.'deki fazör diyagramı yardımıyla aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$E_{Th1}^2 = (V_1 \cdot \cos\phi_1 + I_1 \cdot R_{Th})^2 + (V_1 \cdot \sin\phi_1 + I_1 \cdot X_{Th})^2 \quad (3.35)$$

$$E_{Th2}^2 = (V_2 \cdot \cos\varphi_2 + I_2 \cdot R_{Th})^2 + (V_2 \cdot \sin\varphi_2 + I_2 \cdot X_{Th})^2 \quad (3.36)$$



Şekil 3.8. Thevenin Eşdeğeri Fazör Diyagramı Eksen Takımları

Denklem (3.35) ve Denklem (3.36) elde edilir. Bu denklem takımı  $E_{Th1}=E_{Th2}$  ve  $\theta=80$  derece kabulü ile matris formunda yazılarak, Şekil 3.8.'deki fazör diyagramında verilen  $E_{Th}$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenlerine ayrılarak lineerleştirilir. Eksenlerine ayrılan denklem takımı matris formunda yazılırsa [36];

$$\begin{bmatrix} -I_1 \cdot \cos\varphi_1 & I_1 \cdot \sin\varphi_1 & 1 & 0 \\ -I_2 \cdot \cos\varphi_2 & I_2 \cdot \sin\varphi_2 & 1 & 0 \\ I_1 \cdot \sin\varphi_1 & I_1 \cdot \cos\varphi_1 & 0 & 1 \\ I_2 \cdot \sin\varphi_2 & I_2 \cdot \cos\varphi_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Denklem (3.37) elde edilir. Denklem (3.37)'te bilinmeyen değerler  $A \cdot x = b$  eşitliği ters matris çözüm yöntemi kullanılarak  $A^{-1} \cdot A \cdot x = A^{-1} \cdot b$  formunda yazılır ve buradan  $x = A^{-1} \cdot b$  olur ve  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  hesaplanır. Buradan elde edilen çözüm lineer olmaktadır. Matris çözümünden elde edilen  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  değeri ile hesaplanan kritik gerilim ve bara gerilimi ile hesaplanan  $VSM_V$  indeksi sisteme ait çökme noktasına yakınlığı fakat tam doğru sonucu vermediği yapılan benzetim çalışmalarında da görülmüştür.

### 3.5.2. Yöntem 2

Önerilen yöntem ile karşılaştırılan diğer analitik çözüm yaklaşımı olan Yöntem 2'de ise Denklem (3.37)'ün matris çözümünden hesaplanan  $E_{Th}$  değeri hesaplanır. Güç sistemine ait Thevenin empedansı ise Şekil 3.3.'te verilen fazör diyagramından elde edilen Denklem (3.38)'de verilen polinomdan hesaplanır.

$$I_1^2 \cdot Z_{Th}^2 + 2 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\theta - \varphi_1) \cdot Z_{Th} + (V_1^2 - E_{Th}^2) = 0 \quad (3.38)$$

Elde edilen polinomun pozitif kökü sistemin Thevenin empedansını temsil etmek üzere çözüm yapılır. Elde edilen  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  değerleri ile edilen kritik gerilimler  $VSM_V$  indeksinde değerlendirilerek kararlılık analizi yapılabilmektedir [15] fakat kritik değerlerin sistemin gerçek kritik değerlerini tam doğru temsil etmediği yapılan benzetim çalışmalarında görülmüştür.

Tablo 3.3.'de önerilen yöntem ve karşılaştırma yapılan diğer iki analitik yöntemin özet tablosu verilmiştir.

Tablo 3.3. Önerilen ve Karşılaştırılan Yöntemler

	<b>Hesaplanan Parametreler</b>	<b>Metod</b>
Önerilen Yöntem	$E_{Th}, Z_{Th}$	Nonlinear Optimizasyon
Yöntem 1 [14],[26]	$E_{Th}, Z_{Th}$	Matris, Deterministik
Yöntem 2 [15]	$E_{Th}, Z_{Th}$	Deterministik, Matris + Polinom

Bu tez çalışmasında önerilen yöntem ile elde edilen  $VSM_V$  indeksi, yukarıda bahsedilen iki farklı yöntem ile karşılaştırılmış ve elde edilen  $VSM_V$  indeksinin karşılaştırılan yöntemlerden elde edilen  $VSM_V$  indekslerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Güç sisteminde analizi yapılacak olan baradan yapılacak olan ölçümlerde süreklilik teşkil etmesi adına, yapılan her yeni ölçüm ve bir önceki ölçümden elde edilen veriler ile gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Böylece analizi yapılacak olan bara adım adım izlenmektedir. Yapılan ölçümlerde ardışıl ölçümlerden şayet aynı sonuçlar geldiyse, bu ilgili baradan örnekleme yapıldığı aralıkta güç değişmediği anlamına gelir ve ardışıl ölçümden aynı gelen veriler tasnif dışı tutulur.

Güç sisteminde analizi yapılacak olan baradan yapılan ölçümler ile hesaplanan kritik gerilim değeri ve ilgili baranın gerilim değerleri Denklem (3.32)'deki Gerilim Kararlılığı İndeksinde değerlendirildiklerinde, ölçülen gerilim ve kritik gerilim değeri

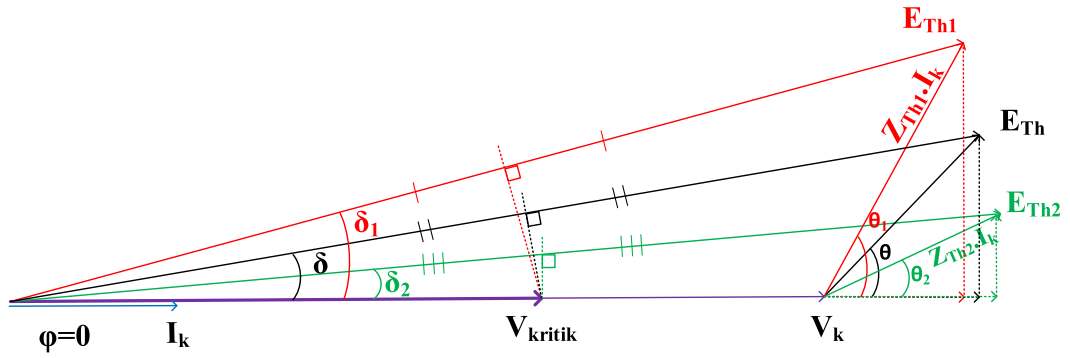
birbirine eşit olduğunda Gerilim Kararlılık İndeksi sıfır olacak ve sistem kritik sınır değerlere ulaşmış olacaktır.

### 3.6. Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri ve $\theta$ 'dan Bağımsız VSM<sub>v</sub>

Ardışıl iki ölçüm seti esaslı, kestirim yaklaşımında güç sistemine dair bir parametrenin önceden bilinmesi, örneğin  $\theta$  açısı, mükemmel kestirim ile sonuçlanmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi aslında güç sistemine ait en iyi bilinen parametre  $73^\circ < \theta < 87^\circ$  aralığındaki Thevenin empedans açısıdır [50]. Güç sisteminde, her bir  $\theta$  açısı için kestirilecek bir  $Z_{Th}$  değeri vardır.

Önerilen yöntemden kestirilen  $Z_{Th}$  değerleri Denklem (3.1)'de yerine koyularak çözüldüğünde güç sisteminin  $E_{Th}$  ve delta ( $\delta$ ) değerleri hesaplanır. Bu değerler sistemin gerçek değerleri değildir. Fakat güç sistemini optimal temsil eden eşdeğer devre parametreleri olduğundan, bu tez çalışmasında Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri (STEDP) olarak adlandırılmıştır.

Sistemde analizi yapılacak baradan ölçülen  $V_k$ ,  $I_k$  ve güç açısı ( $\varphi_k$ ) değerleri ile farklı teta ( $\theta_s$ ) açı değerleri kullanılarak, önerilen yaklaşım ile güç sistemini optimal olarak temsil eden 'Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametre' ( $Z_{Ths}$ ,  $E_{Ths}$ ,  $\delta_s$ ) setleri kestirilir. Şekil 3.9.'de farklı  $\theta_s$  değerlerine karşılık gelen STEDP setlerine ait fazör diyagramlar verilmiştir. Fazör diyagramında anlatım kolaylığı açısından yük açısı  $\varphi = 0$  kabul edilmiştir.



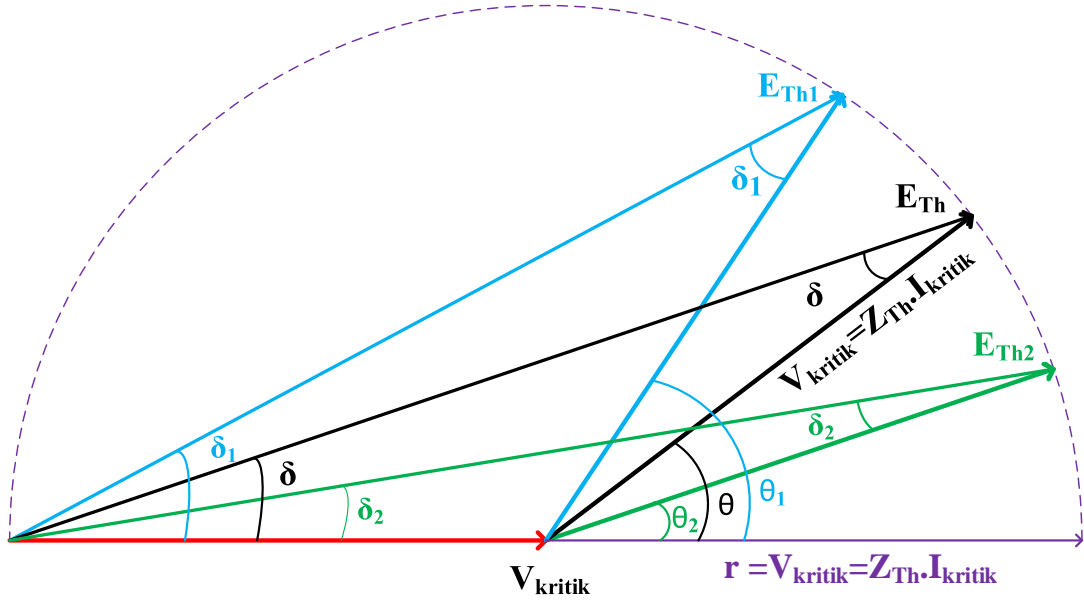
Şekil 3.9. Kabullere Dayalı Olarak, Normal İşletimde, Farklı  $\theta$  Açılı İçin Fazör Diyagram

Kısa gözlem aralığında alınmış ardışıl ölçümler ile farklı Thevenin empedans açısı ( $\theta$ ) değerleri için yapılan kestirimden elde edilen STEDP ile setleri aynı kritik gerilim değerini vermektedir. Dolayısı ile STEDP yaklaşımı gerilim kararlılığı açısından kritik gerilimi belirleme ve bir indeks değerlendirmesi için kullanılabilir.

Kritik durumda  $|\dot{Z}_L| = |\dot{Z}_{Th}|$  olacağından, Şekil 3.9.'un özel bir hali olan ve sadece kritik durumu gösteren sadeleşmiş fazörü elde edilir (Şekil 3.10.). Bu özel durumda  $Z_{Th}|_{V_k=V_{k,kritik}} = Z_{Th1} = Z_{Th2}$  olmaktadır. Şekil 3.10.'da yine farklı empedans açısı ( $\theta$ ) değerleri kullanılarak kestirimden elde edilen STEDP setleri ile;

$$\theta_s, Z_{Th} = Z_{Ths}, E_{Ths}, \delta_s \quad (3.39)$$

aynı kritik gerilimlerin bulunacağına açıkça görülmektedir.



Şekil 3.10. Kabullere Dayalı Olarak, Kritik Durumda, Farklı  $\theta$  Açılıarı İçin Fazör Diyagram

Yapılan grafik yorumlama ile, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı değerlendirmesi için, güç sisteminin k. barasından bakıldığında elde edilen Thevenin Eşdeğer Devresinin gerçek bir temsil yerine modeli doğrulayan bir Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametresi olmasının yeterli olduğu gösterilmiş olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir husus, k. baraya aktif güç akışı olabilmesi için keyfi olarak seçilebilen  $\theta_t$ 'nin  $\theta_t > |\varphi_k|$  olarak seçilmelidir. Yüksek gerilim şebekelerinde genellikle  $|\varphi| < 20^\circ$  olduğundan, yaklaşık olarak  $\theta_t = 80^\circ$  seçilmesi gerilim kararlılığı açısından sorunsuz bir çözüm sağlayacaktır. Bu durumda k. baradan güç sistemine bakıldığı duruma ait eşdeğer devre gerçek Thevenin eşdeğeri değil, kendi içinde tutarlı (Denklem (3.1)'deki modeli doğrulayan) bir Sözde Thevenin Eşdeğer Devresi olacaktır.

Sözde Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri yaklaşımı ile elde edilen parametreler ile Denklem (3.30);

$$V_{k,kritik} = \frac{E_{Th}}{2 \cdot \cos(\delta_s)} \quad (3.40)$$

Denklem (3.40) şeklinde yeniden yazılarak gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılır.

### 3.7. Optimizasyon ve Analitik Çözümlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde önerilen yöntem olan optimizasyon çözümü ve analitik yöntem arasındaki farklar anlatılıp, önerilen yöntemin klasik çözüm yöntemlerine göre üstünlükleri anlatılacaktır.

- Analitik çözüm (2 örnekleme) ile elde edilen sonuçlar, daha çok örnekleme yapıldığı takdirde daha doğru sonuçların elde edilebilmesi mümkündür. Fakat elde edilen denklem sisteminin çözümü için yapılacak kabullerden biri olan  $E_{Th}$  sabit kabulü (iki örnekleme arasında Thevenin gerilimi sabit kalır) çok örnekleme yapıldığında, birinci örnek ve son örnek arasındaki fark ihmal edilemeyecek kadar büyüyeceğinden dolayı çok sayıda örnekleme kullanıldığı analitik çözümler doğru kabul edilemez. Önerilen yöntemde kullanılan optimizasyon çözümünde çok örnekleme yapılmasına gerek olmaksızın 2 örnekleme ile yapılan çözümlerden elde edilen sonuçların analitik yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Güç sisteminde analizi yapılacak ilgili baradan yapılan ardışıl ölçümlerde, ölçüm hatası olması durumunda, analitik çözümde kullanılan matrisin tersinin alınması matematiksel olarak mümkün olamamaktadır. Böyle bir durumda analitik olarak çözüm yapılamamaktadır. Ardışıl ölçümlerden gelen verilerde ölçüm hatası olması durumunda bile optimizasyon yaklaşımı sistemin sözde değerlerini kestirdiği için elde edilen sonuçların analitik çözüm ile elde edilen sonuçlara göre daha doğru olduğu görülmüştür.
- Analitik çözüm yönteminde Thevenin geriliminin alfa ve beta eksenlerini üzerindeki iz düşümlerinin ( $E_\alpha$  ve  $E_\beta$ ) gözlem periyodunda sabit kaldığı kabulü  $\delta$  açısının sabit kalmasına bağlıdır. Oysaki Denklem (3.41) kullanıldığı optimizasyon çözümünde, her bir örneklemede  $\delta$  açısının sabit kalması kabulü söz konusu olmayıp,  $E_{Th}$ 'ın genliğinin sabit kalması kabulüne dayandığından elde edilen sonuçları analitik çözüme göre gerçek değerlere daha yakın çıkmaktadır.

$$E_{Th1}^2 = (V_1 \cdot \cos\varphi_1 + I_1 \cdot R)^2 + (V_1 \cdot \sin\varphi_1 + I_1 \cdot X)^2 \quad (3.41)$$

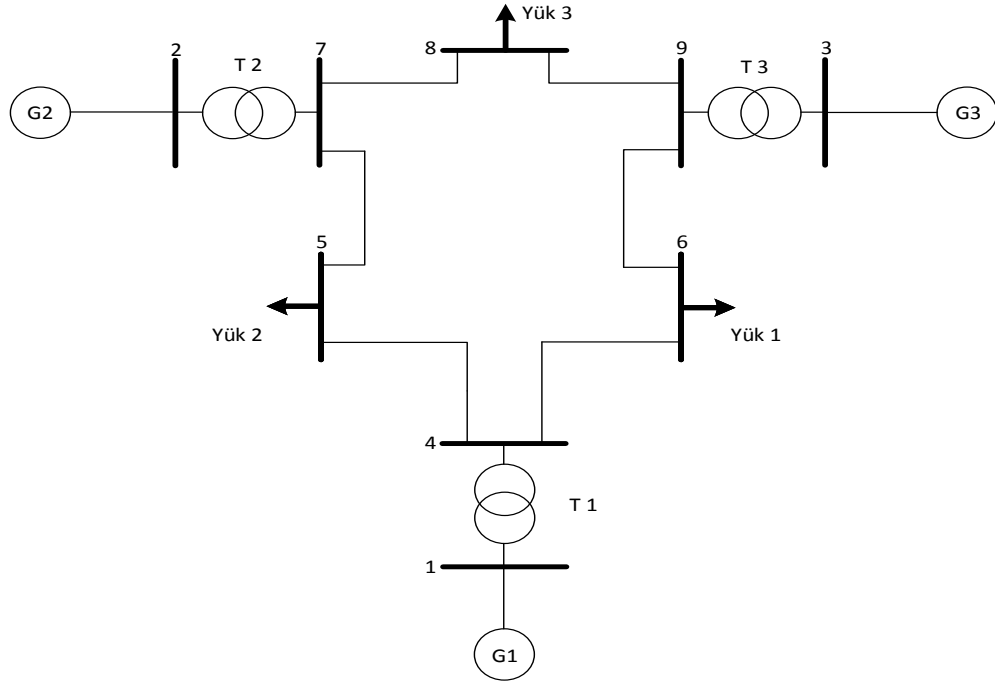
- Önerilen çözüm yöntemi ile analitik çözüm yöntemi arasındaki en büyük fark; analitik çözüm gözlem sürecinde  $\delta$  açısının değişiminden etkileniyorken, önerilen yöntemde Thevenin Geriliminin ( $E_{Th}$ ) genliği söz konusu olduğundan  $\delta$  açısının değişimi sonucu etkilememektedir. Nitekim gerçek güç sisteminde iki örnekleme arasında  $\delta$  açısı değişmektedir.



## **BÖLÜM 4. BENZETİM ÇALIŞMALARI**

Tezin bu bölümünde 3. Bölüm’de önerilen yöntemin IEEE 9 Baralı ve IEEE 30 Baralı test sistemlerinde uygulaması yapılacaktır. İlk olarak test sisteminde kararlılık analizi yapılacak yük baralarında güç akışı ile elde değerler ile baraya ait kritik gerilim değeri Tablo 3.3.’de de özet halinde verilen Önerilen yöntem, Yöntem 1 ve Yöntem 2 için ayrı ayrı hesaplanacaktır. Hesaplanan kritik gerilim değerleri ve baranın gerilim değeri ile gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) hesaplanacak ve baraya ait kararlılık değerlendirmesi önerilen ve karşılaştırılan yöntemler için yapılacaktır [96]. IEEE 9 Baralı ve IEEE 30 [97,98] Baralı Test sistemleri MATPOWER kullanılarak modellenmiştir [99] .

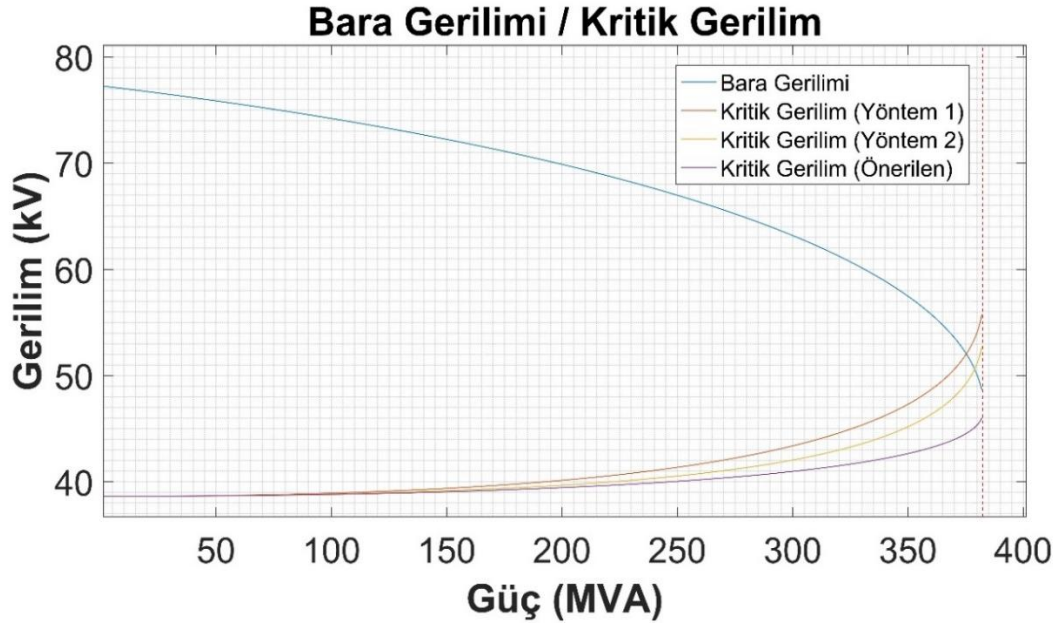
#### 4.1. IEEE 9 Bara Test Sistemi



Şekil 4.1. IEEE 9 Bara Test Sistemi

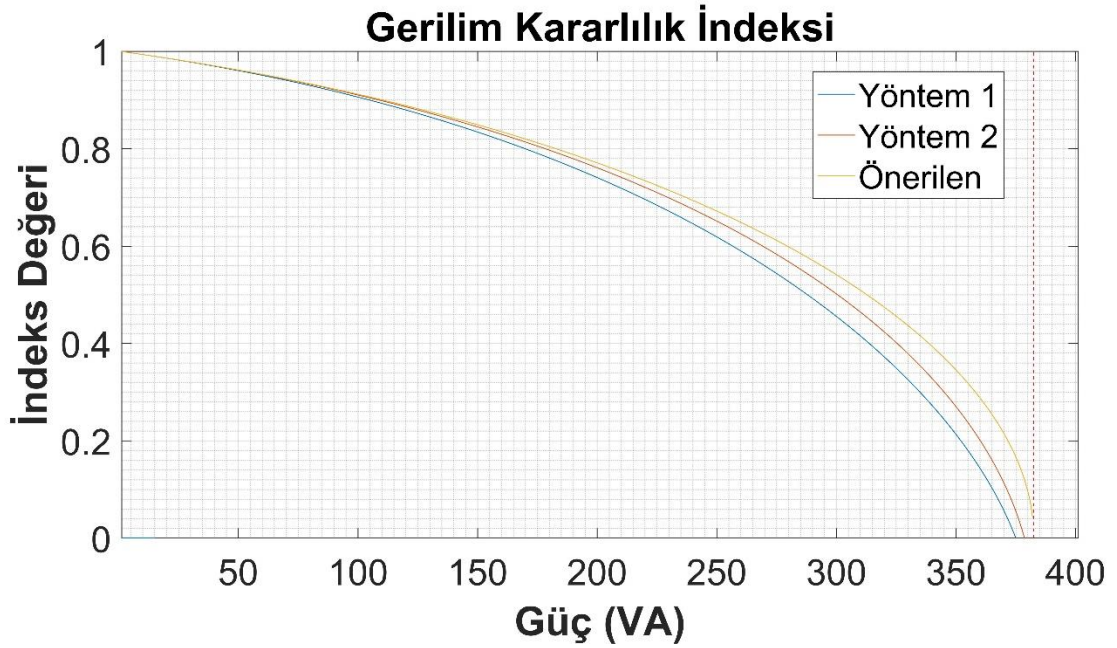
Önerilen kestirim yöntemi IEEE 9 Bara test sisteminde uygulanmıştır. IEEE 9 Bara test sistemi tek hat şeması Şekil 4.1.'de verilmiştir.

IEEE 9 baralı test sisteminin 3 farklı yük barası ayrı ayrı incelenmiş ve gerilim kararlılığı değerlendirilmesi yapılmıştır. Test sisteminin ilk olarak 5 numaralı yük barası incelenmiştir. 5 numaralı yük barasındaki aktif ve reaktif yükler, baradaki güç faktörü sabit kalacak şekilde adım adım artırılmış ve her adımda güç akışı yapılarak baraya ait gerilim, akım ve güç faktörü değerleri ölçülmüştür. 5 numaralı baradan yapılan ölçümler Tablo 3.3.'de verilen Yöntem 1 ve Yöntem 2 ve önerilen yöntem ile 5. baradan görülen Thevenin gerilimi ve Thevenin empedansı her bir yöntem için hesaplanmıştır. Yöntem 1, Yöntem 2 ve Önerilen yöntem çözümlerinden elde edilen  $E_{Th}$  ve  $Z_{Th}$  değerleri ile 5. baraya ait kritik gerilim değerleri, güç sisteminde güç akışı çözümünün olmadığı yük değerine kadar ayrı ayrı hesaplanmış ve kritik gerilim değerleri ve bara gerilimi Şekil 4.2.'de aynı grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 5. Yük Barası Kritik Değerler

Elde edilen kritik gerilim değerleri ve bara gerilim değerleri Denklem 3.32.'de verilen gerilim kararlılığı indeksi ile ölçüm alınan her adım için hesaplanarak 5. baradaki yük değişimine karşılık gelen gerilim kararlılık indeksleri önerilen yöntem ve karşılaştırılan yöntemler için Şekil 4.3.'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.3. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 5. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

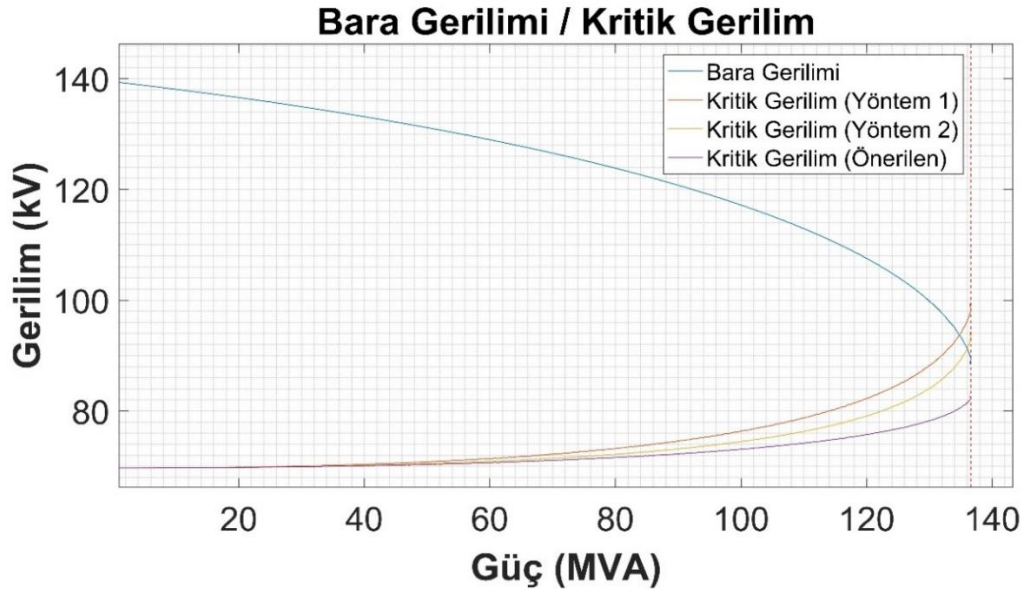
Şekil 4.3.'teki grafik test sisteminin 5. barasının kararlılık durumu hakkında bilgi verilmektedir. İndeks sifıra yaklaştığında güç sisteminin kritik değere yaklaştığı anlaşılmaktadır. Yöntem 1 ve Yöntem 2 ile elde edilen çözümlerde gerilim kararlılık indekslerinin sistemin gerçek kritik noktasına ulaşmadan sıfır değerini geçtiği görülmektedir.

Tablo 4.1. IEEE Test Sistemi 5. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

	<b>İndeks Değeri</b>	<b>Gerçek Değer</b>
Önerilen Yöntem	0.0425	0
Yöntem 1	-0.1402	0
Yöntem 2	-0.0906	0

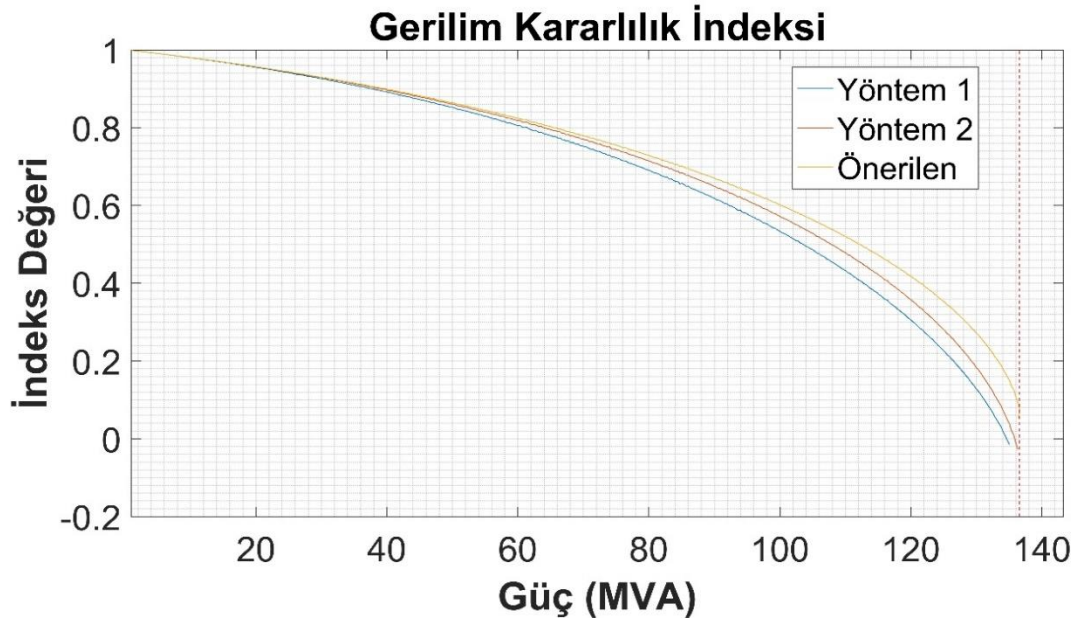
Test sisteminin 5 numaralı yük barasından yapılan ölçümlerle, 5. baradan görünen Thevenin eşdeğer devresine ait denklemler Yöntem 1, Yöntem 2 ve Optimizasyon ile çözülmüş ve kritik güç değerine ait sonuçlar Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Test sisteminin 6 numaralı yük barasından yapılan ölçümler ile bara arkasında kalan Thevenin eşdeğer devresi, Yöntem 1, Yöntem 2 ve Optimizasyon yöntemi ile hesaplanmış ve hesaplanan bu değerler üzerinden  $VSM_V$  indeksi hesaplanmış ve 6 numaralı baraya ait kararlılık değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 4.4.'te 6 numaralı baraya ait bara gerilim değeri ve kritik gerilim değerleri verilmiştir.



Şekil 4.4. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 6. Yük Barası Kritik Değerler

Test sistemi 6. barasına ait kritik gerilim değerleri ve bara gerilim değerleri denklem 3.16.'de verilen gerilim kararlılığı indeksi ile ölçüm alınan her adım için önerilen yöntem ve karşılaştırma yapılan yöntemler için hesaplanarak 6. baradaki yük değişimine karşılık gelen gerilim kararlılık indeksleri Şekil 4.5.'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



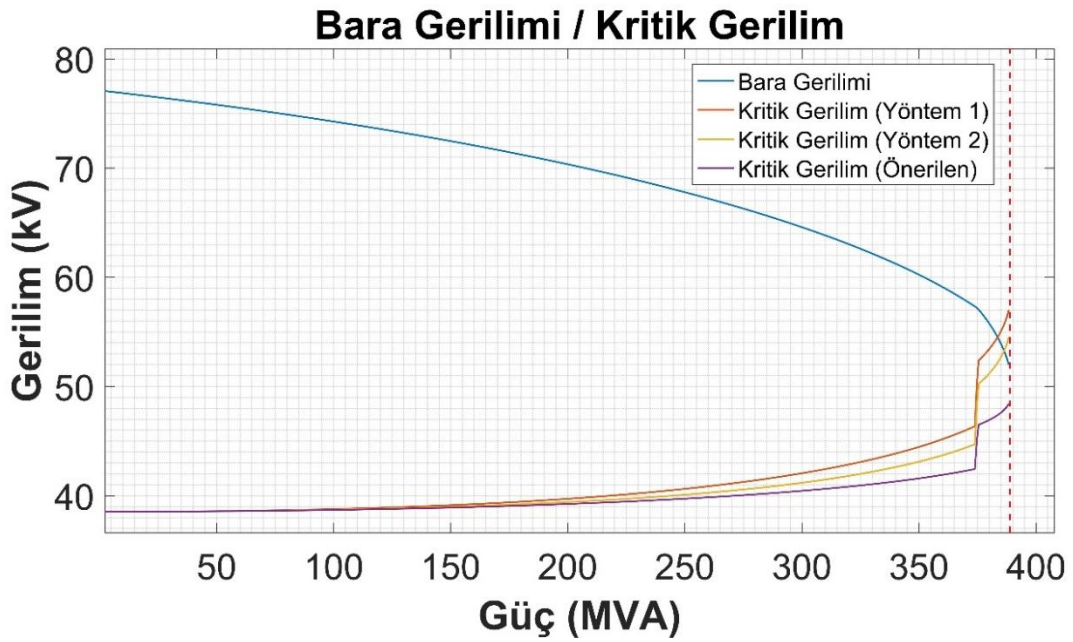
Şekil 4.5. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 6. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

IEEE 9 baralı test sisteminin 6 numaralı barasına ait kritik güç değerine ait  $VSM_V$  indeks değerleri Önerilen yöntem, Yöntem 1 ve Yöntem 2 için Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. IEEE Test Sistemi 6. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

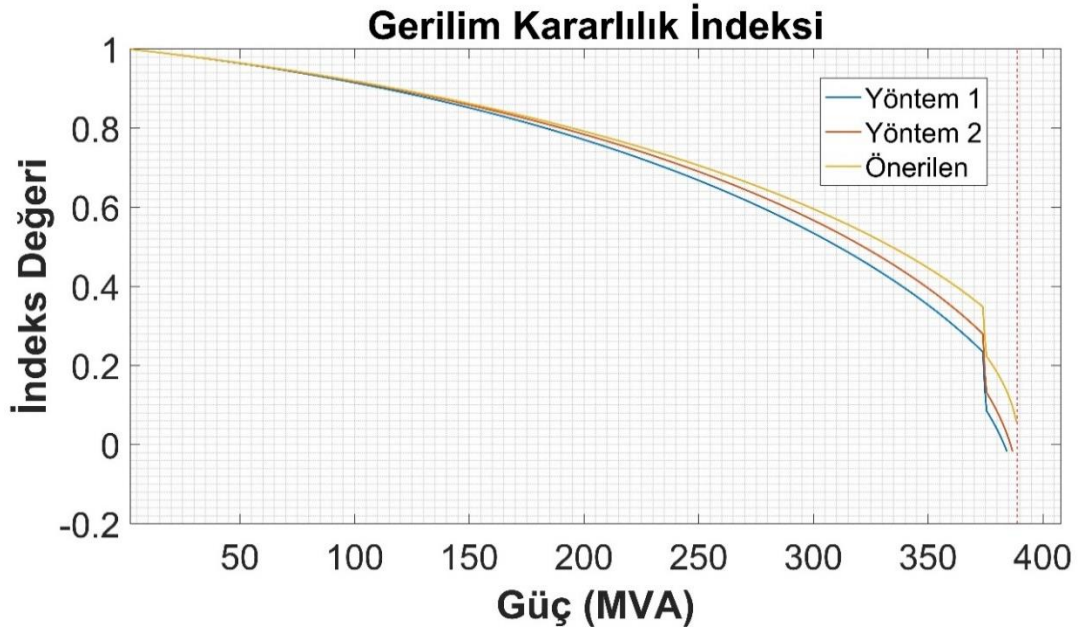
	İndeks Değeri	Gerçek Değer
Önerilen Yöntem	0.0519	0
Yöntem 1	-0.1247	0
Yöntem 2	-0.0765	0

Test sisteminin 8 numaralı yük barasından yapılan ölçümler ile bara arkasında kalan Thevenin eşdeğeri hesaplanarak, baraya ait kritik gerilim değerleri Önerilen yöntem ve Yöntem 1 ve Yöntem 2 için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Yük Barası Kritik Değerler

Test sistemi 8 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerleri ve bara gerilim değerleri kullanılarak 8 numaralı baraya ait  $VSM_V$  indeksi hesaplanmış ve önerilen ve karşılaştırılan yöntemler için Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

IEEE 9 baralı test sisteminin 8 numaralı yük barasının kritik güç değeri için hesaplanan  $VSM_V$  indeksleri Önerilen Yöntem, Yöntem 1 ve Yöntem 2 için Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. IEEE 9 Baralı Test Sistemi 8. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

	İndeks Değeri	Gerçek Değer
Önerilen Yöntem	0.0578	0
Yöntem 1	-0.1017	0
Yöntem 2	-0.0606	0

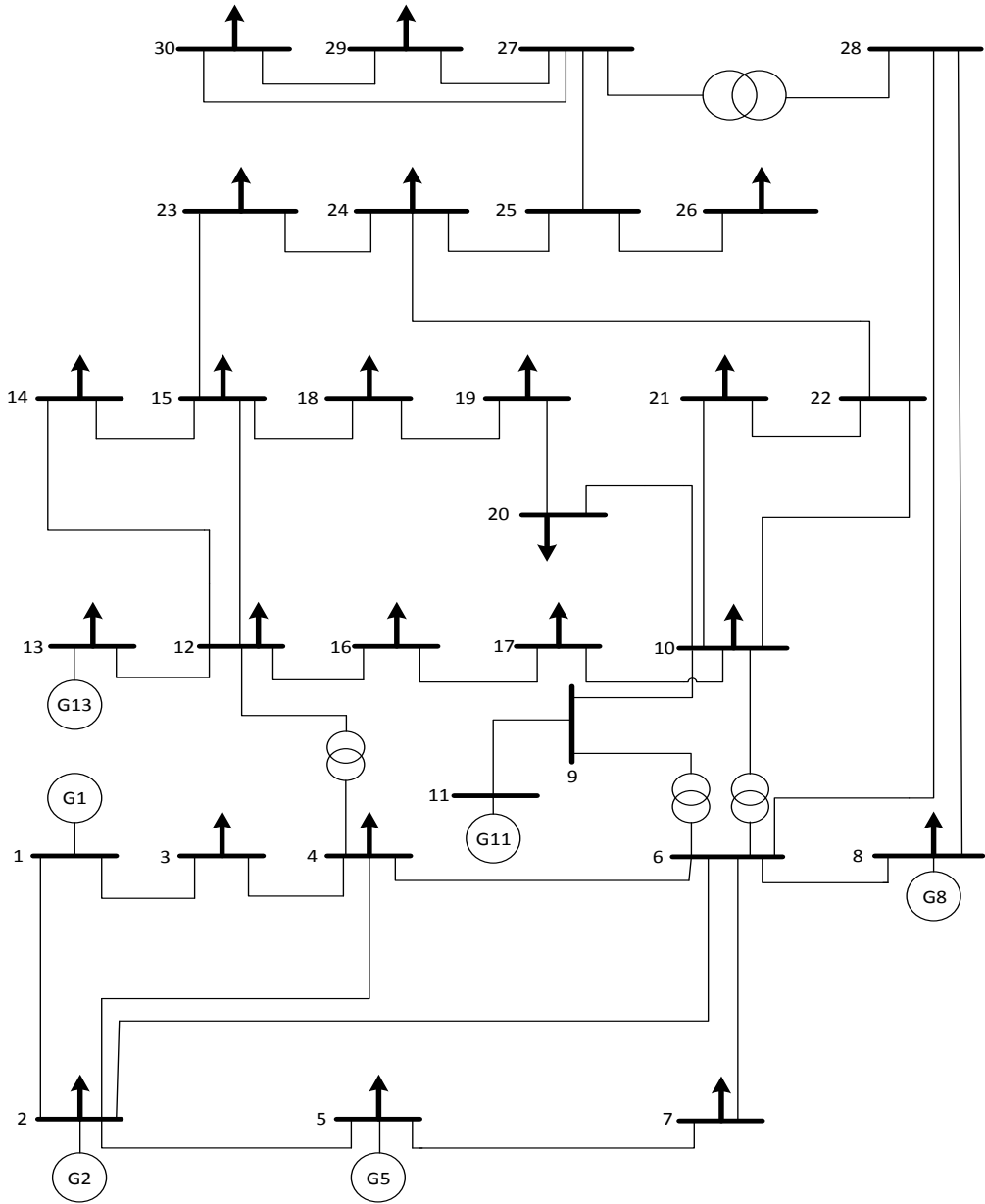
Güç sisteminin 8 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerlerinin verildiği Şekil 4.6.'da kritik gerilim değerlerinde görünen ani değişimler sistemdeki generatörlerin reaktif güç limitlerini ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Güç sisteminde bulunan generatörler reaktif güç limitlerine ulaştığında güç sistemine ait Thevenin eşdeğer devresi değişmekte ve dolayısıyla sisteme ait kritik gerilim değerleri de değişmektedir.

Şekil 4.3., Şekil 4.5. ve Şekil 4.7.'de verilen grafiklerde IEEE 9 Baralı Test sisteminin yük baralarına ait  $VSM_V$  indeks değerleri verilmiştir. Önerilen yöntemin, deterministik yöntemlere (Yöntem 1 ve Yöntem 2) göre daha doğru sonuç verdiği görülmektedir. Deterministik yöntemlerle elde edilen kritik gerilim değerleri ile hesaplanan  $VSM_V$  indeksinin sistemin gerçek kritik değerine ulaşmadan sıfır değerine

ulaştığı görülmektedir.  $VSM_V$  indeks değerlerinin önerilen yöntemde sistemin kritik değerine en yakın sonucu verdiği görülmektedir.

#### 4.2. IEEE 30 Baralı Test Sistemi

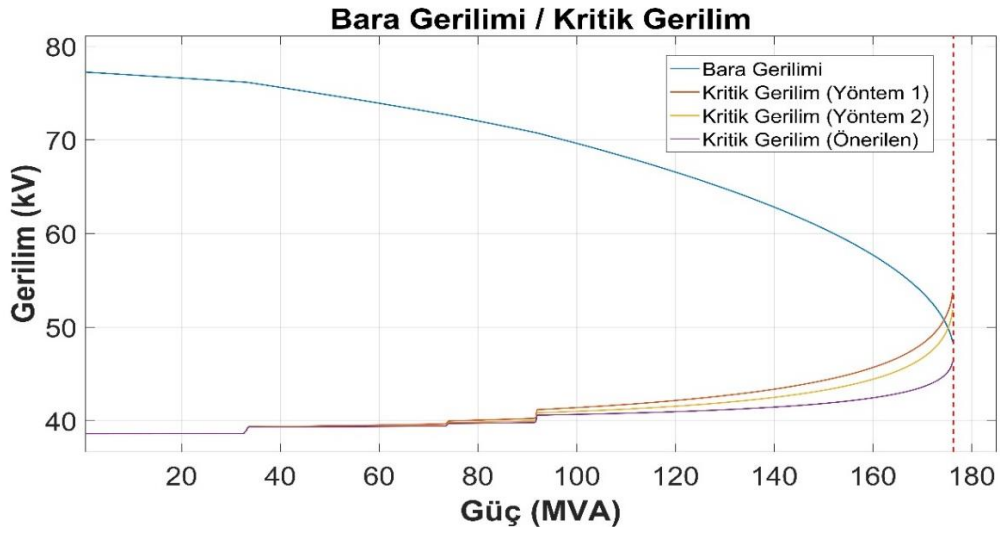
Önerilen yöntem IEEE 30 baralı test sisteminde uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır. IEEE 30 baralı test sistemin Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. IEEE 30 Baralı Test Sistemi

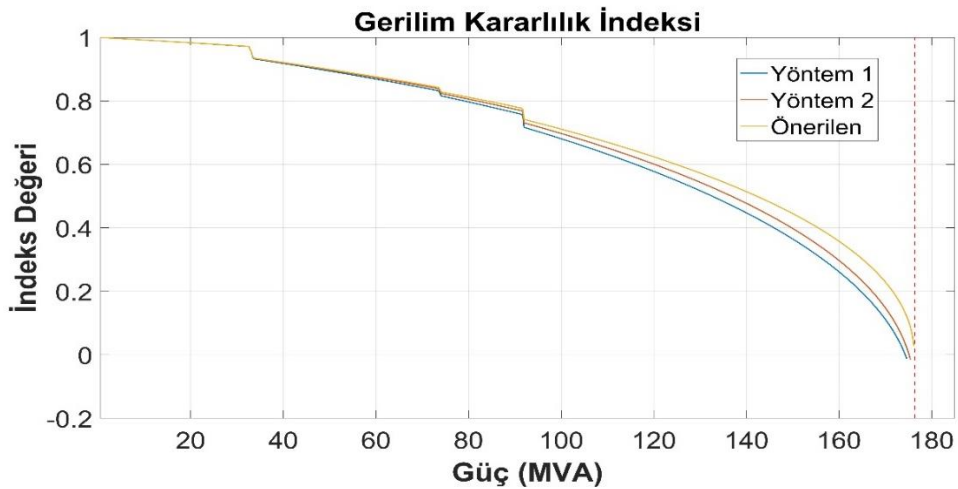


IEEE 30 baralı test sisteminin farklı yük baralarında kararlılık incelemesi yapılmıştır. Test sisteminin ilk olarak 7 numaralı yük barası incelenmiştir. Barada güç akışından gelen verilerle baraya ait kritik gerilim değerleri önerilen ve karşılaştırılan yöntemlerle hesaplanmıştır. Hesaplanan kritik gerilimler ile baraya ait  $VSM_V$  indeksi hesaplanmış ve baranın gerilim kararlılık değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 4.9.'da 7 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerleri verilmiştir.



Şekil 4.9. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Yük Barası Kritik Değerler

Hesaplanan kritik gerilim değerleri ile 7 numaralı yük barasına ait  $VSM_V$  indeks değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.10.'da verilmiştir.



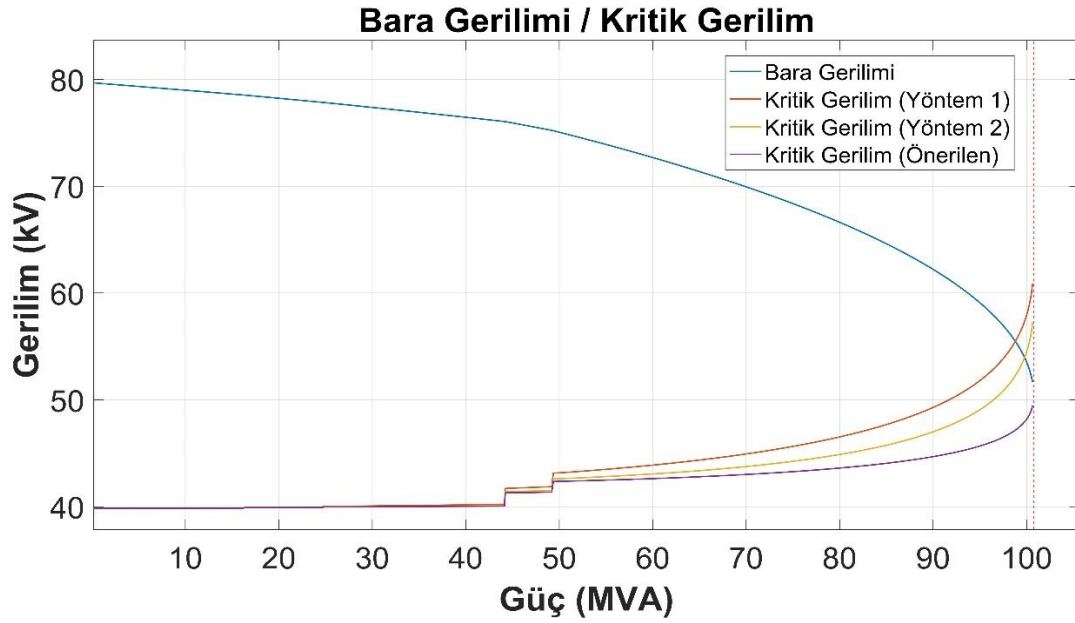
Şekil 4.10. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

Tablo 4.4.'te 7 numaralı yük barasının kritik güç değerine ait  $VSM_V$  indeks değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

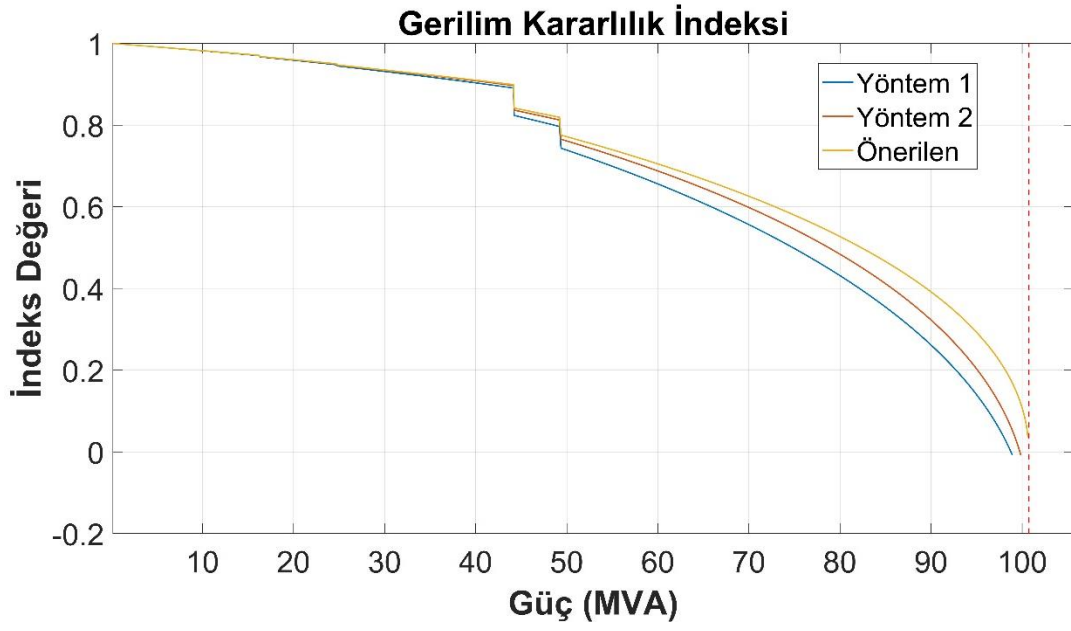
	İndeks Değeri ( $VSM_V$ )	Gerçek Değer
Önerilen Yöntem	0.0511	0
Yöntem 1	-0.1234	0
Yöntem 2	-0.0958	0

Test sisteminin 15 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerleri sistem kritik değerlerine ulaşana kadar hesaplanmış ve sonuçları Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Yük Barası Kritik Değerler

15 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerleri ile baraya ait gerilim kararlılık indeksi  $VSM_V$  hesaplanmış ve sonuçları Şekil 4.12.'de verilmiştir.



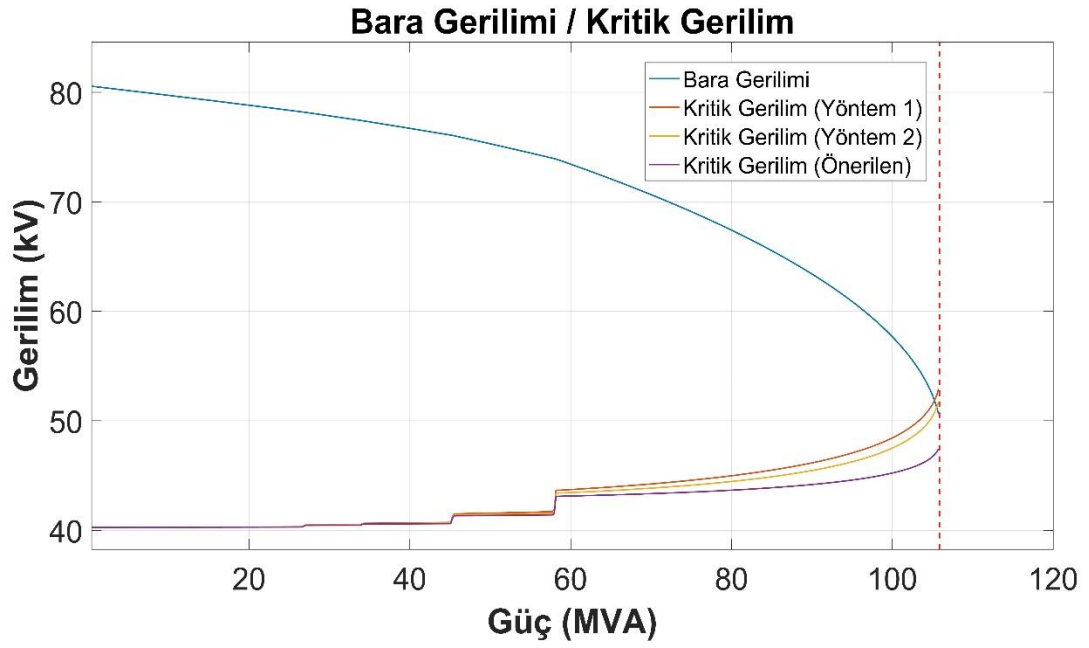
Şekil 4.12. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

Tablo 4.5.'te test sisteminin 15 numaralı yük barasının kritik güç değerine ait  $VSM_V$  indeks değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

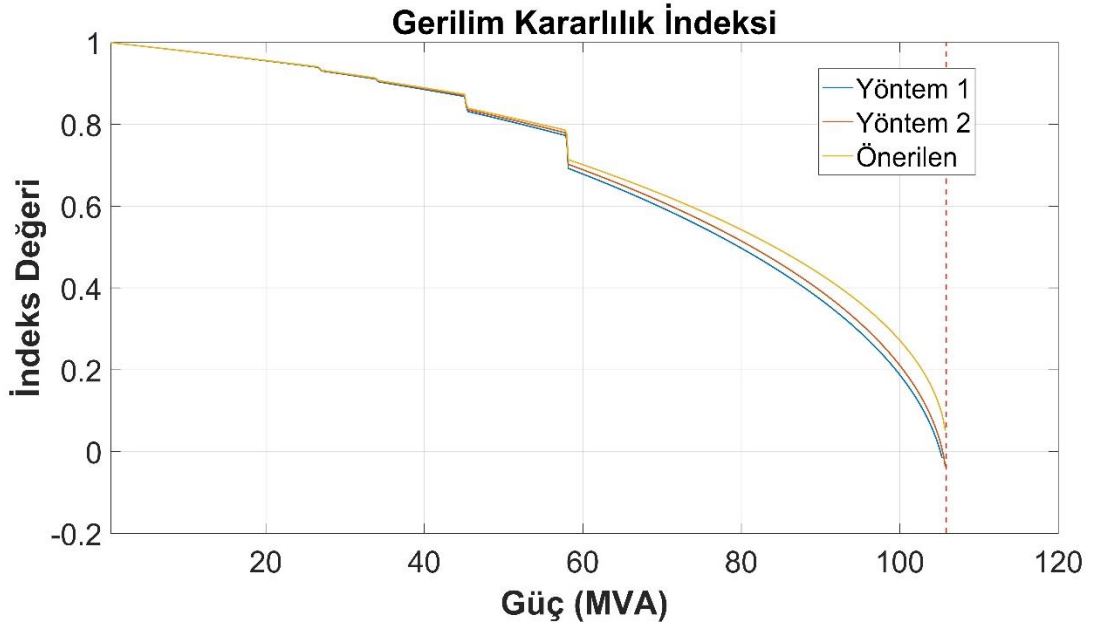
	<b>İndeks Değeri (<math>VSM_V</math>)</b>	<b>Gerçek Değer</b>
Önerilen Yöntem	0.0390	0
Yöntem 1	-0.1848	0
Yöntem 2	-0.1346	0

Test sisteminin 21 numaralı yük barasına ait kritik gerilim değerleri sistem kritik değerlerine ulaşana kadar hesaplanmış ve sonuçları Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.13. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Yük Barası Kritik Değerler

Şekil 4.14.'te 15 numaralı yük barasına ait kritik değerler kullanılarak hesaplanan  $VSM_V$  indeks sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.14. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Bara Gerilim Kararlılık İndeksleri

Tablo 4.6.'te test sisteminin 21 numaralı yük barasının kritik güç değerine ait  $VSM_V$  indeks değerleri verilmiştir.

Tablo 4.6. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 21. Bara Kritik Güç Noktasında Kararlılık İndeks Değerleri

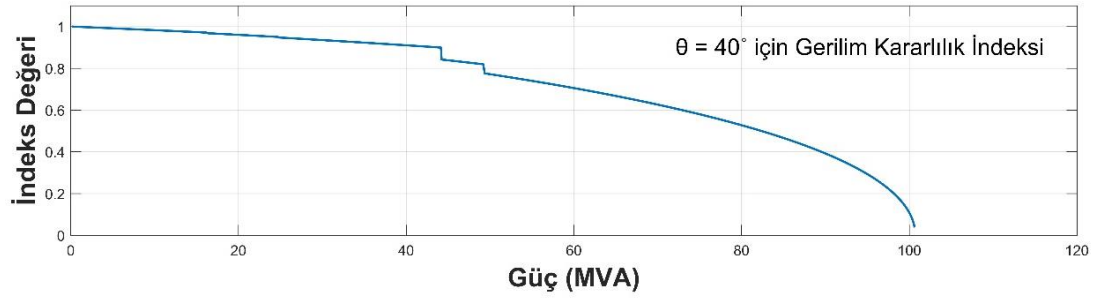
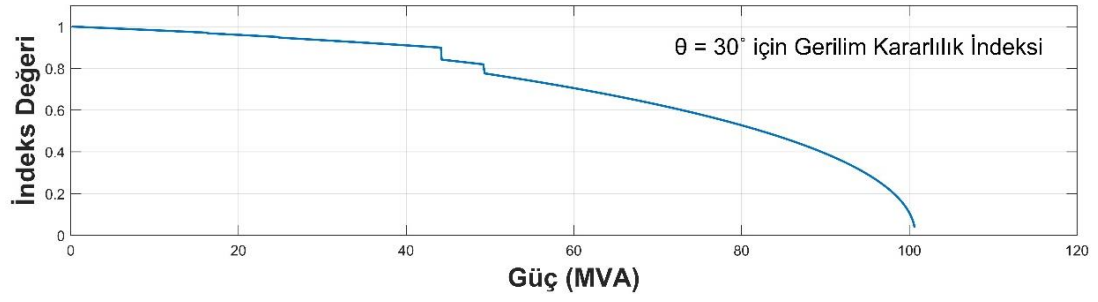
	İndeksDeğeri ( $VSM_V$ )	Gerçek Değer
Önerilen Yöntem	0.0547	0
Yöntem 1	-0.0877	0
Yöntem 2	-0.0722	0

IEEE 30 baralı test sisteminin farklı yük baralarında yapılan kararlılık değerlendirmelerinde ilk olarak ilgili baraya ait kritik değerler önerilen yöntem ve karşılaştırılan yöntemler için hesaplanmış, sistem kritik değerine ulaşana kadar adım adım hesaplanarak verilmiştir. İlgili baraya ait kritik gerilim değerindeki ani değişimler sistemde bulunan generatörlerin reaktif güç limitlerine ulaştığında sistemin Thevenin eşdeğer devresinde değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

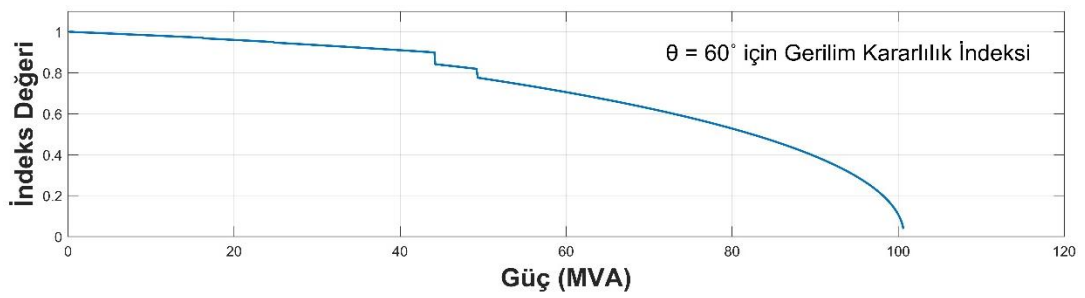
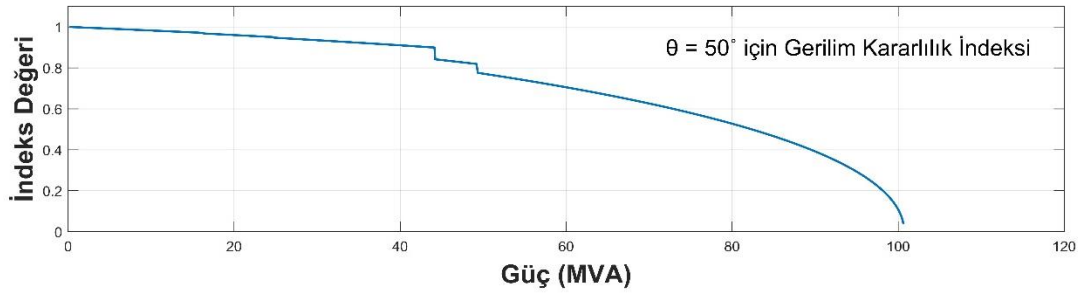
Önerilen yöntemin sistemde analizi yapılan baranın kritik güç değerlerine, karşılaştırma yapılan yöntemlere göre daha yakın sonuçlar verdiği ve baranın gerilim kararlılığı hakkında daha doğru bilgi verdiği görülmüştür.

#### 4.3. Farklı Teta Açıları ( $\theta$ ) için Gerilim Kararlılık İndeksi

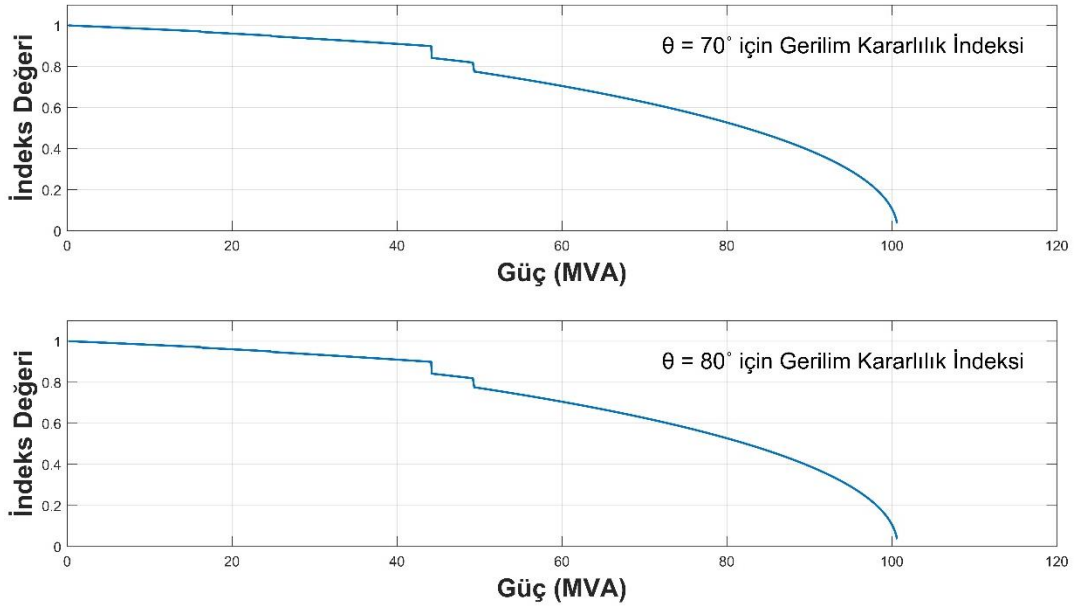
IEEE 30 Baralı Test sistemi için 15 numaralı yük barasında önerilen yöntem kullanılarak farklı  $\theta$  değerleri için gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) hesaplanmış sonuçları verilmiştir. Farklı  $\theta$  değerleri için gerilim kararlılık indeksi değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gösterilmiştir. 15 numaralı yük barası için  $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  için gerilim kararlılık indeksi  $VSM_V$  değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.15., Şekil 4.16. ve Şekil 4.18.'de  $\theta$  değerleri için gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) değerleri verilmiştir.



Şekil 4.15.  $\theta = 30^\circ$ ,  $\theta = 40^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri



Şekil 4.16.  $\theta = 50^\circ$ ,  $\theta = 60^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri



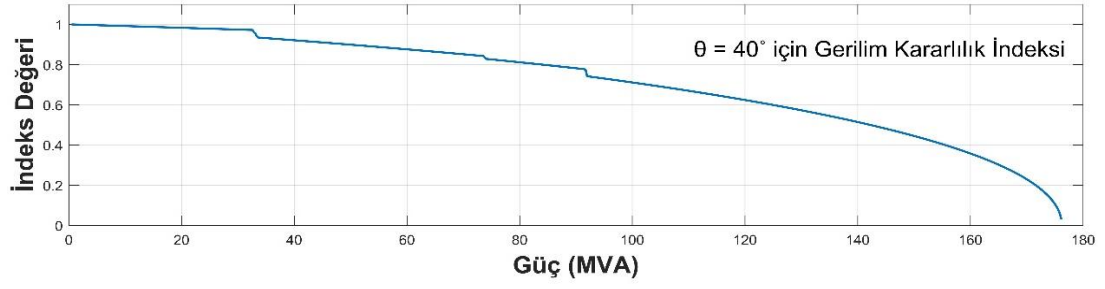
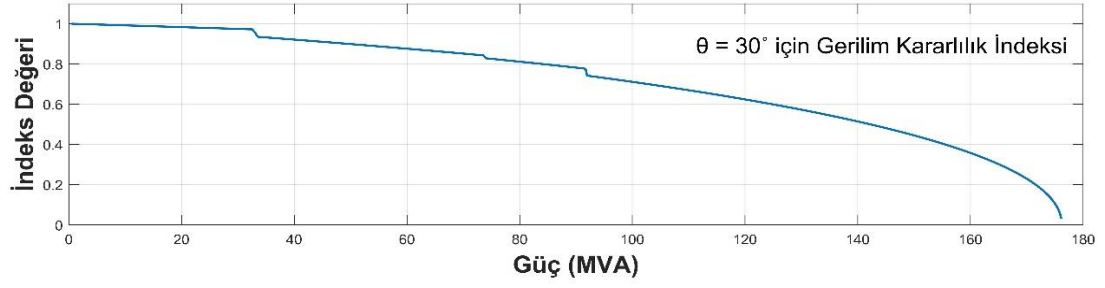
Şekil 4.17.  $\theta = 70^\circ$ ,  $\theta = 80^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri

Tablo 4.7. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 7. Bara Farklı Teta Değerleri İçin Kritik Güç  $VSM_V$  Değerleri

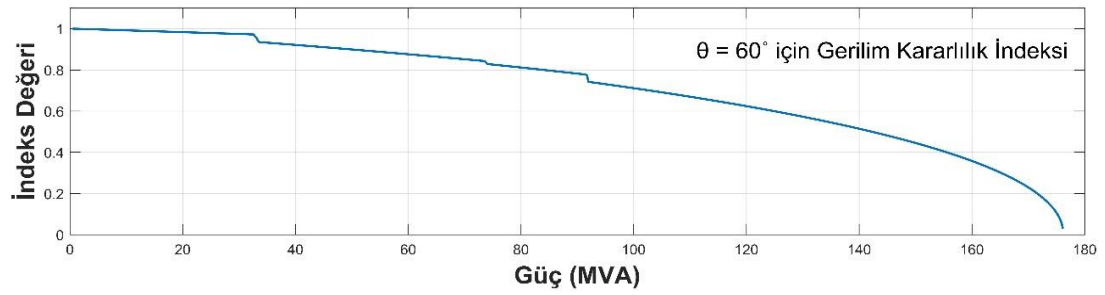
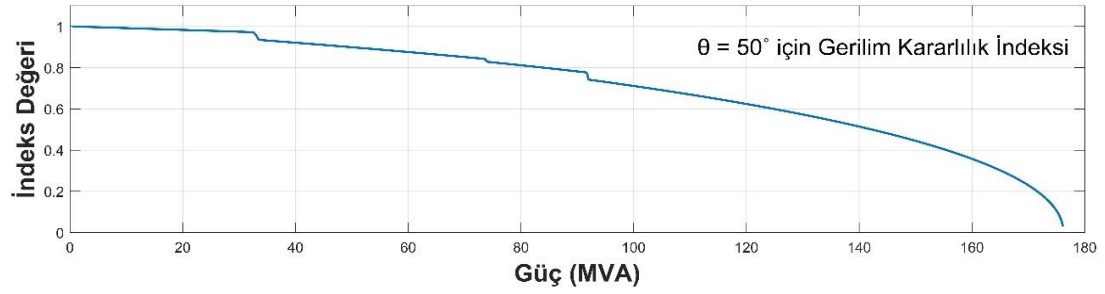
$\theta^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$
Kritik Güç İçin $VSM_V$ Değeri	0.0370	0.0369	0.0366	0.0363	0.0358	0.0351
Güç Akışı $VSM_V$ Değeri	0	0	0	0	0	0

Tablo 4.7.'de IEEE 30 baralı test sisteminin 7 numaralı yük barasına ait gerilim kararlılık indeks değerleri ( $VSM_V$ ) kritik güç değeri için verilmiştir. İndeks değerlerinin farklı  $\theta$  değerleri için de birbirine çok yakın değerler verdiği görülmüştür.

IEEE 30 Baralı test sisteminin 7 numaralı yük barasında  $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  değerleri için gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) değerleri hesaplanmış ve sonuçları Şekil 4.18., Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'de verilmiştir.

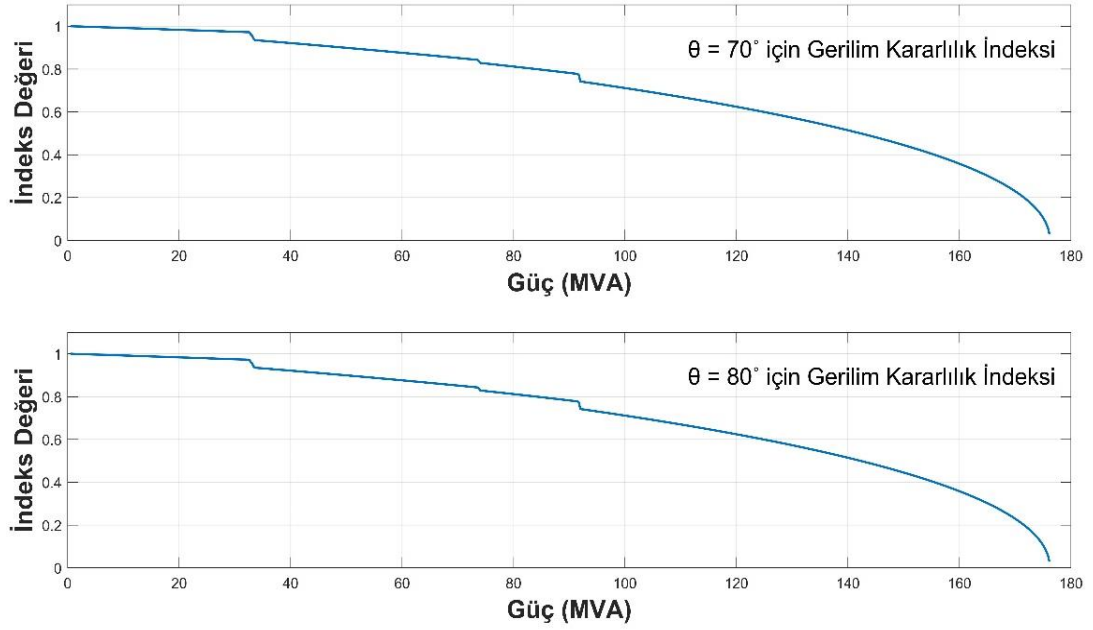


Şekil 4.18.  $\theta = 30^\circ$ ,  $\theta = 40^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri



Şekil 4.19.  $\theta = 50^\circ$ ,  $\theta = 60^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri





Şekil 4.20.  $\theta = 70^\circ$ ,  $\theta = 80^\circ$  için Gerilim Kararlılık İndeks Değerleri

Tablo 4.8. IEEE 30 Baralı Test Sistemi 15. Bara Farklı Teta Değerleri İçin Kritik Güç VSMV Değerleri

$\theta^\circ$	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Kritik Güç İçin VSM <sub>v</sub> Değeri	0.0303	0.0302	0.0299	0.0294	0.0287	0.0278
Güç Akışı VSM <sub>v</sub> Değeri	0	0	0	0	0	0

IEEE 30 baralı test sisteminin 7 numaralı yük barasında farklı  $\theta$  açısı değerleri için hesaplanan gerilim kararlılık indeksi değerlerin birbirine çok yakın değerler olduğu verilen grafiklerden görülmektedir. Tablo 4.8.'de 7 numaralı baranın kritik güç değerinde gerilim kararlılık indeksinin (VSM<sub>v</sub>) aldığı değerler verilmiştir. Kritik güç değerinde farklı  $\theta$  açısı için hesaplanan indeks değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında N baralı bir güç sisteminin herhangi bir yük barasından görülen Thevenin Eşdeğer devresi yeni bir yaklaşımla kestirilmiştir. Kestirilen eşdeğer devre parametreleri kullanılarak maksimum güç transferi yasasıyla ilgili baranın sürekli hal gerilim kararlılığı sınır değerleri belirlenmiştir.

Gerilim kararlılığı analizi yapılacak baradan görülen Thevenin Eşdeğer devresi sadece yerel bara ölçümleri (yük akımı, bara gerilimi ve yükün güç faktörü) kullanılarak optimizasyon yaklaşımı ile kestirilmiştir. Kestirilen Thevenin eşdeğer devre parametreleri ile ilgili baraya ait kararlılık durumu gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile ilgili baraya ait kritik gerilim değerleri gerçek zamanlı olarak hesaplanmış, hesaplanan kritik gerilim değerleri ve bara gerilimleri kullanılarak baraya ait gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) hesaplanmış ve ilgili baranın gerilim kararlılığı değerlendirilmesi gerçek zamanlı yapılmıştır.

Analizi yapılacak baradan yapılan az sayıda örnekleme ile ölçüm hatalarına daha az duyarlı optimizasyon esaslı bir kestirim yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda doğruluğu etkileyen kabuller diğer yaklaşımlardakilere göre az sayıdadır. Analitik yaklaşımlarda ölçümler arasında Thevenin Empedansı, Thevenin empedans açısı, Thevenin Gerilimi ve yük açısı iki ölçüm arasında sabit kabul edilirken, önerilen yaklaşımda iki ölçüm arasında sadece Thevenin empedansı ve Thevenin gerilimi sabit kabul edilmiştir. Yapılan kabullerin azlığı, sistemin kritik değerlerini belirlemedeki başarıyı arttırmıştır.

Önerilen yöntemde kullanılan örnek sayısının az olması, kararlılık durumu hakkında bilgi veren indeksin hızlı hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, önerilen

yaklaşımın güç sisteminin ilgili barasının kararlılık durumunun gerçek zamanlı olarak izlenmesinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizi yapılacak baraya ait gerilim kararlılık indeksinin ( $VSM_V$ ) hesaplanabilmesi için Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Önerilen yöntem ile ilgili baradan görülen Thevenin Empedans açısının ( $\theta_{Th}$ ) doğru tahmin edilmesine gerek olmadan, açı değerinin  $|\varphi| < \theta_{Th} < 90^\circ$  aralığında herhangi bir değer seçilmesi durumlarında dahi, elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile hesaplanan kritik gerilim değerlerinin aynı sonucu verdiği görülmüştür. Bu durum önerilen yöntemin Thevenin empedans açısından bağımsız olarak, ilgili baranın kararlılık durumu hakkında doğru bilgi verdiğini göstermiştir.

Önerilen yöntemde farklı Thevenin empedans açıları  $Z_{Th}$ 'in genliğine etki etmektedir. Fakat optimizasyon yaklaşımı ile kestirilen  $Z_{Th}$  değerine karşılık gelen  $E_{Th}$  ve  $\delta_{Th}$  değerleri gerilim kararlılığı değerlendirmesi için yeterli olmaktadır. Gerilim kararlılığı değerlendirmesi için yeterli olan Thevenin eşdeğer devre parametre setine Sözde (Pseudo) Thevenin Eşdeğer Devre Parametreleri (STEDP) denilmiştir. Kestirilen STEDP ile baraya ait  $VSM_V$  değeri Thevenin empedans açısından bağımsız olarak hesaplanabilmekte ve baranın kararlılık durum bilgisi anlık olarak elde edilebilmektedir.

Önerilen optimizasyon temelli yaklaşım, iki farklı analitik kestirim yöntemi ile karşılaştırılmış, analitik yöntemlerde karşılaşılan tekil matris kaynaklı yakınsama sorunlarının önerilen optimizasyon temelli kestirim yaklaşımında görülmediği ve karşılaştırılan analitik yöntemlere göre daha başarılı kestirimlerin yapıldığı görülmüştür.

Gerilim kararlılığı değerlendirmesinde kullanılan bağıl gerilim kararlılık indeksinin ( $VSM_V$ ) önerilen optimizasyon temelli yaklaşımla güç sisteminin kritik noktasını analitik kestirim yöntemlerine göre daha doğru bulduğu gösterilmiştir. Önerilen

yaklaşımında gerilim kararlılığı için kritik sınır noktası olan  $VSM_v=0$  değerine en çok önerilen yöntemin yaklaştığı gösterilmiştir.

Gerilim kararlılık değerlendirmesi yapılacak barada, fazör yaklaşımları kullanılarak yapılan grafik inceleme, kararlılık sınırlarının daha açık yorumlanmasını sağlamıştır.

Önerilen yöntem güç sisteminin bütün yük baralarındaki kararlılık durumunu, baradaki yükün türünden bağımsız olarak gerçek zamanlı olarak takip edilebilme imkânını sunmaktadır.

## BÖLÜM 6. ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmalar sonucunda;

Güç sisteminin gerilim kararlılığı analizi yapılacak barasından görülen Thevenin Eşdeğer devre parametrelerinin farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak hesaplanması ve sonuçlarının karşılaştırılması fikrini uyandırmıştır.

Önerilen yöntem ile ilgili baranın gerilim kararlılığı hakkında az veri ile bilgi edinilebilme imkanı sunulduğu gibi, önerilen gerçek zamanlı izleme ile gerektiği durumlarda sistemden yük atma, reaktif güç kaynaklarının hızlı devreye alınması gibi kararların alınmasına hızlı enformasyon desteği sağlanabilecektir.

Önerilen yaklaşım ile hesaplanan gerilim kararlılık indeksi ( $VSM_V$ ) dağıtılmış üretimlerin güç sisteminde gerilim kararlılığını iyileştirmesi için bağlanması gereken en iyi noktanın saptanmasında kullanılabilir.

Güç sistemlerinde kararlılık değerlendirmesi için Thevenin Empedans açısının daha doğru kestirilmesi, Sözde parametreler yerine gerçek parametrelerin bulunmasını sağlayacağından, empedans açısının istatistiksel veya farklı optimizasyon yaklaşımlarıyla kestirilmesinin denenmesi önerilir. Sistemin gerçek Thevenin empedans açısının kestirilmesi kararlılık analizi çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bunun sonucunda farklı uygulama alanları görülebilir.

Önerilen yöntemin sonuçlarından biri olan olan Thevenin empedansının kestirimi doğru Thevenin empedans açısı ile yapılırsa yük empedans değeri ve Thevenin empedans değeri ile empedans kararlılık indeksi (Z indeksi) [100] hesaplanarak ilgili baranın kararlılık sınırı daha az işlem ile değerlendirilebilir.

Yük dağıtım merkezlerinden alınacak verilerin bilgi işlem tabanlı bir sistem üzerinde işlenmesi ile önerilen yöntem gerçek güç sistemlerinde kullanılabilir ve yük baralarına ait gerilim kararlılığı bilgisinin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi mümkün olacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] “Power System Voltage Stability [Books and Reports],” IEEE Power Eng. Rev., vol. 15, no. 6, p. 27, Jun. 1995, doi: 10.1109/MPER.1995.391560.
- [2] J. Zhao and Y. Yang, “A review on on-line voltage stability monitoring indices and methods based on local phasor measurements,” 17th Power Syst. Comput. Conf., pp. 1–7, 2011.
- [3] M. S. S. Danish, T. Senjyu, S. M. S. Danish, N. R. Sabory, K. Narayanan, and P. Mandal, “A recap of voltage stability indices in the past three decades,” Energies, vol. 12, no. 8, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/en12081544.
- [4] T. Van Cutsem and C. Vournas, Voltage stability of electric power systems. 2008.
- [5] T. Van Cutsem and C. D. Vournas, “Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 1, pp. 146–154, 1996, doi: 10.1109/59.486091.
- [6] C. A. Reason, “5-Power System Analysis and Design,” 2006.
- [7] M. L. Crow, 6-Computational Methods for Electric Power Systems. 2012.
- [8] C. A. Canizares, A. C. Z. De Souza, and V. H. Quintana, “Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 3, pp. 1441–1450, 1996, doi: 10.1109/59.535685.
- [9] Hsiao-Dong Chiang and R. Jean-Jumeau, “Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 584–592, May 1995, doi: 10.1109/59.387892.
- [10] M. Glavic and T. Van Cutsem, “Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements. Part II: Simulation Results,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1417–1425, 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2023272.

- [11] M. Glavic and T. Van Cutsem, "Detecting with PMUs the onset of voltage instability caused by a large disturbance," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, no. June, 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596308.
- [12] K. Vu, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1029–1035, 1999, doi: 10.1109/59.780916.
- [13] B. Milčević and M. Begović, "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 121–127, 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2002.805018.
- [14] M.H.Haque, "On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 1, 2003, doi: 10.1093/oxfordjournals.ndt.a091183.
- [15] S. B. Demircioğlu, "Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi," 2007.
- [16] B. S. England and A. T. Alouani, "Real time voltage stability prediction of smart grid areas using smart meters data and improved Thevenin estimates," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 122, no. May, p. 106189, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106189.
- [17] M. U. Hashmi, R. Choudhary, and J. G. Priolkar, "43-Online thevenin equivalent parameter estimation using nonlinear and linear recursive least square algorithm," *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Technol. ICECCT 2015*, no. July, 2015, doi: 10.1109/ICECCT.2015.7225946.
- [18] J. Modarresi, E. Gholipour, and A. Khodabakhshian, "A comprehensive review of the voltage stability indices," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.010.
- [19] M. Moghavvemi and O. Faruque, "Real-time contingency evaluation and ranking technique," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 5, p. 517, 1998, doi: 10.1049/ip-gtd:19982179.
- [20] R. Kanimozhi and K. Selvi, "A novel line stability index for voltage stability analysis and contingency ranking in power system using fuzzy based load flow," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 694–703, 2013, doi: 10.5370/JEET.2013.8.4.694.
- [21] F. A. Althowibi and M. W. Mustafa, "Line voltage stability calculations in power systems," *PECon2010 - 2010 IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 396–401, 2010, doi: 10.1109/PECON.2010.5697616.



- [22] T. K. Abdul Rahman and G. B. Jasmon, "New technique for voltage stability analysis in a power system and improved loadflow algorithm for distribution network," *Proc. Int. Conf. Energy Manag. Power Deliv. EMPD*, vol. 2, pp. 714–719, 1995, doi: 10.1109/empd.1995.500816.
- [23] K. J. Makasa and G. K. Venayagamoorthy, "On-line voltage stability load index estimation based on PMU measurements," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 6–11, 2011, doi: 10.1109/PES.2011.6039882.
- [24] R. Mahanty and P. Gupta, "Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow," *IEE Proceedings-Generation, Transm. ...*, vol. 151, no. 3, pp. 201–212, 2004, doi: 10.1049/ip-gtd.
- [25] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 346–354, 1986, doi: 10.1109/TPWRD.1986.4308013.
- [26] M.H.Haque, "Use of Local Information to Determine the Distance to Voltage Collapse," pp. 407–412, 2007.
- [27] F. A. Althowibi and M. W. Mustafa, "Power system network sensitivity to voltage collapse," *2012 IEEE Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2012 - Conf. Proc.*, no. June 2012, pp. 379–383, 2012, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230893.
- [28] S. Pérez-Londoño, L. F. Rodríguez, and G. Olivar, "A simplified voltage stability index (SVSI)," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 806–813, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.044.
- [29] J. Hongjie, Y. Xiaodan, and Y. Yixin, "An improved voltage stability index and its application," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 27, no. 8, pp. 567–574, 2005, doi: 10.1016/j.ijepes.2005.08.012.
- [30] M. Moghavvemi and F. M. Omar, "Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 6, pp. 634–640, 1998, doi: 10.1049/ip-gtd:19982355.
- [31] R. Verayiah and I. Z. Abidin, "A study on static voltage collapse proximity indicators," *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, no. PECon 08, pp. 531–536, 2008, doi: 10.1109/PECON.2008.4762533.
- [32] I. Musirin and T. K. Abdul Rahman, "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system," *2002 Student Conf. Res. Dev. Glob. Res. Dev. Electr. Electron. Eng. SCORED 2002 - Proc.*, pp. 265–268, 2002, doi: 10.1109/SCORED.2002.1033108.

- [33] B. Bartosz, R. Waldemar, and S. Janusz, "A new method of voltage stability margin estimation based on local measurements," *Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, pp. 2443–2447, 2011, doi: 10.1109/APAP.2011.6180655.
- [34] J. E. Tobón V., R. E. C. Gutiérrez, and J. M. Ramirez, "Voltage collapse detection based on local measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 107, pp. 77–84, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.09.013.
- [35] B. Shakerighadi, F. Aminifar, and S. Afsharnia, "A Real-Time Voltage Stability Index Based on Local Measurements," pp. 1492–1497, 2015, doi: 10.1109/IranianCEE.2015.7146456.
- [36] S. A. Arefifar and W. Xu, "Online tracking of power system impedance parameters and field experiences," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 1781–1788, 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2021046.
- [37] S. M. Abdelkader and D. J. Morrow, "Online Thévenin Equivalent Determination Considering System Side Changes and Measurement Errors," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2716–2725, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2365114.
- [38] S. Shen, H. Wang, P. Hu, B. He, Y. Liu, and C. Gan, "A nonparametric denoising approach for thevenin equivalent parameters estimation based on taut-string-multiresolution algorithm," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274376.
- [39] R. Maharjan and S. Kamalasadán, "Voltage stability index for online voltage stability assessment," *2015 North Am. Power Symp. NAPS 2015*, pp. 1–6, Nov. 2015, doi: 10.1109/NAPS.2015.7335245.
- [40] M. Bahadornejad and N. K. C. Nair, "System Thevenin impedance estimation through on-load tap changer action," *2010 20th Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, no. 4, pp. 3–7, 2010.
- [41] S. J. S. Tsai and K. H. Wong, "On-line estimation of Thevenin equivalent with varying system states," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596364.
- [42] D. T. Duong and K. Uhlen, "Online voltage stability monitoring based on PMU measurements and system topology," *2013 3rd Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2013*, pp. 4–9, 2013, doi: 10.1109/EPECS.2013.6713056.
- [43] B. Alinezhad and H. K. Karegar, "On-line thévenin impedance estimation based on PMU data and phase drift correction," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1033–1042, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2574765.

- [44] M. Wang, B. Liu, and Zhelin Deng, "An improved recursive assessment method of Thevenin equivalent parameters based on PMU measurement," PEAM 2011 - Proc. 2011 IEEE Power Eng. Autom. Conf., vol. 1, pp. 372–375, 2011, doi: 10.1109/PEAM.2011.6134877.
- [45] B. Alinejad and H. K. Karegar, "Online inertia constant and Thévenin equivalent estimation using PMU data," 30th Power Syst. Conf. PSC 2015, no. November, pp. 106–110, 2017, doi: 10.1109/IPSC.2015.7827734.
- [46] H. Y. Su and C. W. Liu, "Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 4, pp. 3221–3229, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2477426.
- [47] A. Bidadfar, H. Hooshyar, and L. Vanfretti, "Dynamic Thévenin equivalent and reduced network models for PMU-based power system voltage stability analysis," Sustain. Energy, Grids Networks, vol. 16, pp. 126–135, 2018, doi: 10.1016/j.segan.2018.07.002.
- [48] S. M. Abdelkader, A. A. Eladl, M. A. Saeed, and D. J. Morrow, "Online Thévenin equivalent determination using graphical phasor manipulation," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 97, no. November 2017, pp. 233–239, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.11.013.
- [49] A. B. Birchfield et al., "A metric-based validation process to assess the realism of synthetic power grids," Energies, vol. 10, no. 8, 2017, doi: 10.3390/en10081233.
- [50] A. Wiszniewski, "New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 22, no. 3, pp. 1367–1371, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.886772.
- [51] A. M. Kettner and M. Paolone, "A Generalized Index for Static Voltage Stability of Unbalanced Polyphase Power Systems including Thévenin Equivalents and Polynomial Models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 6, pp. 4630–4639, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2922073.
- [52] H. Y. Su and T. Y. Liu, "Robust Thevenin Equivalent Parameter Estimation for Voltage Stability Assessment," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 4, pp. 4637–4639, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2821926.
- [53] X. Mou, W. Li, and Z. Li, "A preliminary study on the Thevenin equivalent impedance for power systems monitoring," DRPT 2011 - 2011 4th Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol., no. 50807009, pp. 730–733, 2011, doi: 10.1109/DRPT.2011.5993988.
- [54] P. Apparatus, "Proposed Terms & Definitions for Power System Stability," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101, no. 7, pp. 1894–1898, 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317476.

- [55] P. Kundur et al., "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [56] P. Kundur, *Power System Stability And Control* by Prabha Kundur. 1994.
- [57] Z. Zhang, Z. Wang, and X. Chen, "Study on emergency control based on Regional frequency response model," *APAP 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, vol. 2, pp. 1153–1156, 2011, doi: 10.1109/APAP.2011.6180980.
- [58] T. F. 38-02-10, "Modelling of voltage collapse including dynamic phenoma," *Analysis*, vol. 38, p. 150, 1993.
- [59] CIGRÉ, "Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse," *Task Force 38.02.12*, no. October, p. 110, 1995.
- [60] C. Cañizares, *Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*, no. January. 2002.
- [61] C. M. Reddy, "Power system voltage stability analysis," *Master of Degree*, no. June, pp. 115–122, 2011.
- [62] A. Ravi, A. Dwivedi, and B. Sharma, "Voltage Stability Analysis," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 1572–1583, 2013, Available: <http://www.ijser.org/researchpaper/Voltage-Stability-Analysis.pdf>, Erişim Tarihi: 26.06.2020.
- [63] T. J Duncan Glover; Mulukutla S Sharma; Overbye, *Power System Analysis and Design*. 2012.
- [64] A. Pandey, M. Jereminov, M. R. Wagner, D. M. Bromberg, G. Hug, and L. Pileggi, "Robust Power Flow and Three-Phase Power Flow Analyses," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 616–626, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2863042.
- [65] H. Le Nguyen, "Newton-Raphson method in complex form [power system load flow analysis]," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1355–1359, 1997, doi: 10.1109/59.630481.
- [66] W. F. Tinney, S. Member, and C. E. Hart, "Power Flow Newton's," *Proc. IEEE*, no. 11, 1967, doi: 10.1177/1053825913518895.
- [67] J. A. Treece, "60-Bootstrap Gauss-Seidel load flow," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 116, no. 5, p. 866, 1969, doi: 10.1049/piee.1969.0161.

- [68] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 859–869, May 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.
- [69] B. H. Chowdhury and C. W. Taylor, "Voltage stability analysis: V-Q power flow simulation versus dynamic simulation," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 3, no. WINTER MEETING, p. 1146, 2001, doi: 10.1109/pesw.2001.917234.
- [70] V. Ajarapu and C. Christy, "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis," in [Proceedings] *Conference Papers 1991 Power Industry Computer Application Conference*, pp. 304–311, doi: 10.1109/PICA.1991.160593.
- [71] M. A. Pai and A. Stankovic, *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*. Boston, MA: Springer US, 2007.
- [72] Mehmet Ali YALÇIN, "Enerji iletim sistemlerinde gerilim kararlılığının yeni bir yaklaşımla incelenmesi," *İTÜ FBE*, 1995.
- [73] Y. Liu, Z. Li, Y. Yang, and J. Liu, "A novel on-line identification for Thevenin equivalent parameters of power system regarding persistent disturbance condition," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016-Septe, no. Ciced, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1109/CICED.2016.7575909.
- [74] S. J. S. Tsai and K. H. Wong, "Adaptive undervoltage load shedding relay design using Thevenin equivalent estimation," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596370.
- [75] Z. Yun, X. Cui, and K. Ma, "Online Thevenin Equivalent Parameter Identification Method of Large Power Grids Using LU Factorization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 4464–4475, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2920994.
- [76] H. Kong, M. Bahadornejad, and G. Ledwich, "System thevenin impedance estimation using signal processing on load bus data," vol. 1, no. November, pp. 274–279, 2003.
- [77] M. Bahadornejad, "System Thevenin impedance estimation through on-load tap changer action," *20th Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, no. 4, pp. 3–7, 2010.
- [78] Y. Sun, C. Dai, and J. Li, "Thevenin equivalent circuit parameter estimation for the PCC upstream system," *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. DRPT 2015*, pp. 2299–2303, 2016, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432634.

- [79] B. L. Eidson, D. L. Geiger, M. Halpin, and D. L. G. Ii, "Equivalent power system impedance estimation using voltage and current measurements," 2014 Clemson Univ. Power Syst. Conf., pp. 1–6, 2014, doi: 10.1109/PSC.2014.6808107.
- [80] M. N. Islam and W. Ongsakul, "Thevenin equivalent parameter tracking for on-line voltage stability assessment," Proc. 2015 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT ASIA 2015, 2016, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387027.
- [81] C. H. L. Jorgensen, J. G. Moller, S. Sommer, and H. Johannsson, "A Memory-Efficient Parallelizable Method for Computation of Thévenin Equivalents Used in Real-Time Stability Assessment," IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 4, pp. 2675–2684, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2900560.
- [82] K. Fung and K. Foo, "Real Time Voltage Stability Monitoring by Thevenin Impedance Estimation with Local Measurement," no. January, 2009.
- [83] J. A. V. Vásquez, A. R. R. Matavalam, and V. Ajjarapu, "Fast calculation of Thévenin equivalents for real-time steady state voltage stability estimation," NAPS 2016 - 48th North Am. Power Symp. Proc., 2016, doi: 10.1109/NAPS.2016.7747849.
- [84] W. Li, Y. Wang, and T. Chen, "Investigation on the Thevenin equivalent parameters for online estimation of maximum power transfer limits," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 4, no. 10, pp. 1180–1187, 2010, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0342.
- [85] P. P. Bedekar and A. S. Telang, "Load flow based voltage stability indices to analyze voltage stability and voltage security of the power system," NUICONE 2015 - 5th Nirma Univ. Int. Conf. Eng., pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/NUICONE.2015.7449638.
- [86] Y. Lee and S. Han, "Real-time voltage stability assessment method for the Korean power system based on estimation of Thévenin equivalent impedance," Appl. Sci., vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/app9081671.
- [87] P. Swaminathan Dr. K. Padmanabhan, Circuit Analysis. LAXMI PUBLICATIONS, 2006.
- [88] F. Hu, K. Sun, A. Del Rosso, E. Farantatos, and N. Bhatt, "Measurement-Based Real-Time Voltage Stability Monitoring for Load Areas," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 4, pp. 2787–2798, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2477080.
- [89] H. Yuan and F. Li, "A comparative study of measurement-based Thevenin equivalents identification methods," 2014 North Am. Power Symp. NAPS 2014, 2014, doi: 10.1109/NAPS.2014.6965369.

- [90] J. Esteban Tobón, J. M. Ramirez, and R. E. Correa Gutierrez, "Tracking the maximum power transfer and loadability limit from sensitivities-based impedance matching," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 355–363, 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2014.10.013.
- [91] A. Arancibia, C. A. Soriano-Rangel, F. Mancilla-David, R. Ortega, and K. Strunz, "Finite-time identification of the Thévenin equivalent parameters in power grids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 116, no. July 2019, p. 105534, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105534.
- [92] 2005 Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Etüd ve Raporlama Müdürlüğü, TEİAŞ, 79-Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri.
- [93] C. Kanzow, N. Yamashita, and M. Fukushima, "Levenberg-Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 172, no. 2, pp. 375–397, 2004, doi: 10.1016/j.cam.2004.02.013.
- [94] D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, Jun. 1963, doi: 10.1137/0111030.
- [95] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares," *Q. Appl. Math.*, vol. 2, no. 2, pp. 164–168, 1944, doi: 10.1090/qam/10666.
- [96] M. Turan, S. B. Demircioglu, and M. A. Yalcin, "Voltage stability evaluation by using maximum power transfer phasor diagram," *J. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 13, pp. 2809–2812, 2006, doi: 10.3923/jas.2006.2809.2812.
- [97] <https://electricgrids.engr.tamu.edu/electric-grid-test-cases/>, Erişim Tarihi: 21.01.2021.
- [98] Center for Intelligent Systems & Networks, "Dynamic IEEE Test Systems," <https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/index.php/dynamic-ieee-test-systems>, Erişim Tarihi: 30.07.2020.
- [99] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.
- [100] I. Smon, G. Verbic, and F. Gubina, "Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1267–1275, Aug. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876702.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Talha Enes Gümüş, 01.01.1985'de Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2003 yılında Adapazarı Ali Dilmen Lisesi'nden mezun oldu. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı, 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Şu anda Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.