

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

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI
SINIRLARININ YEREL BARA PARAMETRELERİ
KULLANILARAK GERÇEK ZAMANLI DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elk. Yük. Müh. Serdar Başar DEMİRCİOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜH.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN

Ekim 2006

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI
SINIRLARININ YEREL BARA PARAMETRELERİ
KULLANILARAK GERÇEK ZAMANLI DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elk. Yük. Müh. Serdar Başar DEMİRCİOĞLU

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

Bu tez 20/ 11/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK
Jüri Başkanı

Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN
Üye

Prof. Dr. Hüseyin EKİZ
Üye

Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU
Üye

Y.Doç. Dr. Ayşen Basa ARSOY
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanmasında, değerli bilgileri ve fikirleri ile katkı sağlayan, çalıőmalarımnda desteklerini esirgemeyen, her türlü yardımı gösteren, çok saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet Ali Yalçın' a teőekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın; sosyal, kültürel, ekonomik ve bilimsel her aşamasında, üstün görüő ve değerli fikirlerini aldığım, çalıőmalarımnda bana, destek, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, değerli arkadaőım ve hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Turan'a ve sevgili eői Ebru Turan'a sonsuz teşekkür ederim.

Serdar Başar DEMİRCİOğLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ

1.1. Giriş.....	1
1.2. Litertür Taraması	2
1.3. Tezin Amacı, Kapsamı ve Katkısı	6

BÖLÜM 2.

GERİLİM KARARLILIĞI PROBLEMİ

2.1. Giriş	9
2.2. Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması ve Tanımı	11
2.2.1. Gerilim kararlılığının tanımı	11
2.2.2. Gerilim kararlılığının sınıflandırılması	13
2.3. Gerilim Kararsızlığı Mekanizması	15
2.3.1. Elektriksel yükleri	16
2.3.2. Hattın güç iletim kapasitesi	20
2.3.3. Güç üretim kapasitesi	24
2.3.4. Gerilim kararsızlığını temel mekanizması	27

BÖLÜM 3.

GERİLİM KARARLILIĞI METOTLARININ İNCELEMESİ.

3.1. Güç Sistemi Dinamik Modeli ve Simülasyonu	32
3.2. Sürekli Hal Analizi	34
3.2.1. Yük akışı analizi	35
3.2.2. Devamlı yük akışı ve P-V/Q-V eğrileri	37
3.3. Gerilim Kararlılığı İndeksi	38
3.3.1. Jakobien matrisinin tekil değerleri ve özdeğerleri	39
3.3.2. Duyarlılık faktörü	41
3.3.3. Çoklu yük akışı çözümlerinin varlığı	43
3.3.4. Yük akışı fizibilitesi	43
3.3.5. Thevenin eşdeğer empedansı	45
3.3.6. Yük sınırı	46
3.3.7. Gerilim	46
3.3.8. Reaktif güç rezervi.....	47

BÖLÜM 4.

GÜÇ SİSTEMİ THEVENİN PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

4.1. Giriş	49
4.2. Thevenin Parametrelerinin Kestirimi İçin Önerilen Yöntem	50

BÖLÜM 5.

GERİLİM KARARLILIĞI SINIRLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Giriş	56
5.2. Maksimum Güç Transferi	56
5.3. Maksimum Güç Transferi Yaklaşımı ile Gerilim Kararsızlık Sınırının Benzetimle İncelenmesi	58
5.3.1. Kritik yük empedans ve admitansının değerlendirilmesi.....	58
5.3.2. Kritik güçlerin değerlendirilmesi	61
5.3.3. Değiştirilmiş P-V ve değiştirilmiş Q-V eğrileri	63
5.4. Maksimum Güç Transferi Fazör Diyagramı	64
5.5. Gerilim Kararlılığı Kritik Değerleri	70

5.6. Gerilim Kararlılığı Marjini	72
--	----

BÖLÜM 6.

SİMÜLASYON SONUÇLARI

6.1. Giriş	73
6.2. Dört Baralı Örnek Sistem	73
6.3. Beş Baralı Örnek Sistem	79

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR	84
----------------	----

BÖLÜM 8.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER	87
----------------------------	----

KAYNAKLAR.....	88
----------------	----

EKLER.....	94
------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	97
---------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

K	: Bara ismi
B	: Suseptance
E	: Thevenin gerilimi
G	: İletkenlik
I	: Akım
J	: Jakobien matrisi
L	: İndeks
P	: Aktif güç
R	: Direnç
S	: Kompleks güç
T	: Toparlama saman sabiti
V	: Gerilim
Y	: Bara admitans matrisi
Z	: Empedans
Q	: Reaktif güç
X	: Reaktans
VSM	: Gerilim kararlılığı marjini
AVR	: Otomatik gerilim regülatörü
OXL	: Aşırı tahrik sınırlayıcısı
SVC	: Reaktif güç kompanzatör
ULTC	: Yük altında kademe değiştirici
HVDC	: Yüksek gerilim doğru akım konvertörü
QSS	: Quasi Kararlı-Hal
SVS	: Statik reaktif güç kompanzasyon sistemi
VIPI	: Gerilim kararlılığı yakınlık indisi
LTC	: Yük altında kademe değiştirici

VSI : Gerilim kararlılığı indeksi
RLS : En küçük kareler tekniği
MSC : Anahtarlanmış kapasitörler

c : Sürekli dönem
cr : Kritik
d : Ayrık uzun dönem
i : Bara ismi
fd : Senkron generatör alan akım ifadesi
t : Geçici hal
sc : Kısa devre
sys : Sistem
lim : Limit
o : Referans değeri
pi : Aktif bileşen sabit akım
p : Aktif bileşen
pp : Aktif bileşen sabit güç
pz : Aktif bileşen sabit empedans
k : Bara ismi
loss : Kayıp
r : Alıcı uç
s : Kararlı hal, gönderici uç
Th : Thevenin
v : Ortogonal matris birim elamanın
q : Reaktif bileşen
u : Ortogonal matris birim elamanın
qi : Reaktif bileşen Sabit akım
qp : Reaktif bileşen sabit güç
qz : Reaktif bileşen sabit empedans
R : İndirgenmiş

c_r	: Kritik
\cdot	: Fazorel
$*$: Eşlenik
a	: Yük karakteristiği
b	: Yük karakteristiği
Φ	: İndirgenmiş Jakobien sağ öz vektör matrisi
Γ	: İndirgenmiş Jakobien sol öz vektör matrisi
\wedge	: Öz değerler kümesinin köşegen matrisi
σ	: Ortogonal matris birim elamanı
λ	: Özdeğer
δ	: Gerilim faz açısı
β	: Akımın kısa devre akımına göre açısı
ν	: Yardımcı fazorel diyagram açısı
ψ	: İç güç açısı
φ	: Güç açısı
α	: Thevenin empedans açısı
γ	: Yardımcı fazorel diyagram açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Güç sistem kararlılık problemlerinin sınıflandırılması	10
Şekil 2.2.	Gerilim kararlılığı olayı için zaman düzeneği	15
Şekil 2.3.	Basitleştirilmiş genel dinamik yük modelleri	18
Şekil 2.4.	Yük dinamiklerinin gösterimi	20
Şekil 2.5.	İki baralı bir güç sistem modeli	21
Şekil 2.6.	PQV nin üç boyutlu çizimi (Önden Görünüş)	22
Şekil 2.7.	PQV nin üç boyutlu çizimi (Yandan Görünüş)	23
Şekil 2.8.	Transfer edilebilen PQ gücü	23
Şekil 2.9.	Bir senkron generatörün kararlı hal eşdeğer devresi	25
Şekil 2.10.	Gerilim kararsızlığını göstermek için üç baralı bir güç sistemi	27
Şekil 2.11.	Basit bir güç sisteminin kararlı hal analiz sonuçları	29
Şekil 2.12.	Şekil 2.10'daki sistem için yük aktif gücünün (P) zamana göre değişimi	30
Şekil 2.13.	Şekil 2.10'daki sistem için yük geriliminin (V_r) zamana göre değişimi	30
Şekil 2.14.	Şekil 2.10'daki sistem için yük reaktif gücüne (Q) karşılık yük gerilimi (V_r) değişimi	31
Şekil 3.1.	Dört baralı bir güç sistemi	34
Şekil 3.2.	Şekil 2.5 de gösterilen iki baralı sistemde değişik güç faktörleri için çizilmiş P-V eğrileri	38
Şekil 3.3.	Thevenin eşdeğer devresi	45
Şekil 4.1.	N Baralı güç sisteminin Thevenin eşdeğeri	49
Şekil 4.2.	Fazör diyagramı	54
Şekil 5.1.	Güç sisteminin Thevenin eşdeğeri ile beslenmiş yük	56

Şekil 5.2.	Yük empedansı genliğinin, güç sisteminin Thevenin empedansı genliğine eşit olması durumu.....	59
Şekil 5.3.	Yük admitansı genliğinin, güç sisteminin Thevenin admitansı genliğine eşit olması durumunda, yükün iletkenlik ve suseptansının değişimi eşit olması durumunda, yükün direnç ve reaktansının değişimi	60
Şekil 5.4.	Kritik P ve Q lar ile çizilmiş P-Q düzlemi ve kararsızlık sınırları	62
Şekil 5.5.	Sürekli kritik görünür güç çekilmesi durumunda, kritik aktif güç ile kritik gerilim için çizilmiş, değiştirilmiş P-V eğrisi	63
Şekil 5.6.	Sürekli kritik görünür güç çekilmesi durumunda, kritik reaktif güç ile kritik gerilim için çizilmiş, değiştirilmiş Q-V eğrisi.....	64
Şekil 5.7.	Eşitlik 5.20'ye ilişkin akım fazörleri	66
Şekil 5.8.	Eşitlik 5.16'ya ilişkin gerilim fazörleri	67
Şekil 5.9.	Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramının elde edilmesi	68
Şekil 5.10.	Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramı	70
Şekil 6.1.	Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması	73
Şekil 6.2.	Dört baralı örnek sistemde yük akışı simülasyonunda gerilimin kararsızlığa girdiği an	74
Şekil 6.3.	Dört baralı örnek sistemde kestirilen Thevenin Eşdeğer devresi parametreleri	75
Şekil 6.4.	Dört baralı örnek sistemde kestirilen ve yük akışı ile bulunan yük açıları	77
Şekil 6.5.	Dört baralı örnek sisteme ilişkin kestirilen anlık V^{cr} ve ölçülen V'nin yüke göre değişimi	77
Şekil 6.6.	Dört baralı örnek sisteme ilişkin VSM_V gerilim kararlılık marjininin değişimi	78
Şekil 6.7.	IEEE Beş Baralı örnek sistemin tek hat şeması	79
Şekil 6.8.	Beş baralı örnek sistemde kestirilen Thevenin Eşdeğer devresi parametreleri	81

Şekil 6.9.	Beş baralı örnek sistemde kestirilen ve yük akışı ile bulunan yük açıları	82
Şekil 6.10.	Beş baralı örnek sisteme ilişkin kestirilen anlık V^{cr} ve ölçülen V 'nin yüke göre değişimi	82
Şekil 6.11.	Beş baralı örnek sisteme ilişkin VSM_V gerilim kararlılık marjininin değişimi	83
Şekil 7.1.	Şekil 5.10 Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramı	86
Şekil Ek1.1.	Ortak özellikler	94
Şekil Ek1.2.	Gelişmiş özellikler	95
Şekil Ek1.3.	DC Analiz özellikler	95
Şekil Ek1.4.	Genel özellikler	96

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Çeşitli yüklerin üstel değerleri	17
Tablo 2.2.	Genel yük modelleri için tipik parametre değerleri	19
Tablo 3.1.	Şekil 3.1' deki 4 Baralı örnek sistem için dinamik model denklemleri	34
Tablo 3.2.	Düşük gerilim aşırı yükü kaldırmak için kısa süreliğine elektrik kesilmesinin proje örnekleri	47
Tablo 6.1.	Dört baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri	74
Tablo 6.2.	Dört baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri..	74
Tablo 6.3.	Dört baralı örnek sisteme ilişkin simülasyon ve kestirim sonuçları	76
Tablo 6.4.	Beş baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri	80
Tablo 6.5.	Beş baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri ...	80
Tablo 6.6.	Beş baralı örnek sisteme ilişkin simülasyon ve kestirim sonuçları	81

ÖZET

Anahtar kelimeler: Güç sistemleri, Gerilim Kararlılığı, Kararlılık sınırları

Modern güç sistemleri ileri seviyede planlanmış, çok değişkenli, dinamik sistemlerdir. Genel olarak, sistem parametrelerindeki bozulmalar, sistem elemanlarının farklı karakteristiklerde olmasında kaynaklanmaktadır. Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden geri kazanmak ve dengeli bir duruma gelebilmesi ile ilgilidir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı incelemeleri 80'li yıllardan itibaren artan bir ilgi çekmiştir. Çalışmalar gerek sistemlerin planlanma aşamasında, gerek evvelce yapılmış sistemlerin sınır değerlerinin belirlenmesi ve gerekse kararlı halde çalışan sistemlerin gerçek zamanlı değerlendirilmesini hedeflemektedir. Karmaşık güç sistemleri beklenmedik yüklenme durumlarında gerilim kararsızlık sınırına gelebilmektedir. Bu nedenle, büyük sistemlerin işletilmesinde kombinasyonel olayların gerilim kararlılığı anlamında yapabileceği etkilerin anlık olarak değerlendirilmesi, oluşabilecek bir gerilim çökmesi olayını engelleyebilecektir.

Güç sistemlerinde gerçek zamanlı gerilim kararlılığı incelemesi yapmak için, ilgilenilen bara arkasındaki sisteme ait parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu konuda çok çeşitli çalışmalar olmakla beraber, gerçek zamanlı ölçümlerin yapılıp birleştirilmesi ve algoritma karışıklığının getirdiği işlem yükü yönü ile gerçeklemede sıkıntılar bulunmaktadır. Zira her baradan fazörel ölçümler alıp bunları hızlı bir şekilde değerlendirme barasına aktarmak ve çok sayıda baradan gelen bilgileri gerçek zamanlı işlemede zorluk bulunmaktadır. Güç sistemlerinde, gerilim çökmesi ile sonuçlanan son olaylar, uygulanabilir gerçek zamanlı gerilim kararlılığı değerlendirme tekniklerinin ihtiyacını doğurmuştur.

Bu tezde, ilgilenilen yerel bara arkasındaki güç sisteminin Thevenin eşdeğeri bir modelin bulunduğu kabulü ile, yerel bara parametrelerini kullanarak, eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesine ilişkin bir dizi yöntem elde edilmiştir. Oluşturulan maksimum güç fazör diyagramından, gerilim kararlılığının kolayca değerlendirilmesini sağlayacak kritik değer eşitlikleri elde edilmiştir. Gerçek zamanlı değerlendirmeler için gerilim kararlılığı sınırlarına ilişkin marjinler tanımlanmış ve elde edilen yaklaşımlar yük akışı yöntemlerinin de uygulandığı örnekler ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen değerlendirme yaklaşımının, gerçek zamanlı uygulamalarda klasik yük akışı algoritmalarının kullanıldığı durumlara göre daha pratik ve yeterince doğru kaldığını göstermiştir.

REAL TIME EVALUATION OF VOLTAGE STABILITY LIMITS IN POWER SYSTEMS BY USING LOCAL BUS PARAMETRES

SUMMARY

Keywords: Power systems, Voltage Stability, Stability limits

Modern power systems are high-order, multivariable, dynamic systems whose responses to disturbances depend on the different characteristics of a wide array of devices. Power system stability generally refers to the capability of a power system to remain in a state of operation equilibrium under normal operation conditions and to regain an acceptable state of equilibrium after being subjected to disturbances.

Beginning from 80's, voltage stability researches in power systems have an increasingly interest. The studies targets the real time evaluation of operating systems whether at the system planning stage or determination of limits of a planned system or at steady state loading conditions. The complex power systems can reach voltage instability limit at unexpected loading conditions. For this reason, the possibility of voltage collapse event occurrence in operating huge systems can be prevented by momentary evaluation of the combinational events effects in meaning of voltage stability.

For real time voltage stability evaluation in power systems, the system's parameters behind the concerned bus must be known. In addition to various studies are present, those studies have difficulties in realization from the point of view in making and combining real time measurements and in yield of calculation of algorithm confusions. Because there is a difficulty in capturing phasor measurement from every buses and sending them to evaluation bus and also in real time operating of the data coming from many different buses. The recent events resulted with voltage collapse in power systems, bring about the requirement of feasible real time voltage stability evaluation techniques.

In this dissertation, series of methods relating to the estimation of equivalence circuit with the acceptance of the existence of a power system Thevenin equivalence model behind the corresponding local bus are obtained. The critical value equalities which provide easiness in evaluation of voltage stability are obtained from the maximum power phasor diagram. The margins relating to voltage stability limits are defined for real time evaluation and the obtained approaches are compared with the sample cases in which the load flow method is also used. The simulation results indicates that the proposed evaluation approach, is more practical and true in respect to the situation in which the classical load flow algorithm at real time applications is used.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Elektrik enerjisi, günümüzde en yaygın olarak kullanılan, çok değerli fakat bir o kadar da pahalı bir enerji türüdür. Enerji güç sistem planlayıcıları, minimum maliyet, sarfiyat ve tasarruf için her türlü araştırma ve geliştirmeyi yapmak zorundadır.

Enerji güç sistemleri, sürekli değişen ortamlarda çalışan lineer olmayan sistemlerdir. Yükler, genaratör çıkışları ve sistem parametreleri sürekli değişir. Son yıllarda, ekonomik ve çevresel şartlar, güç sistemlerinin en verimli işletim şartlarında ve işletme sınırlarına yakın noktalarda çalışmayı mecbur kılmıştır. Buna bağlı olarak da; lineer olmayan, zamanla değişen ve dinamik bir olgu olan gerilim kararlılığı analizi, güç sistemlerinin işletiminde önemli bir kriterdir.

Bir güç sisteminin, en verimli, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden geri kazanmak ve dengeli bir duruma gelebilmesi için, sistemin gerilim kararlılığının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekir.

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin yük talebi ile üretilen ve yük merkezine iletilen güç arasındaki dengenin korunması yeteneğidir. Var olan gerilim kararlılığı metotları ve ilgili kararlılık incelemeleri; dinamik simülasyonlar, sürekli hal durum analizi ve gerilim kararlılığı indeks ya da marjinleri olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir. Güç sistem gerilim kararlılığına; yük talebi, iletim şebekesinin kapasitesi ve güç üretim kapasitesi olmak üzere, üç faktör etki eder. Gerilim kararlılığı analizinin yapılabilmesi için, gerilim kararlılığı metotlarının incelenip, gerilim kararlılığına etki eden faktörlerin eksiksiz ele alınması gerekir.

Bu tezde gerilim kararlılığı konusunun, metotları, etkileyen faktörleri ve uygulamaları ele alınmıştır. Gerilim kararlılığının sınıflandırılması ve tanımı, gerilim kararlılığı metotlarının literatür incelemesi yapılmıştır. Literatürde kullanılanlardan farklı olarak, gerilim kararlılığının sınırlarının yerel parametreler kullanılarak gerçek zamanlı değerlendirilmesi, yeni bir yöntem olarak sunulmuştur

1.2. Literatür Taraması

Bu bölümde enerji sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde önemli bir yer tutan gerilim kararlılığı incelemelerinin, en yaygın olarak kullanılan ve literatürde önemli bir yere sahip çalışmaları ele alınmıştır.

Enerji güç sistemlerinde, gerilim kararlılığı incelemesi için, sistemin dinamik modeli ve simülasyonu yapılması gerekmektedir. Bir güç sistemi; diferansiyel, ayrık ve cebirsel olarak modellenen olabilir [1]. Sisteme ait çeşitli değişkenlere bağımlı fonksiyonel eşitlikler tanımlanarak, sistemin uzun-dönem sürekli dinamikleri, termostatik yük toparlanması ve generatör voltaj regülatörü davranışı belirlenmektedir. Benzer şekilde güç sistemi kısa-dönem sistem dinamiklerinin belirlenmesinde, generatör, indüksiyon motorları ve HVDC bileşenleri etkili olur. Güç sistemi uzun-dönem ayrık dinamiklerinin modellenmesinde ise LTC (yük kademe değişimleri), şönt kapasitör/ reaktör anahtarlama ve aşırı uyarma sınırlayıcıları belirleyici rol oynar. Ele alınacak enerji güç sisteminde, bulunan dinamikler ve bunlara bağlı parametreler, bir araya toplanarak elde edilen fonksiyonel denklemler kümesi, sistemin dengesini temsil eder. Uygun sadeleştirmeler ve varsayımlar ile, günümüze kadar birikmiş bilgilere dayanarak oldukça ayrıntılı ve yeterli doğrulukta bir güç sistemi modeli elde edilebilir. Gerçek bir güç sistemi modeli için yüzlerce veya binlerce düğüm ile gerekli çok sayıda eşitlik gösterildiği durumlarda ise Quasi Sürekli Hal (QSS) yaklaşımı [1,2] sayesinde kısa-dönem kararlı ve bu kısa-dönem diferansiyel eşitliklerin yerini alan, daha az cebirsel eşitlik ile varsayılan güç sisteminde denklemlerin sayısı düşürülebilir. Çeşitli dinamik simülasyon yöntemleri ile güç sisteminde olay sıralarının zaman ayarı tekrar oluşturulabilir ve sistemin kararlı olup olmadığının tanımlanması yapılabilmektedir. Gerilim kararlılığı analizi için yapılan dinamik simülasyon, çevrimiçi uygulamalarına uygun değildir. Çünkü; yüksek

hesaplama gerektirir, çeşitli analitik tekniklerin bulunması için önemli araştırmalara bağlı kalmıştır, güç sistemi sürekli hal modelini temel alan gerilim kararlılığının güvenilirliğini tahmin etmesi için gerilim kararlılığı indeksi (VSI) içermektedir.

Gerilim kararlılığı incelemesi için, en yaygın olarak kullanılan yöntem yük akışı analizi yöntemidir. Yük akışı problemini çözmek için ise en genel ve güvenilir algoritma, Newton-Raphson metodudur [3,4]. Bu yöntemde, yük akışı probleminin temel ilkesi, lineer olmayan eşitlikler ile verilen sistem yükleri kullanılarak, generatörler ve güç sistemi kurulumu ile bara gerilimlerini çözmektir. Lineer olmayan eşitliklerin Taylor açılımındaki ilk terimi kullanılarak, eşitliği uyumsuz doğrusallaştıran, iteratif bir çözümün içerir. Uyumsuz eşitliklerin türevleri düzenlenerek, Jakobien Matrisi olarak adlandırılan, matris boyutuna getirilir. Geleneksel yük akışı algoritmaları için, yük akışındaki yük noktaları ayrılır ve maksimum yük noktası gibi sistemin tekil olan Jakobien matrisi dikkate alınır. Yük akışı metodu koruma-düzeltilme projesine dayanır ve maksimum yüklenme noktasında tekil olmayan artırılmış jakobien matrisi için bir ilave eşitlik üretilir. Belirli yük barasının maksimum yüklenme noktası, başlangıçtaki akım işlemsel noktası ile hesaplanabilir. Yükte ufak bir artma miktarı ile belirli yük örneği (ör. Sabit güç faktörü) varsayımı yapar ve maksimum yük akışı noktasına ulaşana kadar yeniden hesaplar. Yük akışı metodu maksimum yüklenme noktasının hesaplanmasında oldukça kolaylık sağlar ve bütün P-V ve Q-V eğrileri çizilir. P-V ve Q-V eğrileri planlama ve analizler için genellikle yardımcı olarak kullanılır. Fakat bu eğriler yalnızca yük baraları içindir; yani, önem verilen her bir bağımsız bara ile kararlılık karakteristikleri oluşturulur ki, bu da sistem çalışması esnasında, gerçek güç için örnek oluşturmaz. Aynı zamanda, artan yük modellerini gerilimin zorlanma koşulları altında tahmin etmek zordur. Çoğunlukla bu eğriler hesaplandığında tahmin edilebilir. Bu yüzden, hemen hemen bütün yük akışı tabanlı gerilim kararlılığı metotları ve ilgili gerilim kararlılığı indeksleri yaklaşıma dayalıdır. Bu durum, yük talebi esnasında, sistemin maksimum yüklenme noktasının, sistemin dengeli gerilim sınır noktasına ulaşması anlamına gelmektedir.

Normal şartlar altında yük akışı eşitliklerinin mümkün olan iki çözümü olduğunu ve bunlardan biri güç sisteminin doğru işlemsel noktasına ilişkin çözümü verdiğini, ön

plana çıkartılmıştır [12]. Var olan çözümlerin sayısı 2 den 1 e dönüştürebildiğinden, sistem işletim noktası yaklaşımların kararlı sınır noktasında yalnızca bir çözüm ortaya koyulabilir. P-V/Q-V eğrileri bu olayları göstermek için kullanılabilir.

Tamura, bir gerilim kararlılığı yakınlık indisi (VIPI) hesaplamak için çift yük akışı çözümü kullanmıştır [13]. Gerilim kararlılığı indekslerine bağlı olan çoklu çözüm yönteminin başlıca engeli, alçak gerilim çözümlerinin hesaplanması ve sınır değerinde kararlılık noktası için yük akışı ıraksamasından kaçınmasıdır. Alçak gerilim çözümleri hesaplanmasında gelişmiş çeşitli metotlar önerilmesine rağmen, hala zorluklar vardır. Ayrıca, çevrimiçi uygulamalar için bu indisleri hesaplama talebi oldukça çoktur.

Güç sistemi sürekli hal yükünün, sistem maksimum yüklenme noktasına ulaştığında, yük akışının Jakobien matrisiyle ilişkili, tekil olan eşitliğinin uyumsuz olduğunu ve bundan dolayı, klasik Newton-Raphson tabanlı yük akışı algoritmaları yakınsamasının zorluğuna dikkat çekilmektedir [7,8]. Matrisin ana köşegen değerleri negatif olmayan tekil değerlerdir. Eğer minimum tekil değer sıfırsa, matris tekildir. Jakobien matrisinin en küçük tekil değeri, Jakobien matrisinin tekilleşmeye ne kadar yakın olduğunu saptamakta güvenli bir indeks olarak kullanılabilir. Sonuç olarak, tekilleşmeye ne kadar yakın olduğunu saptamak, sistemde gerilim kararsızlığı oluşma marjini belirlemektedir. Bu metot ilk olarak Thomas ve Tiranuchi tarafından ortaya konuldu [9,10]. SVD nin hesaplama hızı, bu metoda bağlı olarak arttı. Löff [11], Jakobien matrisinin seyrekliğini koruyarak minimum tekil değer hesaplaması için en hızlı algoritmayı geliştirdi.

Gerilim kararlılığının incelenmesinde, bir başka yöntem olarak da, bir gerilim kararlılığı indeksi, “L” göstergesi adı altında tanımlanmıştır. [14]. “L” göstergesinin hesabı, genel sistem eşitliklerine dayanır. Burada baralar, generatör barası ve generatör olmayan bara olmak üzere, iki kategoride sınıflandırılmıştır. “L” gösterge değişimleri, 0 (sistem yüksüz) ve 1 (gerilim çökmeleri) aralığındadır. Sisteme ait bara admittans matrisinin ihmal edilen gerçek kısmı tarafından basitleştirilmiş “L” göstergesi de ayrıca sunulmuştur [15] ve gerilim çökmelerini önlemek amacıyla belirli bölgelerde kısa süre elektriği kesmek için “L” göstergesi uygulamaları

gösterilmiştir.

Duyarlılık faktörleri, enerji güç sistem planlaması yapılırken, sistem planlayıcıları tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır[6]. Çünkü gerilim kararlılığı indisleri, verimlilik hesabı ve onların basitliğinden dolayı gerilim kararsızlığını saptar. Q-V duyarlılık faktörünün işareti değişebilir. Bu gerilim koşulunun “kararsız” olduğunu gösterir, minimum özdeğer sıfıra yakın olarak alınır ve işareti değişir. Her bir yük terminalinin P-V ve /veya Q-V eğrilerinden, eğrilerin çıkıntılarının üst kısmı boyunca P-V ve Q-V duyarlılık artışı gözlemlenebilir ve teorik olarak ulaşılan çıkıntı noktasındaki sonsuzluk, sınır kararlılık noktasıdır. Kararlılık noktası, statik gerilim analizi tarafından çatallaşma düğümü için sıkça hesaplanıp, kontrol altında tutulur. Duyarlılık faktörü temel indislerini hesaplamak daha kolaydır. Bu metot koruma rölelerinde iyileştirici etkileri başlatmayı otomatik olarak gerçekleştirebilir, örneğin yük akıtmak ve kapasitör bankası anahtarlaması, alandaki gerilim kararsızlığını azaltmak, gibi durumlar, indisler tarafından belirlenebilir.

Bir başka gerilim kararlılığı incelemesinde, yük merkezinin arkasındaki Thevenin eşdeğer empedansı büyüklüğünün, yük eşdeğer empedansının büyüklüğüne olan oranına dayanan, gerilim kararlılığı indeksi oluşturulmuştur [16,17]. Birçok sayıda generatör, iletim hattı ve yükten oluşam bir enerji iletim hattunun, Thevenin eşdeğer formunda modellenebileceği, çok iyi bilinen bir gerçektir. Bu sistem, maksimum güç transferinin olduğu andaki thevenin empedansının, yük empedansına eşit olduğunu ve buna bağlı olarak, sistem parametrelerinin, çeşitli ölçüm ve hesaplamalar yapılarak belirlenmesine dayanır. Thevenin eşdeğer empedansı hesabı için tekrarlanan en küçük kareler tekniği (RLS) içeren metotlar önerilir, fakat hala doğruluk ve hız açısından geliştirilmeye gereksinim vardır [17].

Gerilim kararlılığı incelemelerine konu olan yük sınırı, yük enjeksiyon değişikliklerinin minimum Euclidean mesafesi içinde yüklenebilme sınırındaki nokta olarak tanımlanmıştır [18,19]. Tanımlanan maksimum yük artma miktarı ile yük sınırı bulmak için sırasıyla, amaç fonksiyonu, yük akışı eşitlikleri, generatör reaktif sınırları eşitliği ve eşitsizlik kısıtlamaları gibi optimizasyon metotları önerilmiştir. Lineer olmayan eşitliklerin çözümü gibi gerilim çökme (eğer-düğüm çatallaşmaları)

noktalarını doğrudan hesaplayan metot, Çökme Noktası olarak adlandırılır. Bulunan Jakobien matrisi sıfırdır ve bunun sağ ya da sol özvektörü sıfır olmayan vektördür. Yük sınır metodunun çok ciddi bir dezavantajı yüksek hesaplama maliyetidir. Buna ilave olarak, yük artışı yönünün, sıkça elde etmek kolay olmayan yük sınır hesabı için varsayımlar gerektirmesidir.

Gerilim kararlılığının belirlenmesinde, gerilimin, en basit uygulanabilir yöntem olduğudur ileri sürülmektedir [20,21]. Sistem gerilimi; enerji işletmecileri tarafından, gerilim çökmesini önlemek için düşük gerilimde aşırı yükleri kaldırmak için elektriği kesme gibi iyileştirici etkileri başlatmak için bir indeks olarak yaygınca kullanılır. Çeşitli gerilim tabanlı enerji dağıtım istasyonlarındaki aşırı yükü kaldırmak için belirli bölgelerde kısa süre elektriği kesme projeleri, düşük gerilim sabit zaman gecikmesi ve düşük gerilim yük kesilmesinde ters zaman gecikmesi içerir bu da dijital röleler tarafından kolayca halledilir, bu röleler fazla ek bir maliyeti olmadan sahada kurulur. Ancak gerekli kontrol ve uygulama düzenleri kurulsa bile, önceden seçilen düşük gerilimine dayalı aşırı yükü kaldırmak için kısa süreliğine elektriğin kesilmesi, optimal gerilim kararsızlığını hafifletme için kesin çözüm değildir.

Gerilim kararlılığı uygulamaları için, gerilim güvenlik değerlerinin göstergeleri ile birlikte, güç sistemlerinde yedek reaktif güç ve reaktif güç tüketiminin çevrimiçi kontrolü önerilir [22-24]. Güç sisteminin, yüksek reaktif güç çıktıları ve düşük yedek reaktif gücüne ilişkin emniyetsiz gerilimin, hassas göstergeleri vardır. Güç sistemi gerilim çökmesi çoğunlukla, generatörler ve SVC ler gibi bazı reaktif güç kaynaklı aygıtlarının, kapasite limitlerine ulaşmasıyla olur. Yedek reaktif güç seviyesi tespiti yapılarak, gerilim çökmesini önlemek için, uygun seviyenin eşik değerini belirlemek zordur. Çünkü sistem çalışma koşullarında mümkün olan risklere bağlı olarak SVC ler ve generatörlerin, yedek reaktif gücü gereklidir.

1.3. Tezin Amacı, Kapsamı ve Katkısı

Gerilim kararsızlığına neden olan başlıca etmenler; doğrusal olmayan yükler ve bu yüklerin talep ettiği güçlerin güç sistemi tarafından tedarik edilememesidir [16]. Dolayısı ile, gerilim kararsızlığı sınırının araştırıldığı baraya (örneğin k. bara)

transfer edilebilecek maksimum güç değeri, inceleme yapılan baradaki gerilim kararsızlık noktasını belirleyecektir. Bu maksimum güç transfer noktası, Bölüm 2-3'de bahsedilen çeşitli gerilim kararlılığı inceleme yöntemlerindeki nokta ile aynıdır. Diğer bir deyişle, maksimum güç transfer anı, Jacobian matrisin tekil olduğu yada klasik P-V, Q-V eğrilerinin çatallaştığı dirsek noktasına karşılık gelmektedir.

Çok baralı bir güç sistemi, tek kapılı bir devre olan Thevenin eşdeğer devresi ile sembolize edilebilmektedir. Çeşitli çalışmalarda bu yöntem izlenmiştir. Bu yaklaşımda N baralı güç sistemi bir Thevenin kaynağı ve ona seri bir Thevenin Empedansı ile sembolize edilmektedir

Son zamanlarda, araştırmacılar güç sistemlerinin Thevenin eşdeğerinin bulunması için çeşitli yöntemler önermişlerdir. Bunlardan sadece yerel bara parametrelerinin kullanımı ile Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin bulunmasına yönelik olanlar kullanım kolaylığı nedeniyle çekici olmaktadır [47]. Bu yaklaşımlar test edildiğinde oluşturulan denklem takımlarının parametrelere karşı aşırı duyarlılığı ve endüktif yüklü gerçek çalışma şartlarında hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışmada, güç blançosu üzerinden gidilerek oluşturulan kestirim denklemleri kullanılmış ve güç sistemlerinde yaygın çalışılan endüktif çalışma şartlarında daha doğru kestirimler yapılmıştır

Diğer referanslarda kullanılan yöntemlerde oluşan hataları ve işlem yoğunluğunu azaltmak amacıyla yapılan bu çalışmada, yerel bara parametreleri kullanılarak, kestirim yöntemiyle gerçek zamanlı olarak Thevenin eş değeri devresi oluşturularak, gerilim kararlılığı sınırları daha kolay değerlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım ile k. bara gerisinde kalan baralardaki yük değişimleri, açma-kapama olayları, generatör sınır değerlerinden kaynaklanan yetmezliklerin tamamının k. baradaki gerilim kararlılığına etkileri, sadece k. baradaki yerel ölçümler ile belirlenmektedir.

Bir sisteme ait Thevenin eşdeğer devresinin belirlenmesi, o sistemden çekilebilecek güç sınırları hakkında kesin bilgi sağlayacaktır. Zira yaygın bilinen maksimum güç

transferi ilkelerinin, bu basit eşdeğer devre üzerinde değerlendirilmesi oldukça kolaydır.

Gerilim Kararlılığı sınırlarının daha doğru parametreler kullanılarak elde edilmesi, sistemin istenilen limitlerde çalıştırılabilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda elde edilen parametreler kullanılarak, gerilim kararlılığı için $(VSM)_V$ marjini oluşturulmuştur. Oluşturulan bu marjin sistemin yüklenebilme kapasitesini ve gerilim kararsızlık sınırına yakınlığını ortaya koymaktadır.

Yukarıda belirtilen hedefe varabilmek için, Bölüm 2’de gerilim kararlılığı problemleri tanımlanmış, Bölüm 3’te gerilim kararlılığı incelemelerinde kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu genel bakıştan sonra, Bölüm 4’ten itibaren tezin özgün çalışmaları verilmiş olup, Bölüm 4’te gerilim kararlılığı incelemesi yapılan bara arkasında kalan güç sistemine ilişkin Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirimine ilişkin bir yöntem geliştirilmiş, Bölüm 5’te kestirilen Thevenin eşdeğer devre parametreleri ile gerilim kararlılığı sınırlarının belirlenmesi için özel bir maksimum güç transfer fazör diyagramı oluşturulup, kararsızlığa neden olacak parametrelerin kritik değerleri elde edilmiş ve değerlendirmeye kolay bakış sağlayacak bir gerilim kararlılığı marjini tanımlanmıştır. Bölüm 4 ve 5’te önerilen yaklaşımların tutarlılığı, Bölüm 6’da verilen simülasyon çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak doğrulanmıştır. Simülasyonlar, önerilen değerlendirme yönteminin, klasik yük akış yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok küçük bir hata payı ile benzer sonuçların alındığını göstermiştir.

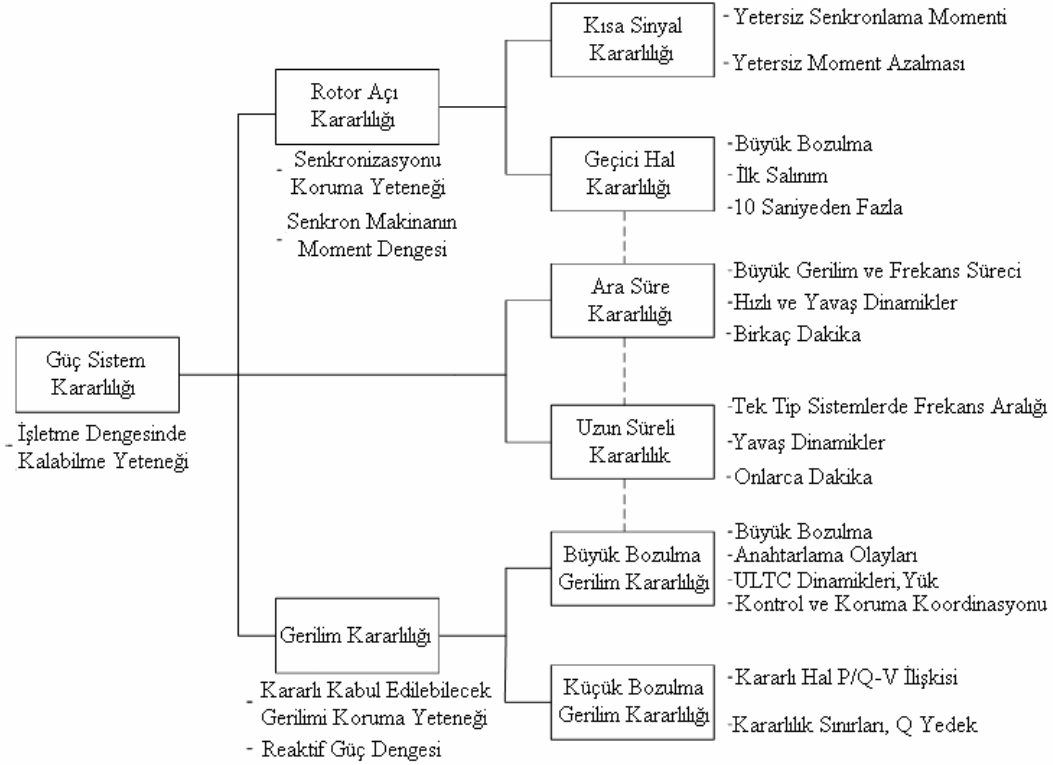
Bu çalışma, elde edilen maksimum güç transfer fazör diyagramı ile gerilim kararlılığı analizine yeni bir bakış getirmektedir. Evvelce önerilmiş kestirim algoritmalarına oranla bu tezde önerilen kestirim yöntemi, az sayıda ve sadece yerel bara parametrelerinin yeterli olduğu ve kestirim sonucunun gerçek çalışma şartlarındaki parametre değerlerine olan duyarlılığın küçük olması yönüyle diğer çalışmalardan farklılık arz etmektedir. Geliştirilen değerlendirme yöntemi, diğer çalışmalardan çok daha küçük bilgi işlem yükü ve ölçme düzeneği gerektirmektedir.

BÖLÜM 2. GERİLİM KARARLILIĞI PROBLEMİ

2.1. Giriş

Modern güç sistemleri ileri seviyede planlanmış, çok değişkenli, dinamik sistemlerdir. Genel olarak, sistem parametrelerindeki bozulmalar, sistem elemanlarının farklı karakteristiklerde olmasından kaynaklanmaktadır. Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden geri kazanmak ve dengeli bir duruma gelebilmesi ile ilgilidir [25,26]. Şekil 2.1 güç sistem kararlılık problemlerini ayrıntılı olarak göstermektedir. Bu problemler, sistem değişkenlerinin yapısı, kararlılığı değerlendirmek için gerekli olan süre, gibi kategorilere ayrılabilir.

Rotor açığı kararlılık problemi, güç sisteminin bozulmaya maruz kaldıktan sonra senkronizasyonda kalmak yeteneğini ve güç sistemlerindeki dâhili elektromekaniksel dalgalanmanın çalışmasını içermektedir. Bozulmanın büyüklüğüne ve içeriğine bağlı olarak, rotor açığı kararlılığı genellikle, küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı olmak üzere, iki sınıfta kategorize edilebilir. Küçük işaret kararlılığı, güç sistemlerinin küçük bozulmalar altında generatörün senkronizasyonunu koruyabilme yeteneği ile ilgilidir. Örnek olarak, yük ve üretimdeki küçük değişiklikler gösterilebilir. Geçici hal kararlılığı ise, güç sistemlerinin büyük geçici bozulmalardan sonraki senkronizasyonunun korunma yeteneği ile ilgilidir. Örnek olarak, iletim hatlarındaki hatalar ve generatör birimindeki salınımlar sıralanabilir[25].



Şekil 2.1 Güç sistem kararlılık problemlerinin sınıflandırılması [25]

Rotor açılı kararlılığı, enterkonnekte güç sistemlerinin oluşmasından itibaren, güç sisteminin kararlı çalışabilmesinin temel noktasını meydana getirmiştir. Sonuç olarak, hızlı çalışan akım kesicileri, hızlı generatör kontrol sistemleri ve değişik özel güç sistem kararlılık kontrolörleri gibi değişik teknolojiler ile bu durum oldukça hafifletilmiştir [25]. Bununla beraber, zorlanmış şartlar altındaki güç sistemleri daha değişik kararsız davranışlar gösterebilirler. Bunlar, generatörler arasında senkronizasyon kaybı olmadan artarak devam eden gerilim çökmesi ve belirli alanlarda gerilimin düşmesi olarak gruplandırılabilirler. Bu olay gerilim çökmesi ile ilgilidir. Generatörler veya iletim hatlarının kayıpları ve yük artışı gerilim çökmesinin nedenlerindedir. Şekil 2.1’de gösterilen bütün kararsızlık olayları güç sisteminin çökmesi sırasında tamamen ayrılmış olmayabilir. Bazı güç sistem elektrik kesintisi olayları, kararsızlık olayının farklı basamaklarında, sistem çökmesi olarak geliştiğini gösterir. Genel örnekleri ile güç sistem elektrik kesintilerinin önemli analizleri aşağıda verilmiştir.

- a) Çoğu olaylar, güç sistemi aşırı yüklü olduğunda meydana gelmektedir.
- b) İletim hatları veya generatörlerdeki açmaların, güç sistemini daha da zayıflattığı görülmüştür .
- c) Güç sistemlerinde salınımlar başladığında, sistem frekansı normal çalışma frekansından farklı değerlerde çalışmakta ve gerilim bozulmaya başlamaktadır.
- d) Daha fazla generatör ve iletim hattı problemi yaşandığı durumlarda, sistem küçük parçalara bölünebilmektedir.

2.2. Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması ve Tanımı

2.2.1. Gerilim kararlılığının tanımı

Gerilim kararsızlığı, sistemde meydana gelen olayların geniş bir kısmını içerirken; gerilim kararlılığı için ise değişik fikirler mevcuttur. Güç üretiminde azalma, talep edilen yükte artma veya generatör, iletim hattı, transformatör vb. cihazların elektriğinin kesilmesi gibi bozulmalardan dolayı gerilim kontrol edilemediğinden güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı meydana gelmektedir. Aşağıda literatürde mevcut olan birkaç gerilim kararlılığı tanımlamaları verilmiştir. Gerilim kararsızlığı süresince meydana gelen olayların çok geniş bir alanda incelenmesinden dolayı değişik tanımlamalar belirtilmiştir.

a) CIGRE Tanımı [27]

1-Verilen çalışma durumundaki bir güç sisteminde, eğer yük yakınındaki gerilimler herhangi bir küçük bozulmadan önceki değerlere eşit yada yakın ise bu sistem küçük bozulmalara karşı gerilim kararlıdır.

2-Eğer gerilim yaklaşık olarak sonraki bozulma dengesi değerine yakınsa, verilen çalışma düzeninde ve verilen bir bozulmaya bağlı olarak, güç sistemindeki gerilim kararlıdır.

3-Eğer sonraki gerilim bozulmaları kabul edilebilir sınırların altında ise, güç sistemi gerilim çökmesi ile karşılaşılmamaktadır.

b) IEEE Tanımları [28]

1)Gerilim kararlılığı bir sistemin gerilimini koruyabilme yeteneğidir. Yük admitansı yükseldiği zaman, yük gücü de artacak ve böylece hem yük hem de gerilim kontrol edilebilecektir.

2)Gerilim çökmesi bir süreçtir ve gerilim kararsızlığı sistemin önemli bir parçası olan gerilimin azalmasına yol açmaktadır.

3)Gerilimin güvenliği, sistemin kararlı çalışmasına bağlı olmakla beraber, aynı zamanda sistem değişimlerine karşı veya kaynağı belli olmayan bozucu olaylarda kararlı kalabilme yeteneğidir.

4)Bir sistemde; bozulmalar, yükteki artışlardan veya sistem değişmelerinden kaynaklanan hızlı gerilim düşümleri, operatör veya otomatik sistem kontrolörü tarafından engellenemezse gerilim kararsızlığına gider. Gerilim zayıflaması birkaç saniyeden onlarca dakikaya kadar sürebilir. Eğer zayıflama devam ederse, kararlı hal açısı kararsız hale gelir veya gerilim çökmesi meydana gelmektedir.

c) IEEE/CIGRE Ortak Tanımlamaları [26]

1-Gerilim kararlılığı, bir güç iletim sisteminin, verilen bir önceki işletme durumundan farklı bir durumda bozulmaya maruz kaldığında, bütün baralarda kararlı gerilimi koruyabilme yeteneğidir.

2-Gerilim çökmesi, güç sistemlerinin işletim kriterlerinin belirlenmesinde önemli bir rolü olan gerilim kararsızlığı, aşırı gerilim düşümü veya kesintilere sebep olan olayların, oluşturmuş olduğu bir süreçtir.

CIGRE tanımı diğer dinamik sistem kararlılık problemlerine benzemektedir. IEEE tanımı daha çok, güç sistem şebekesinin gerçek işletme sürecini vurgulamaktadır. Bu tanımlamalar arasındaki ortak noktalar aşağıda verilmiştir.

Gerilim kararlılığı dinamik bir olaydır. Sistemin gerilimi kabul edilebilir bir seviyede kontrol edildiğinden, güç sistemi sistem bozulmalarından kurtulabilir. Gerilim çökmesi veya gerilim kararsızlığı birbirinin yerini tutabilir ve her ikisinde gerilim kararlılığının azalmasıyla ilgilidir.

2.2.2. Gerilim kararlılığının sınıflandırılması

Gerilim kararlılığı, aslında güç sistemin, geniş bir alan içinde, ne kadar küçük veya büyük olduğu önemli olmayan bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra, sistem değişkenlerini kabul edilebilir bir dengede sürdürebilme yeteneğidir. Bozulmanın büyüklüğü kararlılık tahminine ve analiz metoduna etki eder. Gerilim kararlılığı, bozulmanın büyüklüğüne bağlı olarak aşağıda tanımlanan iki kategoride sınıflandırılabilir [26,27].

a) Büyük bozulmalı gerilim kararlılığı, sistem hatası, üretim kaybı veya hat salınımları gibi büyük bozulmalarda, kabul edilebilir gerilim dengesini koruyan güç sisteminin yeteneği ile ilgilidir. Kesintili ve kesintisiz kontrol ve koruma cihazları arasındaki etkileşimi kapsayan güç sisteminin lineer olmayan cevabı, büyük bozulmalı gerilim kararlılığını belirlemek için incelemeyi gerektirir. Sistemde oluşan büyük bozulmalar altında çalışan cihazın, bu şart altında çalışma periyodunun süresi bir kaç saniyeden onlarca dakikaya kadar varabilir.

b) Küçük bozulmalı gerilim kararlılığı, sistem yükündeki değişimlerin artmasından dolayı oluşan küçük salınımlara maruz kaldığında kabul edilebilir gerilim dengesini koruyan, güç sistemlerinin yeteneği ile ilgilidir. Küçük bozulmalı gerilim kararlılığı analizi için, işletme noktası çevresinde lineerleştirilmiş sistem modelini göz önünde tutmak en uygun olanıdır. Transformatörlerin sargılarının akımlar sabit kalacak şekilde değişmesi ve diğer donanım için sürekli olmayan modeller, yaklaşık sürekli

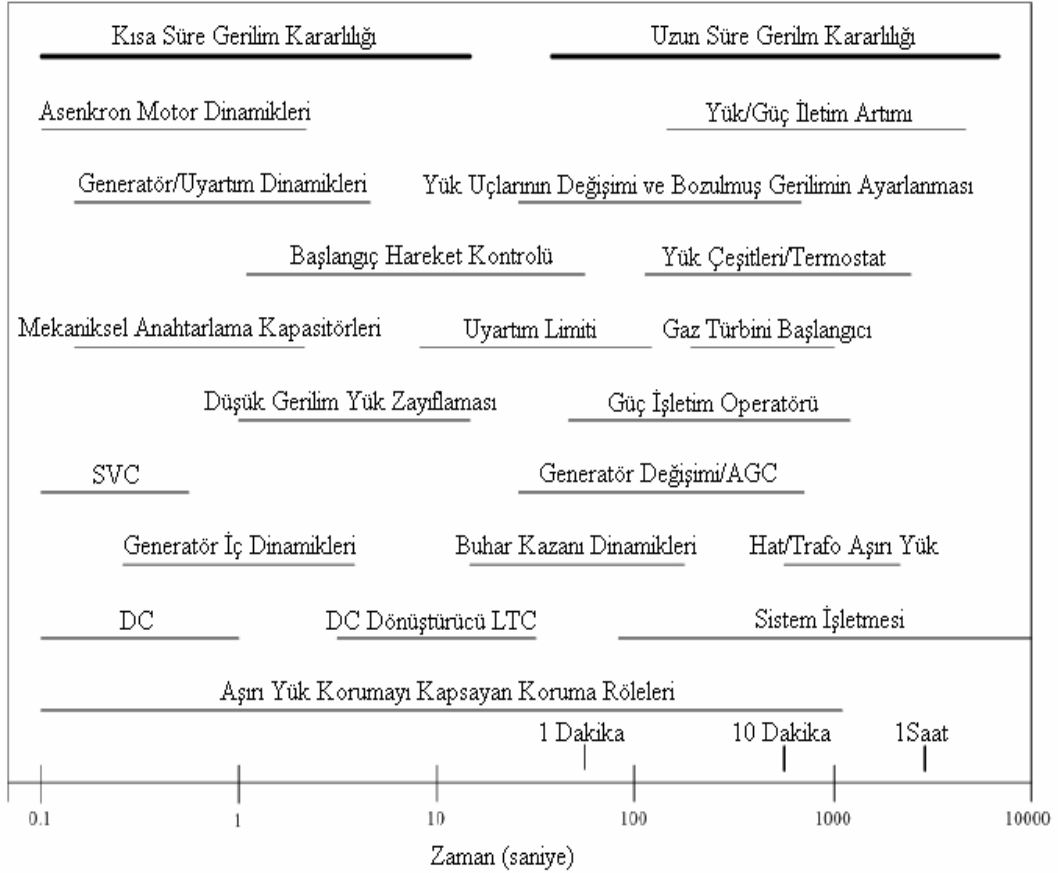
modeller ile yer değiştirilebilir. Küçük bozulmalı gerilim kararlılığının çalışma periyodu dakikalar ile saatler aralığında değişebilir.

Farklı güç sistem cihazlarının, gerilim değişimleri ve bozulmalarının zaman cevapları Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Gerilim kararlılığı problemlerini zaman aralıkları bakımından iki kategoriye ayırabiliriz.

a) Kısa süreli gerilim kararlılığı, asenkron motorlar, hızlı kontrolör cihazları ve HVDC dönüştürücüleri gibi hızlı çalışan yük bileşenlerini ve dinamiklerini kapsar. İlgilenilen zaman çerçevesi birkaç saniyedir ve analiz, uygun sistem diferansiyel eşitliklerinin çözümünü gerektirir.

b) Uzun süreli gerilim kararlılığı, ULTC gibi daha yavaş çalışan cihazları, termostatik kontrollü yükleri ve aşırı uyartım sınırlayıcıyı kapsar. İlgilenilen zaman çerçevesi birkaç saniyeden onlarca dakika sürebilir. Sürekli veya yarı sürekli hal analizleri, kararlılık sınırlarını hesap etmek için kullanılıp, kararlılığı etkileyen faktörler tanımlanabilir ve yardımcı cihazlar tasarlanabilir.

Gerilim kararlılığı olayının, yukarıdaki şekil gibi düzgün sınıflandırılması ile varsayımların basitleştirilmesi yapılarak, problem içindeki kompleks sorunlar azaltılabilmektedir. Değişik gerilim kararlılık problemleri, uygun analitik teknikler ve sistem tanımlaması yapılarak analiz edilebilir.



Şekil 2.2 Gerilim kararlılığı olayı için zaman düzeneği [29]

2.3. Gerilim Kararsızlığı Mekanizması

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin yük talebi ile üretilen ve yük merkezine iletilen güç arasındaki dengenin korunması yeteneğidir. Sistemdeki yük; motor kayma hareketi, bir transformatörün sargılarının akımlar sabit kalacak şekilde değişmesi, termostatlar vb. sebeplerle oluşan ani bir gerilim azalmasından sonra, toparlanma sürecinde, önceki bozulmadan kaynaklanan güç tüketimini telafi etmek eğilimindedir. Kararlı yüklerin ve iletim şebekesi ile güç üretim sisteminin kapasitesinin artmasına bağlı olarak kötüleşen durum nedeniyle gerilim kararsızlığı meydana gelir. Güç sistem gerilim kararsızlığına üç faktör etki eder. Bunlar, yük talebi, iletim şebekesinin kapasitesi ve güç üretim kapasitesidir. Bütün bu üç faktörün gerilim kararlılığına etkisi aşağıda anlatılmıştır.

2.3.1. Elektriksel yükleri

Yükün, gerilim değişimlerine dinamik cevabı, güç sistem gerilim kararsızlığının anahtar mekanizmasıdır. Bir çok teknik çalışma, yüklerin çeşidini ve bunların modellemelerini tanımlamaktadır. IEEE, CIGRE çalışma grubu [30,31,32] veya bireysel çalışanlar bu konuda bir çok makale yazmışlardır [33,34]. Yük kelimesi, farklı güç sistem mühendisleri tarafından değişik manalarda kullanılabilir. Analiz çeşidine bağlı olarak, yük modelleri statik yük modelleri ve dinamik yük modelleri olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir.

Statik yük modelinde, gerilimin genliği, cebirsel fonksiyon olarak yük tarafından tüketilen gücü karakterize edebilir. Geniş bir şekilde kullanılan statik yük modeli Denklem 2.1 ve 2.2’de verilen üstel yük modelidir. Burada P_0 ve Q_0 yükte tüketilen aktif ve reaktif gücü, V_0 referans gerilimini, üstel a ve b yük karakteristiklerini temsil etmektedir. Tablo 2.1’de bazı yük çeşitlerinin a ve b değerleri gösterilmiştir.

Üstel yük fonksiyonlarının özel bir biçimi, sabit empedans, sabit akım ve sabit güç olmak üzere, üç model yükten oluşan, polinom yük modelidir. Polinom yük modelinin aktif ve reaktif güç tüketimi Denklem 2.3 ve 2.4’de verilmiştir. Yük gerilim genliği belirli sınırlar içinde olduğunda bu üstel yük modelleri geçerlidir (Örneğin $0.6 < \frac{V}{V_0} < 1.2$). Bu gerilim aralığı dışında yük karakteristikleri tamamen farklı olabilir.

$$P(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \quad (2.1)$$

$$Q(V) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b \quad (2.2)$$

$$P(V) = p_0 \left[k_{pz} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + k_{pi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + k_{pp} \right] \quad (2.3)$$

$$Q(V) = Q_0 \left[k_{Qz} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + k_{Qi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + k_{Qq} \right] \quad (2.4)$$

Tablo 2.1 Çeşitli yüklerin üstel değerleri [1]

Yük Tipi	a	b
Elektrik Ampulü	1.54	-
Klimalar	0.5	2.5
Fırın Fanları	0.08	1.6
Şarj Cihazları	2.59	4.06
Elektronik Kompak Floresanlar	0.95-1.03	0.31-0.46
Geleneksel Floresanlar	2.07	3.21

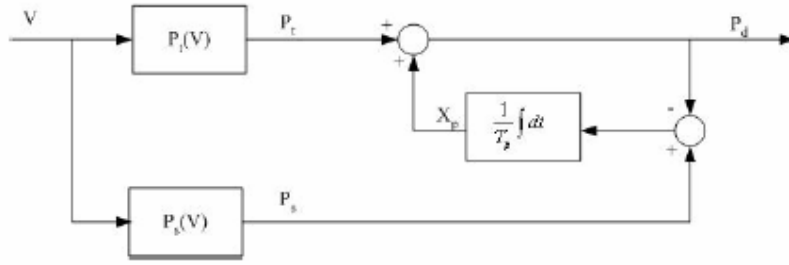
Yük, bir başka tanımda da, güç sistem modelinde baraya bağlanmış tekli güç tüketen, açıkça belirtilmemiş bir sistem parçası olarak belirtilmiştir[31]. Bu şartlarda, iletim sistemi analizi için yükler sadece güç tüketim cihazlarını kapsamayıp aynı zamanda aşağıdaki cihazları da kapsar.

- a) LTC'yi içine alan elektrik gücünü azaltan transformatör bölümleri
- b) Alt iletim ve dağıtım besleyicileri
- c) Gerilim regülatörleri
- d) Paralel kapasitör grupları ve değişken reaktif güç tüketim cihazları

Gerilim kararlılık analizi için yüklerin sayısal gösterimi, statik üstel yük modellerinde olmayan çeşitli durumlar içerir. Bu faktörler motorun durması ve salınım yapması, deşarj lambaları vb. sebeplerden dolayı düşük gerilimde, gerilim karakteristiklerinin lineer olmaması, gerilim regülatör cihazlarının davranışları, termostatik kontrollü yükler, gerilime duyarlı yük dinamiklerini kapsamaktadır. Bu

etkiler ve uygun hesaplanabilir verim ile dinamik yüklerin iyi bir şekilde modellenmesi hala araştırmacıların çalışma konularını oluşturmaktadır.

Referans [33,34,35] de, termostatik kontrollü yükler ve bazı motor sürücü yükleri gibi farklı geçici hal ve sürekli hal karakteristikleri ile yüklerin temel dinamik davranışlarını göstermek amacıyla basitleştirilmiş birinci dereceden yük modelleri önerilmektedir. Bu modellerde gösterilen bütün şekiller tamamen farklı olsa da referans [34] dışında kalanlar Şekil 2.3'te gösterilen blok diyagramları gibi geliştirilebilir. Burada X_p yük toparlanma dinamiklerinin dahili durum değişkeni, P_d gerçek aktif güç yüküdür. Sürekli hal gücü P_s , geçici hal gücü P_t ve yük toparlanma zaman sabiti T_p aktif güç yük modeli parametreleridir. P_s ve P_t Denklem 2.5 ve 2.6'da belirtildiği gibi P_0 yükün nominal güç tüketimine ve V_0 nominal gerilime bağlı olarak değişmektedir. Denklem 2.7 ve 2.8 genel dinamik sistem formatı içinde yük modelini tanımlamaktadır. Referans [33] ile [34] arasındaki tek fark P_t geçici hal gücü ile iç durum değişkeni X_p arasındaki toplamının yerine çarpımıdır.



Şekil 2.3 Basitleştirilmiş genel dinamik yük modelleri

$$P_t = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_1} \quad (2.5)$$

$$P_s = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_2} \quad (2.6)$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \frac{1}{T_p} (P_s(V) - P_t(V) - X_p) \quad (2.7)$$

$$P_d = X_p + P_t(V) \quad (2.8)$$

Benzer şekilde birinci dereceden diferansiyel sistem modeli yük reaktif güç tüketimi içinde kullanılabilir. Toparlanma zaman sabiti T_q dır. Buna ait karakteristik denklemlerse aşağıda verilmiştir.

$$Q_r = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{b_1} \quad (2.9)$$

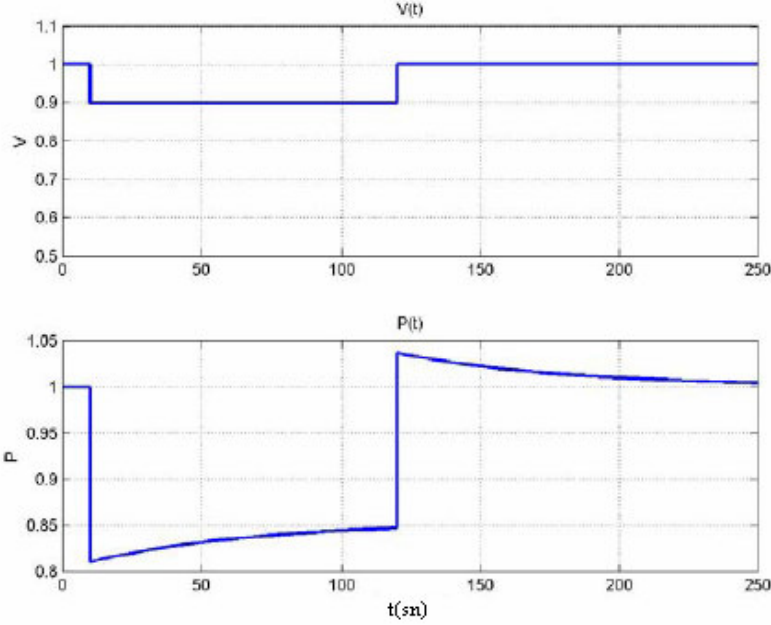
$$Q_s = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{b_2}$$

(2.10)

Bu parametrelerin tipik değerleri Tablo 2.2'de listelenmiş ve önemli veri analizleri sayesinde elde edilen değerlerdir. Şekil 2.4'de $T_p=60$, $a_2=1.5$ $a_1=2.0$ değerlerinde gerilim değişimi ile yük toparlanma dinamiklerinin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Yük toparlanma dinamikleri yüzünden, geçici hal olayı yaşayan bir güç sistemi, yükleri güç talebini bir önceki bozulma seviyesine geri getirmek eğiliminde olduğu için potansiyel olarak uzun süre gerilim kararsızlığına maruz kalabilir.

Tablo 2.2 Genel yük modelleri için tipik parametre değerleri [33]

T_p	T_q	a_2	a_1	b_2	b_1
60-300s	30-200s	0-2	1-3	2-5	4-6

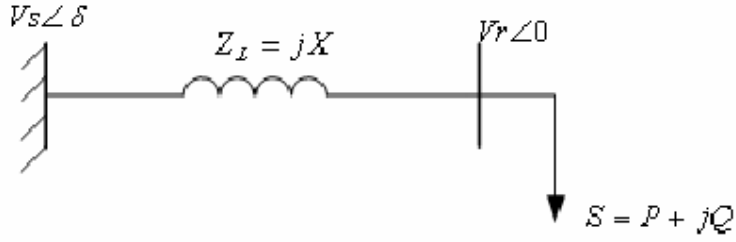


Şekil 2.4 Yük dinamiklerinin gösterimi

2.3.2. Hattın güç iletim kapasitesi

Gerilim kararsızlığına etki eden en büyük faktör, iletim şebekesinin hat empedansı vasıtasıyla aktif ve reaktif güç akışı yapılırken meydana gelen gerilim düşümüdür. İletim hattının empedansı, kaynak ile yük arasındaki hat boyunca iletilecek olan maksimum gücü sınırlar. Çevresel kısıtlayıcı şartlar kaldırılırsa, daha önceden tasarlanan iletim sisteminin iletim sistem karakteristikleri kullanılarak daha uzun mesafelere güç transferi yapılabilir. Hattan iletilen gücün, iletim şebekesinin maksimum değerine yakınsaması gerilim kararsızlığının ana nedenlerinden birisidir.

İletim hatlarının maksimum transfer edilebilecek gücü, basit iki baralı bir sistem modeli için Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Burada, sabit kaynak gerilimi V_s , bir iletim hattı vasıtası ile yüke uygulanan basitleştirilmiş reaktans jX dir. Yük tarafından alınan aktif ve reaktif güç denklemleri 2.11 ve 2.12’de belirtildiği gibidir. Denklem 2.11 ve 2.12’nin birleştirilmesi ve δ ’nın elimine edilmesi ile V_r Denklem 2.13’deki gibi elde edilir. V_r fiziksel bir değişkendir ve çözümü mutlaka mevcuttur. Bu yüzden Denklem 2.12 daha doğru bir ifadedir.



Şekil 2.5 İki baralı bir güç sistem modeli

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta$$

(2.11)

$$Q = \frac{V_s V_r}{X} \cos \delta - \frac{V_r^2}{X} \quad (2.12)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{V_s^2}{2} - QX \pm X \sqrt{\frac{V_s^4}{4X^2} - P^2 - Q \frac{V_s^2}{X}}}$$

(2.13)

$$P^2 + Q \frac{V_s^2}{X} \leq \frac{V_s^4}{4X^2}$$

(2.14)

Denklem 2.11 göstermektedir ki, yük gerilimi V_r , V_s gerilimine, hat empedansına X ve istenen yük değerleri P ve Q 'ya bağlıdır. Şekil 2.6'da gösterilen üç boyutlu yüzey bunların birbirleriyle olan ilişkilerini göstermektedir. Şekil 2.7 aynı yüzeyin diğer açıdan gösterimidir. Yüzeyin kararlı olan üst kısmı yüksek gerilim çözümlerine karşılık gelir. Yük gerilimi yüzeyin kararsız olan alt kısmında olduğunda yükün artması durumunda çatalaşma teorisinde açıklandığı gibi yük geriliminde daha fazla azalma olacaktır [35]. Denklem 2.14'den elde edilen yarı parabolik P-Q düzlemi üç boyutlu olarak Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Renkli kısımlar kompleks gücü

$$S = P + jQ$$

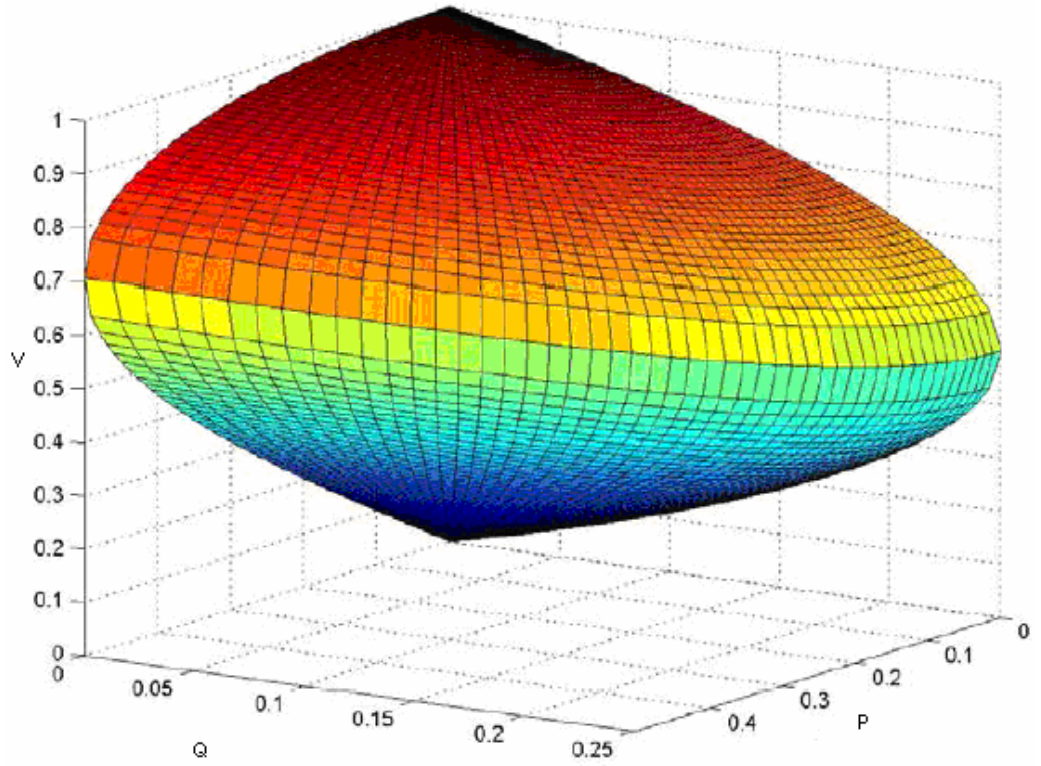
göstermektedir. Renkli kısımların sınırları kompleks güç iletim limiti S_{\max} 'ı göstermektedir. S_{\max} , V_s^2 ve $\frac{1}{X}$ ile orantılıdır. Maksimum iletilebilen aktif güç P_{\max} ,

$Q=0$ iken $\frac{V_s^2}{2X}$ olur. Maksimum iletilebilen reaktif güç Q_{\max} , $P=0$ iken P_{\max} 'in yarısı

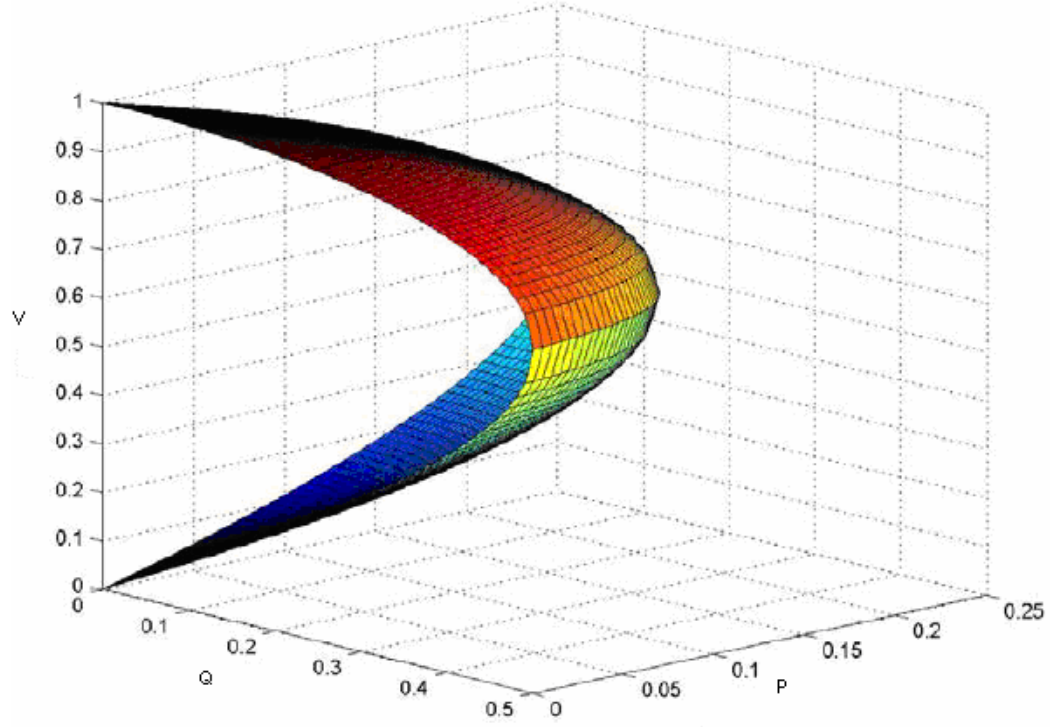
yani $\frac{V_s^2}{4X}$ olur. Maksimum iletilebilen aktif güç azalırken, reaktif güç iletimi artar.

Benzer şekilde, maksimum iletilebilen reaktif güç azalırken, aktif güç iletimi artar.

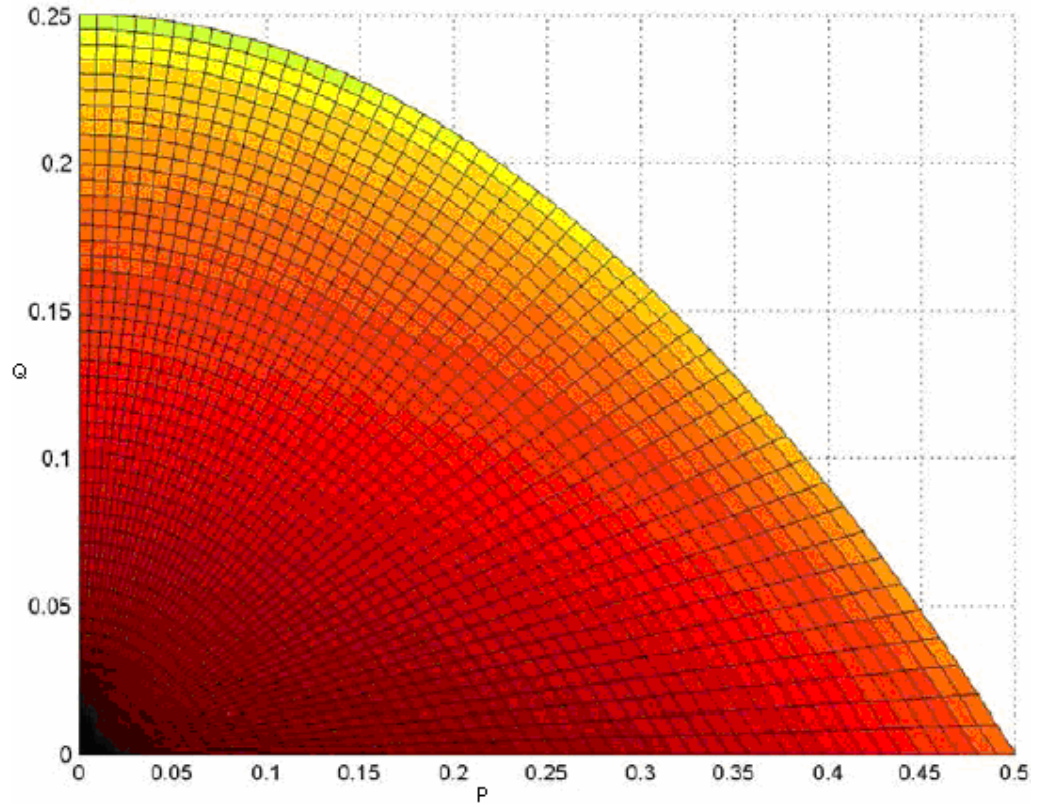
Aynı zamanda endüktif hattan reaktif gücü iletmek aktif gücü iletmekten daha maliyetlidir.



Şekil 2.6 PQV nin üç boyutlu çizimi (Önden Görünüş)



Şekil 2.7 PQV nin üç boyutlu çizimi (Yandan Görünüş)



Şekil 2.8 Transfer edilebilen PQ gücü

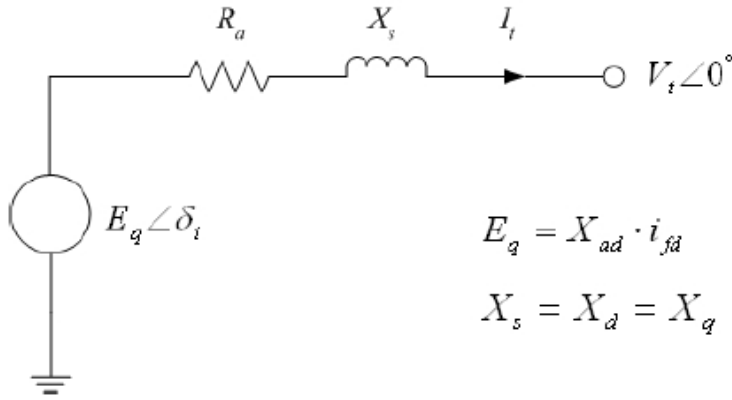
2.3.3. Güç üretim kapasitesi

Güç sisteminin üretim kapasitesi, sistemin gerilim kararlılığını sürdürmek için iletim sisteminin kapasitesi kadar önemlidir. Normal olarak, yeterli aktif güç üretim kapasitesi hesaplanırken, yükü beslemek ve uygun güç sistemi işletimi esnasında, mümkün olan beklenmedik olaylara dayanmak için plan yapılmalıdır. Reaktif güç üretimini programlamak daha zordur, yük reaktif güç talebi normal bir artış gösterdiğinde sistem gerilimi düşer ve iletim hattı boyunca reaktif güç transferi daha zor olur. Gerilim zorlama şartları altında asenkron motor yükleri durmaya eğilimlidir ve önemli derecede reaktif güç tüketimi artar. Bunun tersi olarak, paralel kapasitör setleri gibi yük merkezine yakın kurulan çeşitli reaktif üretim cihazlarının çıkışı, yük gerilimi düşüğü gibi düşer. Bu yüzden, yük gerilimi düşüğü için toplam yük reaktif güç talebi artımı oluşur, iletim şebekeleri üzerindeki zorlamayı artırır ve daha çok gerilim düşüşüne sebep olur.

Bütün gerilim kararsızlık durumlarında en az bir kritik generatör maksimum reaktif güç üretim kapasitesinde çalışır. Gerilim kararlılığı sistem reaktif güç üretim kapasitesi ile yakın ilişkilidir. Bu reaktif güç üretim ekipmanlarının karakteristiklerini ve sınırlarını incelemek gerilim kararlılığı problemlerinin analizi için çok önemlidir.

Senkron generatörler, temel aktif ve reaktif güç kaynağıdır ve güç sistemlerinde gerilim desteği için büyük sorumluluğa sahiptirler. Bir generatörün aktif güç çıkışı başlangıç hareketinin kapasitesi tarafından sınırlanır. Sabit aktif güç çıkışıyla, reaktif güç çıkışı genellikle armatürleri ve alan bobin sıcaklık sınırları tarafından sınırlanır. Güç çıkışı bir generatörün kapasite sınırları içinde olduğu zaman, generatörün uç gerilimi otomatik gerilim regülatörü (AVR) tarafından düzenlenir ve sabit sürdürülür. Sistemde düşük gerilim şartları süresince oluşan, büyük reaktif güç talebi, alan akımı ve/veya armatür akımının sınırlarına ulaşmasına sebep olabilir. Modern generatörlerin çoğu, alan devreleri ve rotor üzerindeki aşırı ısınmayı önlemek için aşırı tahrik sınırlayıcılarına (OXLs) sahiptirler. OXLs'lerin uygulamalarında birçok çeşit olmasına rağmen [36,37], OXLs'lerin genel uç gerilimi üzerindeki etkileri benzerdir. Büyük generatör çıkışı sistem alan akımının sınırlarına ulaşmak için

tahrike sebep olduktan sonra, generatör alan akımı otomatik olarak maksimum izin verilen değere OXL'si tarafından sabitlenir. Sabit alan akımı ile, sabit gerilim noktası generatör uçları yerine senkron reaktans arkasına geri çeker ve bu yüzden generatör, uç gerilim sabitini sürdürmek için kabiliyetini kaybeder. Bu mekanizma eşdeğer olarak şebeke reaktansını önemli derecede artırır [25]. Şekil 2.9 yuvarlak rotorlu bir senkron generatörün basitleştirilmiş kararlı hal eşdeğer devresini göstermektedir. Burada V_t generatör uç gerilimini ve X_s senkron reaktansını gösterir. OXL sınırına ulaştığında V_t yerine i_{fd} ve E_q sabitlenir.



Şekil 2.9 Bir senkron generatörün kararlı hal eşdeğer devresi [25]

Denklem 2.15'de alan akımı I_{fd} ve reaktif güç Q , aktif güç çıkışı P ve makina iç empedansı X olmak üzere Şekil 2.9'da gösterilen kararlı hal durumu altındaki yuvarlak rotorlu senkron generatörün uç gerilimi V_t arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüksek reaktif güç talebi için I_{fd} , OXL sınırına ulaştığında makina uç gerilimi V_t , I_{fd_limit} per unit olarak 2.0 ile 4.0 tipik değerler arasında olmak üzere Denklem 2.16'ya ulaşır. Bu yüzden, generatör uç gerilimi reaktif güç çıkışı arttığı gibi azalır. Bir gerilim desteği perspektifinden, sabit bir generatör uç gerilimi, hala reaktif güç generatör kapasitesinin belli bir derecesine sahip generatörü gösterir. Diğer taraftan anormal düşük bir generatör uç gerilimi, kapasite sınırına ulaşmış bir generatörü gösterir.

$$I_{fd}^2 = \left(V + X \frac{Q}{V}\right)^2 + \left(X \frac{P}{V}\right)^2 \quad (2.15)$$

$$V_{Q_lim} = \frac{1}{2} \sqrt{2I_{fd_limit} - 4.X.Q + 2\sqrt{I_{fd_limit}^2 - 4.X.Q.I_{fd_limit} + 4.X^2.P^2}} \quad (2.16)$$

Üç önemli reaktif güç kompanzasyon cihazı vardır: paralel kapasitörler; SVC'ler ve seri kapasitörler, reaktif güç ve gerilim desteği sağlamak için enerji üreticileri tarafından kullanılır.

Paralel kapasitörler reaktif güç ve gerilim desteği sağlamak için çok pahalı olmayan kaynaklardır. Paralel kapasitörler tipik olarak reaktif gücün uzun mesafe iletim ihtiyacını azaltmak ve generatörler ve Statik Var Kompanzatorleri (SVCs)'nden kontrol edilebilir reaktif güç üretimini sağlamak için yük merkezine yakın kurulular. Bununla beraber, paralel kapasitörler tarafından üretilmiş reaktif güç, gerilimin karesi ile orantılıdır. Gerilim zorlanması durumunda kapasitör setlerinden VAR desteği, gerilim düşümü olarak karesel bir şekilde düşer, böylece gerilim kararsızlığı problemine katkıda bulunur. Ek olarak sistem paralel kapasitör setleri tarafından ağır bir şekilde kompanze edilirse, gerilim regülasyonu daha zor olur; kararlı çalışma paralel kapasitör seti kompanzasyonu belli bir seviye altında olduğunda muhtemelen elde edilemez [25].

SVC, ya reaktif güç üretebilen ya da reaktif gücü absorbe edebilen bir gerilim kontrollü paralel kompanzasyon cihazıdır. Bu cihaz paralel suseptansını otomatik olarak ayarlayarak bu gerilimi aynı zamanda düzenlemeye yarar. SVC nin tipik çalışma hızı birkaç devir içindedir. Bu yüzden, SVC'ler hafifletilmiş açılı kararsızlığı ve kısa süreli gerilim kararsızlığı cinsinden çok etkilidir. Düzenleyici aralığı içinde bir SVC tarafından meydana gelen kontrol edilemeyen veya kararsız bir problem yoktur. Sınırlarına ulaştığında SVC gerilimin karesi ile orantılı olan reaktif güç çıkışı ile saf paralel kapasitör (veya reaktör) gibi davranır. Bir statik var sistemi (SVS) SVC'lerin bir kümesi ve çıkışları düzenlenen mekanik olarak anahtarlanmış kapasitörler (MSCs) veya reaktörlerdir.

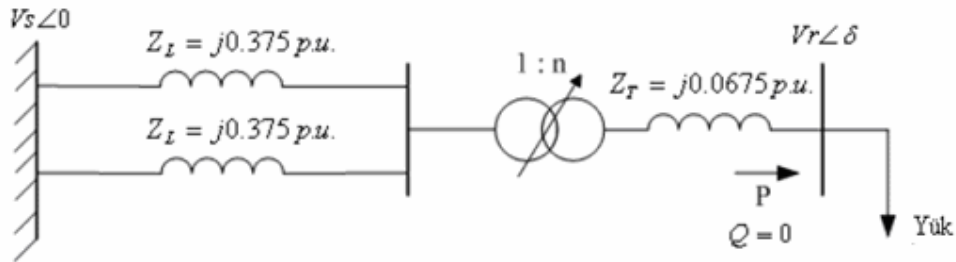
Seri kapasitörler bazen karakteristik hat empedansını azaltmak için uzun iletim hatları üzerine kurulur ve bu yüzden şebeke iletim kapasitesi artar. Seri kapasitörler tarafından üretilmiş reaktif güç hat akımının karesi ile orantılıdır ve bara

gerilimlerinden bağımsızdır. Gerilim kararlılığı üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Çünkü seri kapasitörler hat koruma sistemleri üzerine yük olurlar ve bakımları maliyetlidir. İletim sistemi üzerinde seri kapasitör kurulumu sınırlıdır ve gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi çok önemli değildir.

Gerilim kararlılığı doğrudan reaktif güç yük-üretim-iletim dengesi ile ilgilidir. Yeterli reaktif güç üretim kapasitesi, düzenlenen sistem gerilimi ve geliştirilen gerilim kararlılığı için yararlıdır. Reaktif güç üretim stokunun hızlı kaybı gerilim kararsızlığının bir işaretidir.

2.3.4. Gerilim kararsızlığını temel mekanizması

Şekil 2.10'da gösterilen basit güç sistemi gerilim kararsızlığı mekanizmasını göstermek için kullanılır. Sabit bir gerilim kaynağı V_s , iki paralel hat ve transformatörün akımını değiştirmeden, sarım sayılarını değiştiren ULTC (yük altında kademe değiştirici) trafosu ve bu sisteme bağlı yük modellenmiştir.

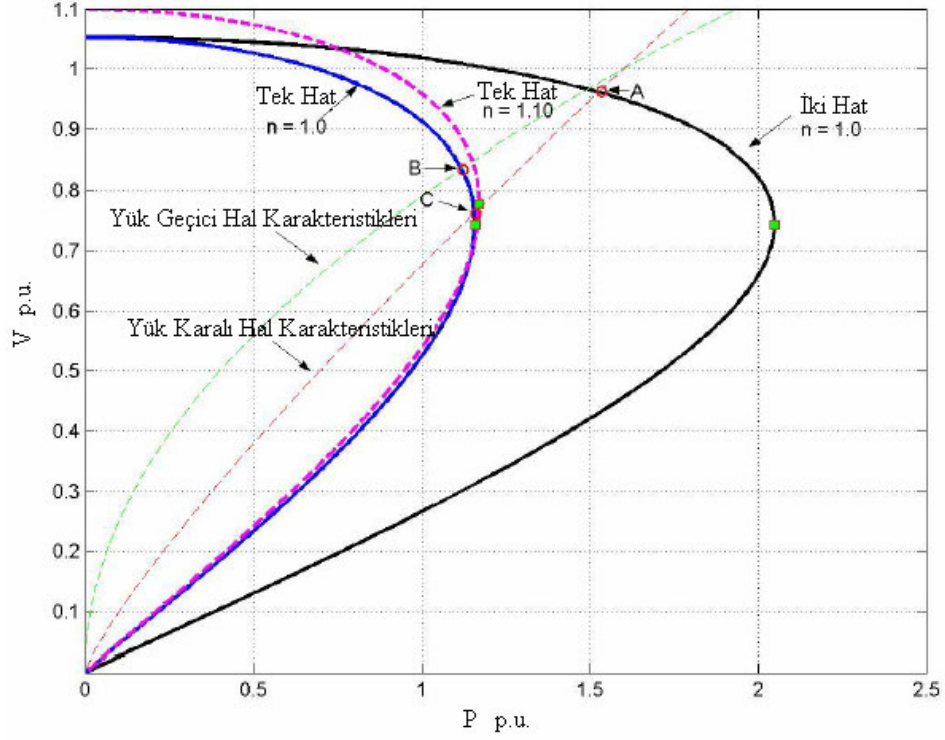


Şekil 2.10 Gerilim kararsızlığını göstermek için üç baralı bir güç sistemi

Kolaylık için, iki hattın ve transformatörün dirençleri ihmal edilir ve yük saf aktif bir güç yükü olarak kabul edilir.

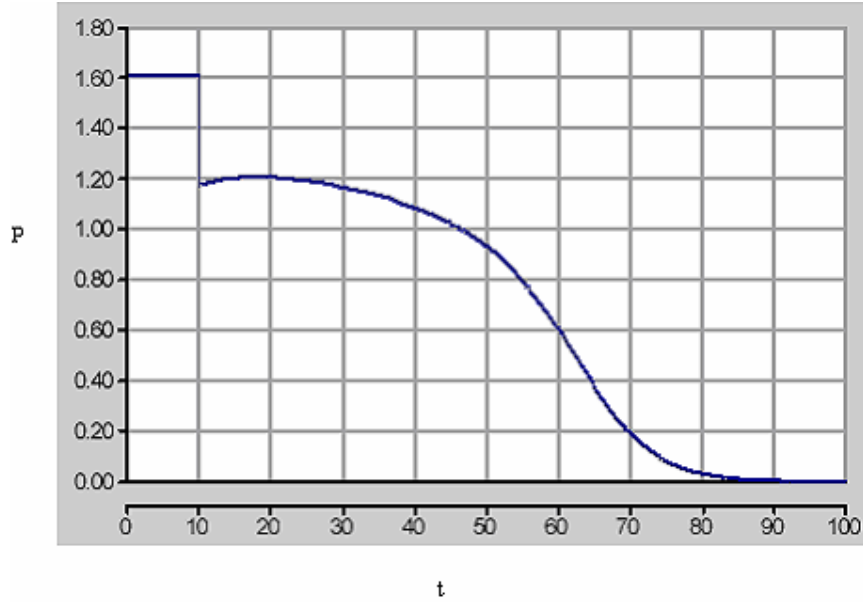
Şekil 2.11'de gösterilen iki kesikli eğri sırasıyla yükün sürekli hal ve geçici hal karakteristiklerini gösterir. Anma yükü P_0 , geçici üstel parametresi $a_t=2.0$, ve kararlı üstel parametresi $a_s=1.2$ olmak üzere 1.6 pu 'ya eşittir. P-V eğrisinin en dışındaki siyah renkli eğri, sistemin çalışan iletim hatlarını ve ULTC oranı n 'nin yerini tutar. A noktası normal çalışma şartları boyunca sürekli çalışma noktasıdır. Eğer bir

temizleme hatasından dolayı iletim hatlarının biri aniden açılırsa, n 'nin 1'e eşit olduğu bir transformatör bağlantı pozisyonundaki P-V eğrisi, hattın yeniden devreye alınmasından önce, sistemin yerini tutan P-V eğrisini gösterir. Ani gerilim değişiminden dolayı, yük talebi yük geçici karakteristiklerine uyar. Bu yüzden B noktası hat açıldıktan sonra sistemin gerçek çalışma noktasıdır. Hat açıldıktan sonra bağlantı değiştirici bloke olursa, sistem çalışma noktası, geçici durumdan sürekli hal durumuna gücü eski haline getirmek için yük denemeleri ile P-V eğrisi boyunca B noktasından C noktasına taşınacaktır. Çünkü çalışma noktası C burun noktasının üstündedir, sistemin maksimum transfer edilebilen gücü yerine, sistem çalışma noktası C noktasında sonlanır ve sistem gerilimi kararlıdır. Bununla beraber, yük gerilimi hat açıldıktan sonra bağlantı değiştiricinin minimum eşik geriliminin altındaysa, ULTC yük gerilimini yeniden eski değerine getirmek için transformatör oranı n otomatik olarak artar. ULTC bağlantısı, normal olarak maksimum bağlantı oranı olan 1.1'de sonlandığı için, sürekli hal çalışma noktası $n = 1.1$ olmak üzere P-V eğrisinin yerini tutan burun noktasını geçer. Yük talebi geri yüklemeye çalışıldığında sistem gerilimi P-V eğrisinin alt kısmı boyunca daha fazla azalır ve yük gerilimi sonunda çöker.

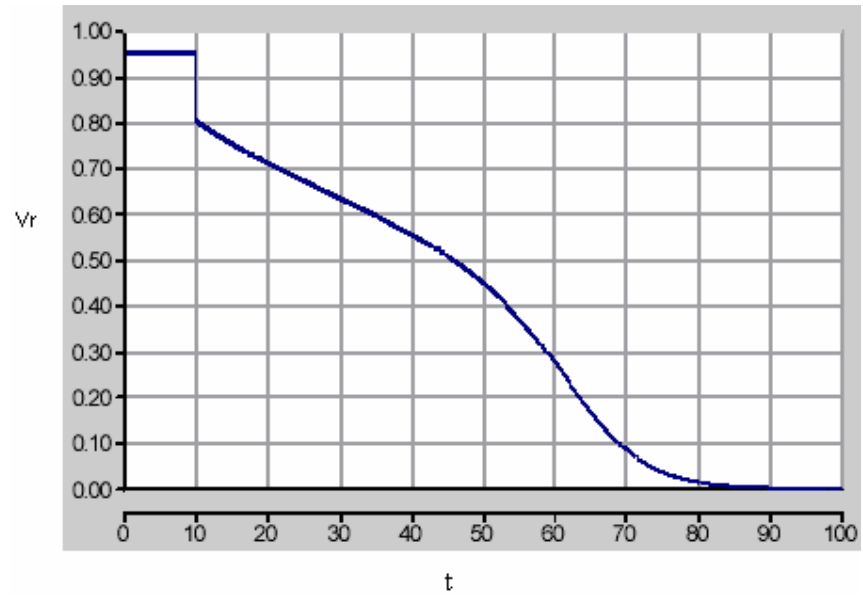


Şekil 2.11 Basit bir güç sisteminin sürekli hal analiz sonuçları

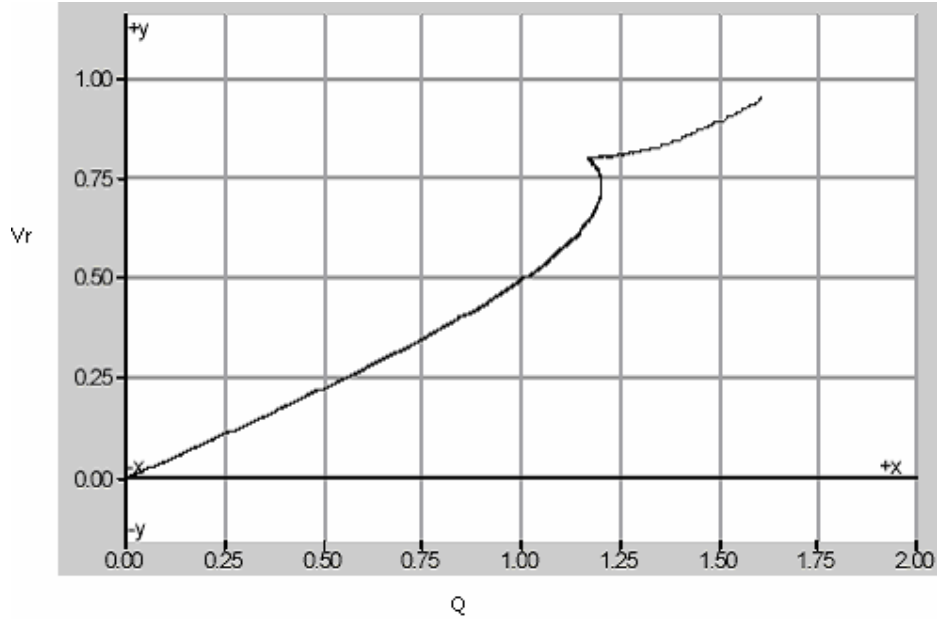
Bu basit güç sistemi zaman tabanlı benzetim sonuçlarını elde etmek için Power Systems CAD (PSCAD) içinde de modellenir. İletim hatlarından biri 10. saniyede açılarak, elde edilen yeni sistem için aşağıdaki, aktif gücün (P) ve yük gerilimin (Vr) zamana göre değişimlerini içeren eğriler elde edilmiştir. Ayrıca aynı durum için reaktif gücün (Q) yük gerilimi (Vr) karşılık gelen değişimi çizilmiştir.



Şekil 2.12 Şekil 2.10'daki sistem için yük aktif gücünün (P) zamana göre değişimi



Şekil 2.13 Şekil 2.10'daki sistem için yük geriliminin (V_r) zamana göre değişimi



Şekil 2.14 Şekil 2.10'daki sistem için yük reaktif gücüne (Q) karşılık yük gerilimi (V_r) değişimi

BÖLÜM 3. GERİLİM KARARLILIĞI METOTLARININ İNCELEMESİ

Güç sistemleri, çok-boyutlu sürekli değişen ortamlarda çalışan lineer olmayan sistemdir; yükler genaratör çıkışları ve anahtarlama parametreleri sürekli değişir. Bu yüzden, gerilim dengesizliği lineer olmayan, zamanla değişen, dinamik bir olgudur. Var olan gerilim kararlılığı metotları ve ilgili indeksleri (VSI), dinamik simülasyonlar ve sürekli hal durum analizi olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir.

3.1. Güç Sistemi Dinamik Modeli ve Simülasyonu

Bir güç sistemi, 3.1- 3.4 eşitliğinde gösterildiği gibi diferansiyel, ayrık ve cebirsel olarak modellenebilir, bu eşitliklerde sırasıyla, y bara gerilim vektörünü, x kısa-dönem durum vektörünü, Z_c sürekli durum vektörünü ve Z_d de ayrık uzun-dönem durum vektörünü gösterir[1]. 3.1 denklemi, genaratör, indüksiyon motorları, HVDC bileşenleri ve SVC ler gibi kısa-dönem sistem dinamiklerini gösterir. 3.2. denklemi, termostatik yük toparlanması ve generatör voltaj regülatörü davranışı gibi güç sistemi uzun-dönem sürekli dinamiklerini gösterir. 3.3 denklemi LTC kademe değişimleri, şönt kapasitör/ reaktör anahtarlama ve aşırı uyarma sınırlayıcıları gibi güç sistemi uzun-dönem ayrık dinamikleri modelidir. 3.2. ve 3.3 denkleminin birleşimi güç sistemi uzun-dönem dinamikleri modelidir. 3.4 denklemi güç sisteminin dengesini temsil eder ve bir temel enerji sistemi yük akışı eşitlikleri kümesidir.

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d)$$

(3.1)

$$\dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d)$$

(3.2)

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k))$$

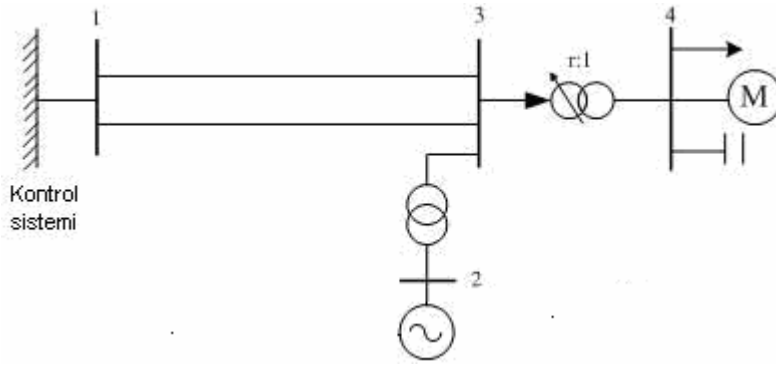
(3.3)

$$0 = g(x, y, z_c, z_d)$$

(3.4)

Uygun sadeleştirmeler ve varsayımlar ile günümüze kadar birikmiş bilgilere dayanarak oldukça ayrıntılı ve yeterli doğrulukta bir güç sistemi modeli elde edilebilir. Şekil 3.1 de gösterildiği gibi bir dört baralı örnek sistemi, [1] numaralı referansda detaylı olarak tanımlanan eşitlikler kümesi tarafından modellenebilir. Tablo 3.1 de eşitliklerin ve değişkenlerin numaraları listelenmiştir. Burada, dört baralı sistem modeli için toplam 22 eşitlik vardır. Bu örnekte yüzlerce veya binlerce düğüm ile bir gerçek güç sistemi modeli için gerekli çok sayıda eşitlik gösterilmiştir. Quasi Sürekli Hal (QSS) yaklaşımı [1,2] sayesinde kısa-dönem kararlı ve bu kısa-dönem diferansiyel eşitliklerin yerini alan, daha az cebirsel eşitlik ile varsayılan güç sisteminde denklemlerin sayısı düşürülebilir.

Etkili simülasyon yazılım paketleri ile, uzun zaman diliminde büyük güç sistemlerinin ve sistem dinamiklerinin eşitlik grupları geliştirilebilmektedir. Çeşitli dinamik simülasyon yöntemleri ile güç sisteminde olay sıralarının zaman ayarı tekrar oluşturulabilir ve sistemin kararlı olup olmadığının tanımlanması yapılabilmektedir. Bununla beraber, zaman-aralığı simülasyonları, hala ağır hesaplar için uzun zaman almakta ve sonuçların modellenmesi ve analizi için mühendislik çalışması gerekmektedir. Aynı zamanda, dinamik analizler, kararlılık sınırı ya da duyarlılık konusunda fazla bilgi sağlamazlar. Bu sorunlar çevrimiçi uygulamalar için dinamik simülasyonun kullanılmasına engel olmaktadır. Dinamik simülasyonlar çoğunlukla, sistem planlaması, analizler ve koruma ve kontrol sistem düzenleme çalışmaları için araç olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Dört baralı bir güç sistemi [1]

Tablo3.1 Şekil 3.1' deki 4 Baralı örnek sistem için dinamik model denklemleri [1]

3.1 Eşitlikler		3.1 Değişkenler	
Kısa-dönem	8 eşitlik	x :	Rotor açısı δ , rotor hızı ω , iç gerilimi E , alan gerilimi V , ikinci uyarıcı iç değişken x , Endüksiyon makine kayması S .
Uzun-dönem sürekli	2 eşitlik	z_c :	İlk uyarıcı iç değişken x_t
Uzun-dönem ayırık	1 eşitlik	z_d :	LTC kademe pozisyonu r
Network eşitlikleri	11 eşitlik	y :	Bara gerilimi gerçek kısmı, imajinel kısmı: $v_{x1}, v_{y1}, v_{x2}, \dots, v_{y4}$

3.2 Sürekli Hal Analizi

Gerilim kararlılığı analizi için yapılan dinamik simulasyon, çevrimiçi uygulamalarına uygun değildir. Çünkü; yüksek hesaplama gerektirir, çeşitli analitik tekniklerin bulunması için önemli araştırmalara bağlı kalınmıştır. Güç sistemi sürekli hal modelini temel alan gerilim kararlılığının güvenilirliğini tahmin etmesi için gerilim kararlılığı indeksi (VSI)s içermektedir. Sürekli hal modeli sadece cebirsel denklemler içerir, örneğin 3.4 eşitliğindeki güç sistemi ve varsayılan tüm diğer zamanlardaki durum değişkenlerinin türevleri sıfıra eşittir ve ayırık durum değişkenleri sabittir.

$$\dot{x}_c \cdot \dot{z}_d(k+1) = \dot{z}_d(k)$$

3.2.1 Yük akışı analizi

Sürekli hal yük akışı probleminde, güç sistem devre eşitliklerinden, eşitlik 3.5 de gösterildiği gibi doğrudan türevi alınmıştır, burada I düğümdeki akım vektörü, Y admitans matrisi, V düğüm gerilim vektörü ve $S=P+jQ$ düğümdeki kompleks güç vektörüdür. Eşitlik 3.5 lineer olmayan iki eşitlik 3.6 ve 3.7 olarak daha da genişletilebilir. Burada P_i ve Q_i baradaki aktif ve reaktif güçtür. V_i , i ' inci baradaki gerilim büyüklüğünü, δ_i , i ' inci baradaki gerilim faz açısını ifade eder. Y_{ij} , kompleks admitans matrisi Y ' nin ij ' inci elemanını ve φ_{ij} de admitans açısını belirtmektedir.

$$Y.V = I = \frac{S^*}{V^*}$$

(3.5)

$$P_i + V_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) = 0 \quad (3.6)$$

$$Q_i + V_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) = 0$$

(3.7)

Yük akışı probleminin temel ilkesi, lineer olmayan eşitlik çözümleri verilen sistem yükleri, generatörler ve sistem kurulumu ile bara gerilimlerini çözmektir. Yük akışı problemini çözmek için en genel ve güvenilir algoritma Newton-Raphson metodudur. [3,4] Taylor açılımının ilk terim gibi lineer olmayan eşitliklere benzer şekilde, 3.8 eşitliğinin de uyumsuz doğrusallaştırması, 3.6 ve 3.7 eşitliklerindeki gibi iteratif bir çözümünü içerir. Uyumsuz eşitliklerin türevleri 3.9-3.16 eşitlikleri tarafından özetlenmiştir. Denklem 3.8' deki katsayılar matrisi Jakobien Matrisi olarak adlandırılır.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

(3.8)

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_i} = V_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) + V_i^2 \cdot Y_{ii} \sin \varphi_{ii}$$

(3.9)

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_i} = -V_i V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij})$$

(3.10)

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = V_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) + V_i \cdot Y_{ii} \cos \varphi_{ii}$$

(3.11)

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = -V_i Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij})$$

(3.12)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) + V_i^2 \cdot Y_{ii} \cos \varphi_{ii}$$

(3.13)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} = V_i V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij})$$

(3.14)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} = -\sum_{j=1}^{N_{\text{bara}}} V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) + V_i \cdot Y_{ii} \sin \varphi_{ii}$$

(3.15)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij})$$

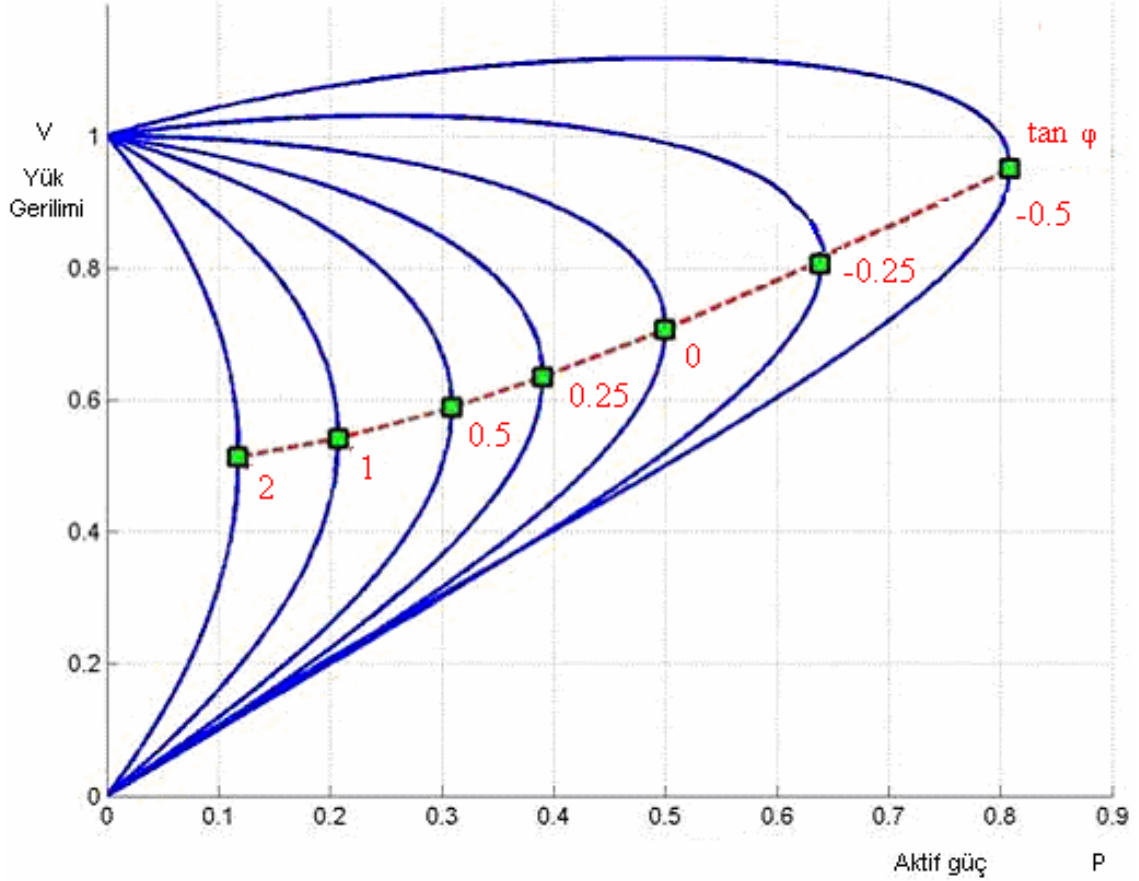
(3.16)

Lineer olmayan dinamik sistem analiz teknikleri; çatallaşma teorisi, gerilim çökmesi çalışmalarında ve bunu önlemeyi geliştirme yönündeki çalışmalarda kullanılır. Özel dinamik karakterli bazı yükler için, enerji üretiminin maksimum yüklenme noktası ve iletim sistemi için bütün güç sisteminin düğüm noktası gerekli değildir[34]. Fakat uygulanabilir gerilim kararlılığı analizi için, güç sisteminin maksimum yüklenme noktası, dengeli gerilim sınır noktası ile sıkça değiştirilebilir. Çünkü eğer yük talebi sistemin maksimum yüklenme noktasına ulaşırsa muhtemelen yüksek olan sistem gerilimi çökebilir ve burada herhangi bir iyileştirici etki olmayabilir [35,38,39]. Bu yüzden, hemen hemen bütün yük akışı tabanlı gerilim kararlılığı metotları ve ilgili (VSI)

indeksler yaklaşıma dayalıdır. Bu durumda, sistemde maksimum yüklenme noktası, yük talebi ile sistemin dengeli gerilim sınır noktasına ulaşmasına eşdeğerdir.

3.2.2 Devamlı yük akışı ve P-V / V-Q eğrisi

Sistem yük akışı analizi, gerilim kararlılığı analizinde, bir yük değişiminin fonksiyonu olarak sistem gerilimlerinin izlenmesi için çoğu kez faydalı bir araçtır. Belirli yük barasının maksimum yüklenme noktası, başlangıçtaki akım işlemsel noktası ile hesaplanabilir. Yükte ufak bir artma miktarı ile belirli yük örneği (ör. Sabit güç faktörü) varsayımı yapar ve maksimum yük akışı noktasına ulaşana kadar yeniden hesaplar. Bu arada, yük barası için P-V ve Q-V eğrileri çizilerek, maksimum yüklenme noktası tahmini oluşturulabilir. Şekil 2.5 de gösterilen iki baralı güç sistem modelinin farklı güç faktörleriyle P-V eğrileri Şekil 3.2 de gösterilmiştir. Geleneksel yük akışı algoritmaları için, yük akışındaki yük noktaları ayrılır ve maksimum yük noktası gibi, sistemin tekil olan Jakobien matrisi dikkate alınır. Newton-Raphson metodunun bir değişimi olarak bilinen yük akışı metodu [5], koruma-düzeltilme projesine dayanır ve maksimum yüklenme noktasında tekil olmayan artırılmış jakobien matrisi için bir ilave eşitlik üretilir. Yük akışı metodu maksimum yüklenme noktasının hesaplanmasında oldukça kolaylık sağlar ve bütün P-V ve Q-V eğrileri çizilir.



Şekil 3.2 Şekil 2.5 de gösterilen iki baralı sistemde değişik güç faktörleri için çizilmiş P-V eğrileri

P-V ve Q-V eğrileri planlama ve analizler için genellikle yardımcı olarak kullanılır. Fakat bu eğriler yalnızca yük baraları içindir; yani, önem verilen her bir bağımsız bara ile kararlılık karakteristikleri oluşturulur ki bu da sistem çalışmasında gerçek güç için örnek oluşturmaz. Aynı zamanda, artan yük modellerini gerilimin zorlanma koşulları altında tahmin etmek zordur. Çoğunlukla bu eğriler hesaplandığında tahmin edilebilir.

3.3 Gerilim Kararlılığı İndeksi

Gerilim kararlılığı indeksinin (VSI) temel amacı, işletme noktasından sistemin gerilim kararlılığı sınır noktasına olan uzaklığı tahmin etmektir. Sayısal indeks yardım operatörleri, sistemin çökmeye ne kadar yakın olduğunu izler ya da gerilim çökmesini

önlemek için otomatik iyileştirme hareketini başlatmayı planlar. Aşağıda var olan önemli indeksler tartışılacaktır.

- 1) Yük akışı jakobiyen matrisi tekil değerleri ve özdeğerleri
- 2) Duyarlılık faktörleri
- 3) Çoklu yük akışı çözümlerinin varlığı
- 4) Yük akışı fizibilitesi
- 5) Thevenin eşdeğer empedansı
- 6) Yük sınırı
- 7) Gerilim
- 8) Güç sistemi yedek reaktif güç

3.3.1 Jakobien matrisinin tekil değerleri ve özdeğerleri

Güç sistemlerinde, sürekli hal yükü sistem maksimum yüklenme noktasına ulaştığında, yük akışının Jakobien matrisiyle ilişkili tekil olan eşitliği uyumsuzdur (eşitlik 3.8) ve bundan dolayı, klasik Newton-Raphson tabanlı yük akışı algoritmaları yakınsaması zordur. Tüm-boyut Jakobien matrisi indirgenerek J_R indirgenmiş matris haline getirilir. Bu matris sadece, ΔV olarak ifade edilen, baradaki gerilim büyüklerinin değişimleri arasındaki doğrusallaşma ilişkisini gösterir. Eşitlik 3.17' de bara reaktif güç değişimi ΔQ ve aktif güç değişimi de ΔP ile gösterilmekle beraber, $\Delta P = 0$ yapılır. Çünkü iletim hatlarının reaktansları, hattın direncinden daha büyüktür, bara gerilim büyüklükleri ΔQ 'dan ΔP ye daha hassastır.

İndirgenmiş Jakobien matrisi; sistemin gerilim kararlılığı değerlendirilmesi açısından, reaktif güç ve gerilim büyüklüğü ilişkileri ve sayısal çalışmaları azaltmaya daha çok odaklandığı için uygun zemin sağlar.

$$\Delta Q = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial Q}{\partial \delta} \frac{\partial P^{-1}}{\partial \delta} \frac{\partial P}{\partial V} \right] \Delta V = J_R \Delta V$$

(3.17)

Minimum tekil değer ve minimum özdeğer, iki gerilim kararlılığı indeksidir. Bunlar aynı Jakobien matrisinin farklı ayrışım metotlarından elde edilirler. Bu iki indisin yorumlarının sonuçları benzerdir. Matrisin tekilliğine, matrisin minimum tekil değeri tarafından karar verilir, tekil değer ayrışımı 3.18 eşitliğinde gösterildiği gibi elde edilebilir. Burada u_i ve v_i sırasıyla U ve V ortogonal birim matrisinin i 'nci sütunlarıdır ve Σ matris, σ_i gibi köşegen değerlerle simetriktir ve bütün diğer elemanları sıfırdır.

$$J = U \cdot \sum_{i=1}^N V^T = \sum_{i=1}^N u_i \cdot \sigma_i \cdot v_i^T$$

(3.18)

Matrisin ana köşegen değerleri negatif olmayan tekil değerlerdir. Eğer minimum tekil değer sıfırsa, matris tekildir. Jakobien matrisinin en küçük tekil değeri, Jakobien matrisinin tekillişmeye ve buna bağlı olarak sistemde gerilim kararsızlığı oluşmasına, ne kadar yakın olduğunu saptamakta güvenli bir indeks olarak kullanılabilir. Bu metot ilk olarak Thomas ve Tiranuchi tarafından ortaya konuldu [9,10]. Tekil değer ayrışımının hesaplama hızı arttı, Löf [11], Jakobien matrisinin seyrekliğini koruyarak minimum tekil değer hesaplaması için en hızlı algoritmayı geliştirdi.

İndirgenmiş Jakobien matrisi için özdeğer ayrışımı, köşegenleştirilebilir olduğu varsayılarak, 3.19 eşitliği tarafından belirtilmiştir. Burada Λ , λ_i özdeğerlerinin bir köşegen matrisidir, Φ ise indirgenmiş Jakobien matrisinin (J_R) sağ özvektör matrisidir ve Γ indirgenmiş Jakobien matrisinin (J_R) sol özvektörüdür. Φ_i ve γ_i sırasıyla Φ ve Γ matrislerinin i 'nci sütunudur. λ_i özdeğeri pozitiften negatife doğru değişebilen bir sayıdır.

$$J_R = \Phi \Lambda \Gamma = \sum_{i=1}^N \phi_i \cdot \lambda_i \cdot \gamma_i$$

(3.19)

Yük akışı Jakobien matrisinin analiz modelinde, eğer $\lambda_i > 0$ gösterilirse, i .nci gerilim

modeli ve i .nci reaktif güç değişimi modeli aynı yöndedir, Bu durum, sistemdeki gerilimin kararlı olduğunu gösterir. Diğer taraftan, eğer $\lambda_i < 0$ ise, i .nci gerilim modeli ve i .nci reaktif güç değişimi modeli zıt yöndedir, bu durum, sistem geriliminin kararsız olduğu gösterir. $\lambda_i = 0$ olduğunda i .nci gerilim modeli çöker çünkü reaktif güç modelindeki herhangi bir değişim, gerilim modelinde sonsuz bir değişime sebep olur [40,41]. Kararlı gerilim modeli koşulunda, bütün özdeğerler pozitifdir. Minimum özdeğer sıfıra yaklaşır ve sonunda negatif olduğu için sistem, gerilim kararlılığı durumundan gerilim kararsızlığı durumuna geçer. Bu yüzden minimum özdeğer, gerilim çökmesinde gerilim kararlılığı indeksi olarak kullanılabilir.

İndirgenmiş Jakobien matrisinin (J_R) yarı-simetri yapısından dolayı, tekil değerler ve tekil vektörlere ilişkin değerler ile özdeğerler ve ilgili özvektörlerin gerçek ve çok benzer olması beklenir. Minimum tekil değer ve minimum özdeğerin gerilim çökme problemlerinin statik analizleri için temelde benzer bilgiler sağladığı [7] nolu referansdaki çalışmada gösterilmiştir. Bu iki indis lineer olmayan kuvvetli yük değişimidir ve sistemin kararlılık sınır noktasına ne kadar yakın olduğu hakkında çok bilgi sağlamaz. Çeşitli gelişmelere rağmen, [8] nolu referansta kullanılan test fonksiyonu gibi, hesaplanan değerlerin düşürülmesi önerilebilir, Jakobien matrisinin minimum özdeğeri ve tekil minimum özdeğeri çözüm hesabı, çevrimiçi uygulamalar için hala çok talep edilen hesaplamadır.

3.3.2 Duyarlılık faktörü

Duyarlılık faktörleri, enerji güç sistem planlaması yapılırken yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü gerilim kararlılığı indisleri verimlilik hesabı ve onların basitliğinden dolayı gerilim kararsızlığını saptar [6]. Özdeğerler ve tekil değerler statik gerilim çökmesi problemlerinde yakınlık saptamada yetersiz olmalarına rağmen, duyarlılık faktörlerinin teorik olarak kanıtını sağlayabilirler. 3.17 ve 3.18 eşitliklerinden

3.20 ve 3.21 eşitliklerini elde edebiliriz, burada Φ_k ve γ_k sırasıyla Φ ve γ 'nin k.ıncı elemanıdır.

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_r \cdot \gamma_i}{\lambda_i}$$

(3.20)

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta Q_k} = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_{rk} \cdot \gamma_{ik}}{\lambda_i}$$

(3.21)

Minimum özdeğer sıfıra yakın olarak alınır ve VQ duyarlılık faktörünün işareti değiştirilir, bu gerilim koşulunun “kararsız” olduğunu gösterir. Her bir yük barasının P-V ve veya Q-V eğrileri incelenerek, eğrilerin çıkıntılarının üst kısmı boyunca P-V ve Q-V duyarlılık artışı gözlemlenebilir. Teorik olarak ulaşılan çıkıntı noktasındaki sonsuzluk, sınır kararlılık noktasıdır ve statik gerilim analizi tarafından çatallaşma düğümü için sıkça kontrol edilmektedir..

Q-V duyarlılık faktörü için çeşitli temel indisleri önerilmektedir. [42,43] Benzer bir şekilde Reaktif talebiyle ilgili olarak Reaktif kuşaktaki marjinal değişimler ve reaktif güç kayıplarına karşı gerilim değişimi, marjinal gerilim kararsızlık değişimlerini önlemek için yakınlık indeksi olarak kullanılmıştır [6,44].

Başka metotlara kıyasla, duyarlılık faktörü temel indisleri hesaplamak daha kolaydır. Bu metot koruma rölelerinde iyileştirici etkileri başlatmayı otomatik olarak gerçekleştirebilir. Örneğin, gerekli sistem kurulduğu takdirde, yük akıtmak ve kapasitör gruplarını anahtarlama, gerilim kararsızlığını azaltmak, başarı ile yapılabilmektedir. Bununla birlikte, bu indisler sınır kararlılık noktasına olan mesafeyi kolayca bulmaz ve gerilim çökmesinden daha çok zarar gören yük bölgelerinin tam yerini veremez. Bu temel-indisleri düzeltme çalışmaları için eşik ayarları tanımlamak zordur. Ayrık kontrol cihazlarının çalışması, LTC transformatörü ve kapasitör anahtarlama grupları gibi sistem elemanları, duyarlılık indislerinde süreksizliğe sebep olabilir ve güvenilirlikleri azalabilir.

3.3.3 Çoklu yük akışı çözümlerinin varlığı

Normal şartlar altında yük akışı eşitliklerinin mümkün olan iki çözümü vardır. Bunlardan biri, güç sisteminin doğru işlemsel noktasına ilişkin çözümlerdir. Var olan çözümlerin sayısı 2 den 1 e değişebilir, örneğin sistem işletim noktası yaklaşımların kararlı sınır noktasında yalnızca bir çözüm vardır. P-V/Q-V eğrileri bu olayları göstermek için kullanılabilir, bu da [12] da doğrulanmıştır.

Yazarlar üç kriterden oluşan çok seviyeli analiz teknikleri vasıtasıyla gerilim kararlılığı ve çoklu yük akışı çözümleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır [12]. Eğer sadece bu üç kriter, gerilim kararlılığını gösteriyorsa sistem gerilimi kararlıdır. Tamura, bir gerilim kararsızlığı yakınlık indisi (VIPI) hesaplamak için çift yük akışı çözümü kullanmıştır [13].

Gerilim kararlılığı indekslerine bağlı olan çoklu çözüm yönteminin başlıca engeli, alçak gerilim çözümlerinin hesaplanması ve sınır değerinde kararlılık noktası için yük akışı ıraksamasından kaçınmasıdır. Alçak gerilim çözümleri hesaplanmasında gelişmiş çeşitli metotlar önerilmesine rağmen, hala zorluklar vardır. Ayrıca, çevrimiçi uygulamalar için bu indisleri hesaplama talebi oldukça çoktur.

3.3.4 Yük akışı fizibilitesi

[14] de, yazarlar bir gerilim kararlılığı indeksini “L” göstergesi ile adlandırmışlardır. “L” göstergesinin hesabı, 3.22 eşitliğinde gösterildiği gibi genel enerji sistemi eşitliklerine dayanır. Burada baralar, generatör barası ve generatör olmayan bara olmak üzere, iki kategoride sınıflandırılmıştır. 3.22 eşitliği, 3.23 eşitliğinde tekrar formüle edilebilir, burada matristeki F_{LG} 3.24 eşitliğinde gösterilmiştir.

Bir tek yük barası “L” göstergesi 3.25 eşitliğinde gösterilmiştir, burada α_G generatör baralarının numarasıdır ve sistem “L” ibresi 3.26 eşitliğinde gösterilmiştir [14].

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix}$$

(3.22)

$$\begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix}$$

(3.23)

$$F_{LG} = -Y_{LL}^{-1} Y_{LG}$$

(3.24)

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\alpha_G} F_{ji} \cdot V_i}{V_j} \right|$$

(3.25)

$$L_{sys} = \text{MAX}_{\alpha_L} \{L_j\}$$

(3.26)

“L” gösterge değişimleri, 0 (sistem yüksüz) ve 1 (gerilim çökmeleri) aralığındadır. Y matrisinin ihmal edilen gerçek kısmı tarafından basitleştirilmiş “L” göstergesi [15] de sunulmuştur ve gerilim çökmelerini önlemek amacıyla belirli bölgelerde kısa süre elektriği kesmek için “L” göstergesi uygulamaları gösterilmiştir.

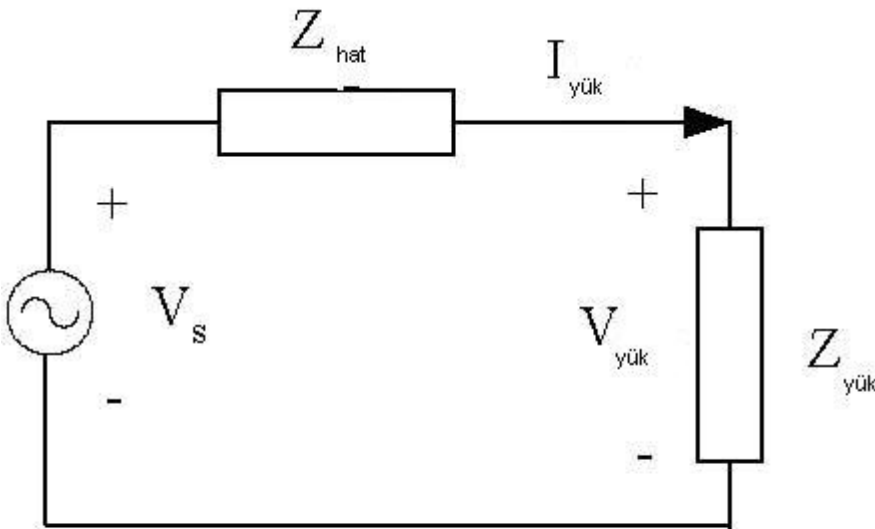
“L” gösterge türetimi, tek yük barasının yük akışı fizibilitesine dayalıdır. İki-baralı sistemde, gösterge tarafından tahmin edilen gerilim çökme noktasının, güç akış Jakobien matrisinin tekil olduğu noktaya, denk geldiğini gösterilmektedir [15]. “L” gösterge metodunun avantajı, buradaki indeksin çok kolay hesaplanabilmesi ve sadece sistem Y matrisinin bilgisini ve generatör bara gerilim değerlerinin gerekmesidir. Ek olarak, Maksimum L gösterge değerine karşılık gelen en büyük L göstergeli yük barası, gerilim

düşmelerinde en çok zedelenen yük barası şeklinde tanımlanır.

Bununla birlikte, “L” gösterge çıkışı gerilim çökmesine olan uzaklığı tam “okunabilir” biçimde bulamaz. Sonuç olarak, iyileşme hareketleri başlaması için göstergenin eşik değerinin seçiminin saptanması zordur ve oldukça öznelidir [15].

3.3.5 Thevenin eşdeğer empedansı

Bir enerji güç sistemi, , Thevenin eşdeğer devresi olarak, Şekil 3.3 de gösterildiği gibi basit bir eşdeğer devresi olarak verilebilmektedir. Sistemde, toplam Thevenin eşdeğer empedans değerinin, yük empedans değerine eşit olduğu durumda $(|Z_{yük}| = |Z_{hat}|)$ transfer edilen kompleks güç maksimum olur. Yük merkezinin arkasındaki Thevenin eşdeğer empedansı büyüklüğünün, yük eşdeğer empedansının büyüklüğüne olan oranına dayanan gerilim kararlılığı indeksi, yazar tarafından sunulmuştur [16,17]. Gerilim sınırı, kararlılık noktası oranı 1 e eşit olduğunda tanımlıdır.



Şekil 3.3 Thevenin eşdeğer devresi

Lokal koruma aygıtlarındaki uygulamalar için fizibilite ve basitliğinden dolayı bu metot cazip görünür. Çeşitli yöntemler kullanılarak, $Z_{yük}$ yük empedansı kolaylıkla hesaplanabilir. Bununla birlikte, yük barası arkasında kaynak empedansı ve hat empedansı içeren V_s ve Z_{hat} nin nasıl doğru olarak hesaplanması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Thevenin eşdeğer empedansı hesabı için, tekrarlanan en küçük kareler tekniği (RLS) içeren metotlar önerilir, fakat hala doğruluk ve hız açısından geliştirilmeye gereksinim vardır. [17]

3.3.6 Yük sınırı

Gerilim çökmesine sebep olan ek yükün miktarını veren, en doğru ve makbul indeks yük sınırıdır. Yük sınırı; doğru metotlar, süren yük akışı metotları, çoklu yük akışı çözümlerine dayanan metotlar ve optimizasyon metotları gibi, farklı metotlar kullanılarak elde edilebilir. Lineer olmayan eşitliklerin (2.18) çözümü gibi gerilim çökme (eğer-düğüm çatallaşmaları) noktalarını doğrudan hesaplayan metot Çökme Noktası olarak adlandırılır. Bulunan Jakobien matrisi sıfırdır ve bunun sağ ya da sol özvektörü sıfır olmayan vektördür.

Geliştirilmiş Newton-Raphson' a dayanan yük akışı, sürekli yük akışı olarak adlandırılır. [45] Bu yöntem, önceden de tanımlandığı gibi, maksimum yüklenme noktası hesabında da kullanılabilir. Yazarlar, yük akışı çözüm çiftinin bilgilerine dayanan yük sınır hesabında, yeni metot sunmuşlardır [46]. Yük sınırı, yük enjeksiyon değişikliklerinin minimum Euclidean mesafesi içinde, yüklenebilme sınırındaki nokta olarak tanımlıdır. Tanımlanan maksimum yük artma miktarı ile yük sınırı bulmak için sırasıyla, amaç fonksiyon ve yük akışı eşitlikleri, generatör reaktif sınırları eşitliği ve eşitsizlik kısıtlamaları gibi optimizasyon metotları önerilmiştir [18]. [19] de gösterildiği gibi, yük sınır metodunun çok ciddi dezavantajı yüksek hesaplama maliyetidir. Bir diğer dezavantaj ise, yük artışı yönünün, sıkça elde etmesi kolay olamayan yük sınır hesabında, varsayımlar gerektirmesidir.

3.3.7 Gerilim

Gerilim değeri, gerilim kararlılığını ölçmek için muhtemelen en basit ve en sezgisel indekstir. Sistem gerilimi; enerji işletmecileri tarafından, gerilim çökmesini önlemek için düşük gerilimde aşırı yükleri kaldırmak için elektriği kesme gibi iyileştirici etkileri başlatmak için bir indeks olarak yaygınca kullanılır. Çeşitli gerilim tabanlı enerji dağıtım istasyonlarındaki aşırı yükü kaldırmak için, belirli bölgelerde kısa süre elektriği kesme projeleri uygulanır. Düşük gerilim, sabit zaman gecikmesi ve düşük gerilim enerji kesilmesinde ters zaman gecikmesi içerir, bu da dijital röleler tarafından kolayca

halledilir, bu röleler fazla ek bir maliyeti olmadan sahada kurulur [20,21]. Tipik olarak, nominal gerilimin, gerilim eşiği 85%-90% arasında belirlenir. Azaltılabilen yük, simülasyonlarda sabit miktar olarak önceden seçilebilir. Enerji işletim şirketleri tarafından kullanılan, üç aşamalı düşük gerilimde aşırı yükü kaldırmak için, kısa süreliğine elektrik kesilmesinin diyagramı Tablo 3.2 de gösterilmiştir [20].

Tablo 3.2 Düşük gerilim aşırı yükü kaldırmak için kısa süreliğine elektrik kesilmesinin proje örnekleri

	Gerilim eşiği (en düşük nominal gerilim değeri altında)	Zaman Gecikmesi	Akıtılan yükün miktarı
Aşama 1	10%	3.5 saniye	5%
Aşama 2	8%	5 saniye	5%
Aşama 3	8%	8 saniye	5%

İndekse dayalı gerilimin sınırlaması, rakamlarla ifade edilemeyen gerilim kararlılık sınır noktası mesafesidir. P-V eğrisi ile negatif güç faktörü Şekil 3.2 de gösterilmiştir. Bir güç sisteminde; güç transferi, sistem iletim sınırı ile sistem gerilim kararlılık sınır noktasına yakın olsa bile, ağır reaktif güç dengelemesi, önemli gerilim çökmesi göstermeyebilir. Ek olarak, üretim barasındaki gerilim ile en düşük gerilim, gerilim çökme noktasına en yakın değer olmak zorunda değildir. Buna bağlı olarak, önceden seçilen düşük gerilimine dayalı aşırı yükü kaldırmak için kısa süreliğine elektriğin kesilmesi, optimal gerilim kararsızlığını hafifletme için kesin çözüm değildir.

3.3.8 Reaktif güç rezervi

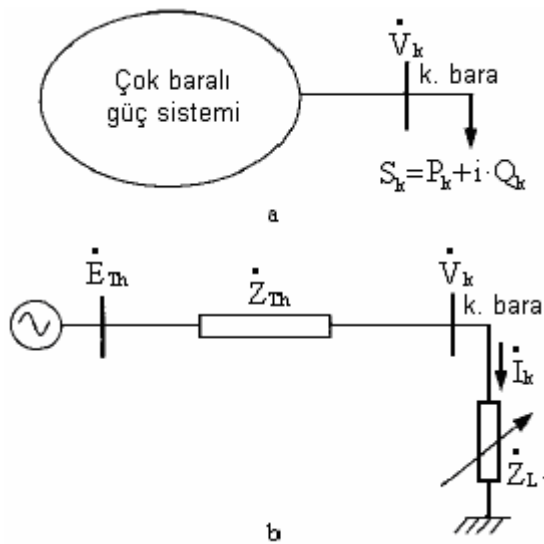
Güç sistemi gerilim çökmesi çoğunlukla, generatörler ve SVC ler gibi bazı reaktif güç kaynaklı aygıtlarının, kapasite limitlerine ulaşmasıyla ille olur. Güç sisteminin, yüksek reaktif güç çıktuları ve yedek düşük reaktif gücüne ilişkin emniyetsiz gerilimin, hassas göstergeleri vardır. Gerilim güvenlik değerlerinin göstergeleri gibi, güç sistemlerinde de, yedek reaktif güç ve reaktif güç tüketiminin, çevrimiçi kontrolü önerilir [22]. Sistem operatörlerinde, sistem gerilim güvenliği derecesinin öğrenilen indeksi, yedek reaktif güçtür. Gerilim çökmesi yüzünden zayıf olan güç sisteminin teşhis edilen bölümünde kullanılabilir.

[24] de, yazarın ifade ettiği gibi, sistemdeki, yedek reaktif güç seviyesi tespiti yapılarak, gerilim çökmesini önlemek için, uygun seviyenin eşik değerini belirlemek zordur. Çünkü sistem çalışma koşullarında mümkün olan risklere bağlı olarak SVC ler ve generatörlerin, yedek reaktif gücü gereklidir. Ek olarak, operatörün daha etkin çalışabilmesi için kararsızlık olaylarının yeterince yavaş olması gerekir.

BÖLÜM 4. GÜÇ SİSTEMİ THEVENİN PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

4.1. Giriş

Çok baralı bir güç sistemi, tek kapılı bir devre olan Thevenin eşdeğer devresi ile sembolize edilebilmekte olup, çeşitli çalışmalarda bu yöntem izlenmiştir. Bu yaklaşımda N baralı güç sistemi bir Thevenin kaynağı ve ona seri bir Thevenin Empedansı ile sembolize edilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 N Baralı güç sisteminin Thevenin eşdeğeri

Birçok uygulamada bara admitans matrisi üzerinden gidilerek Z_{Th} elde edilmiştir. E_{Th} gerilimi ise yük akışı yapılarak elde edilmiş ve yapılacak değerlendirmeler bu işlemlerden sonra yapılmıştır. Bu durum her bir değerlendirme öncesinde çok sayıda yerel parametre ölçümü, matris işlemi ya da yük akışı operasyonu gerektirmektedir.

Dolayısı ile sağlanacak kolaylıklar işlem kalabalığı nedeniyle çekici olmanın dışında kalmıştır.

Son zamanlarda, araştırmacılar güç sistemlerinin Thevenin eşdeğerinin bulunması için çeşitli yöntemler önermişlerdir. Bunlardan sadece yerel bara parametrelerinin kullanımı ile Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin bulunmasına yönelik olanlar kullanım kolaylığı nedeniyle çekici olmaktadır [47]. Bu yaklaşımlar test edildiğinde oluşturulan denklem takımlarının parametrelere karşı aşırı duyarlılığı ve endüktif yüklü gerçek çalışma şartlarında hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Temelde Şekil 4.1’de verilen eşdeğer devre için yapılabilecek iki yaklaşım dikkati çekmektedir. Bunlardan ilki [47]’de verilen;

$$\dot{E}_{Th} = \dot{V}_k + \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_k \quad (4.1)$$

Kirchoff gerilim ifadesidir. Bu ifade gerçek ve sanal kısımlar ayrılıp birbirine eşitlenerek 2 gerçek sayılardan oluşan denklem takımı elde edilebilir. Bu iki denklem 4 bilinmeyen içerdiğinden analitik çözüm mümkün olamamaktadır. Ayrıca bu denklem takımı kullanılarak yapılan kestirimlerde, çözümün daha ziyade kapasitif çalışma bölgesinde doğru kaldığı ve çözümün sistemin çalışma şartlarına duyarlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, güç blançosu üzerinden gidilerek oluşturulan kestirim denklemleri kullanılmış ve güç sistemlerinde yaygın çalışılan endüktif çalışma şartlarında daha doğru kestirimler yapılmıştır.

4.2. Thevenin Parametrelerinin Kestirimi için Önerilen Yöntem

Şekil 4.1’de verilen güç sistemindeki aktif güç bilançosu;

$$P_s = P_{loss} + P_k \quad (4.2)$$

ve reaktif güç blançosu ise

$$Q_s = Q_{loss} + Q_k \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. 4.2 ve 4.3 eşitlikleri devre parametreleri cinsinden

$$E_{Th} \cdot I_k \cdot \cos \psi = I_k^2 \cdot R_{Th} + P_k \quad (4.4)$$

$$E_{Th} \cdot I_k \cdot \sin \psi = I_k^2 \cdot X_{Th} + Q_k \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ψ ; E_{th} 'den I_k 'ya çizilen açıdır.

4.4 ve 4.5 Eşitliklerinin I_k 'ya bağımlılığını azaltmak için bu ifadeler I_k ile bölünür ise;

$$E_{Th} \cdot \cos \psi = I_k \cdot R_{Th} + \frac{P_k}{I_k} \quad (4.6)$$

$$E_{Th} \cdot \sin \psi = I_k \cdot X_{Th} + \frac{Q_k}{I_k} \quad (4.7)$$

kestirim süreci için parametrelere daha az duyarlı bir çözüm takımı elde edilir.4.6 ve 4.7 ifadelerinde gerilim ve akımlar skaler büyüklüklerdir. 4.6 ve 4.7 İfadelerinde

$$N = E_{Th} \cdot \cos \psi ; M = \frac{P_k}{I_k} \quad (4.8a,b)$$

$$K = E_{Th} \cdot \sin \psi ; L = \frac{Q_k}{I_k} \quad (4.9a,b)$$

şeklinde değişken dönüşümü uygulanır ise;

$$N = I_k \cdot R_{Th} + M \quad (4.10)$$

$$K = I_k \cdot X_{Th} + L \quad (4.11)$$

kestirim için kullanılacak, gerçek çalışma şartlarındaki parametrelere daha az duyarlı 4 bilinmeyenli iki denklem takımı elde edilir.

4.10 ve 4.11 ifadelerinden 4 bilinmeyen doğrudan çözümü mümkün değildir. Bu amaçla Thevenin eşdeğeri belirlenecek k barasında, ardıl ölçümler alınarak farklı çalışma şartlarına ait bir ölçümden iki ilave denklem daha eklenmesi durumunda elde edilecek 4 denklemden, 4 bilinmeyen çözümlür hale gelir. Sistemi tekil hale getirecek ölçüm değerleri tasnif dışı tutulacaktır.

K barasında yapılacak ilk ölçümü (1) ve ikinci ölçümü (2) indisi ile belirterek 4.10 ve 4.11 ifadeleri matrisel formda yazılır ise;

$$\begin{bmatrix} 1 & -I_{k1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -I_{k1} \\ 1 & -I_{k2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -I_{k2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K \\ X_{Th} \\ N \\ R_{Th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ L_2 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

elde edilir. Bu ifade aşağıdaki şekilde kapalı biçimde yazılabilir:

$$[A] \cdot [x] = [B]$$

Burada;

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & -I_{k1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -I_{k1} \\ 1 & -I_{k2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -I_{k2} \end{bmatrix}; [x] = \begin{bmatrix} K \\ X_{Th} \\ N \\ R_{Th} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ L_2 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (4.13a,b,c)$$

4.12 İfadesinin çözümü

$$[A]^{-1} \cdot [A] \cdot [x] = [A]^{-1} \cdot [B]$$

$$[x] = [A]^{-1} \cdot [B] \quad (4.14)$$

olacaktır. $[x]$ bilinmeyen vektörü hesaplandıktan sonra vektör bileşenleri kullanılarak;

$$E_{Th} = \sqrt{x_{11}^2 + x_{31}^2} \quad (4.15)$$

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{x_{11}}{x_{31}}\right) \quad (4.16)$$

$$Z_{Th} = \sqrt{x_{21}^2 + x_{41}^2} ; R_{Th} = x_{41} ; X_{Th} = x_{21} \quad (4.17)$$

$$\alpha = -\tan^{-1}\left(\frac{x_{21}}{x_{41}}\right) \quad (4.18)$$

olur. Fakat E_{Th} değerini sağlayan çok sayıda empedans ve açı değeri olacağından, kestirim algoritması eşitliği sağlayan keyfi empedans ve açı değerlerini almaktadır. Bu durumda, kestirim algoritması, empedansın açısı α 'nın yerine, denklemi çözecek şekilde keyfi olarak φ açısını atamakta ve Z_{Th} değeri hatalı olarak bulmaktadır. Kestirim algoritması bu hatanın dışında, özellikle E_{Th} 'ı çok küçük bir hata ile belirlemektedir. Bu sonuçtan sonra, Z_{Th} 'ın bulunması için ek denklemler oluşturulmalıdır.

Şekil 4.1'deki devreye ilişkin fazör diyagram Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu fazör diyagramda;

$$\overline{CF} = V_k \cdot \cos(\varphi) \text{ ve } \overline{DF} = V_k \cdot \sin(\varphi) \text{ 'dir.}$$

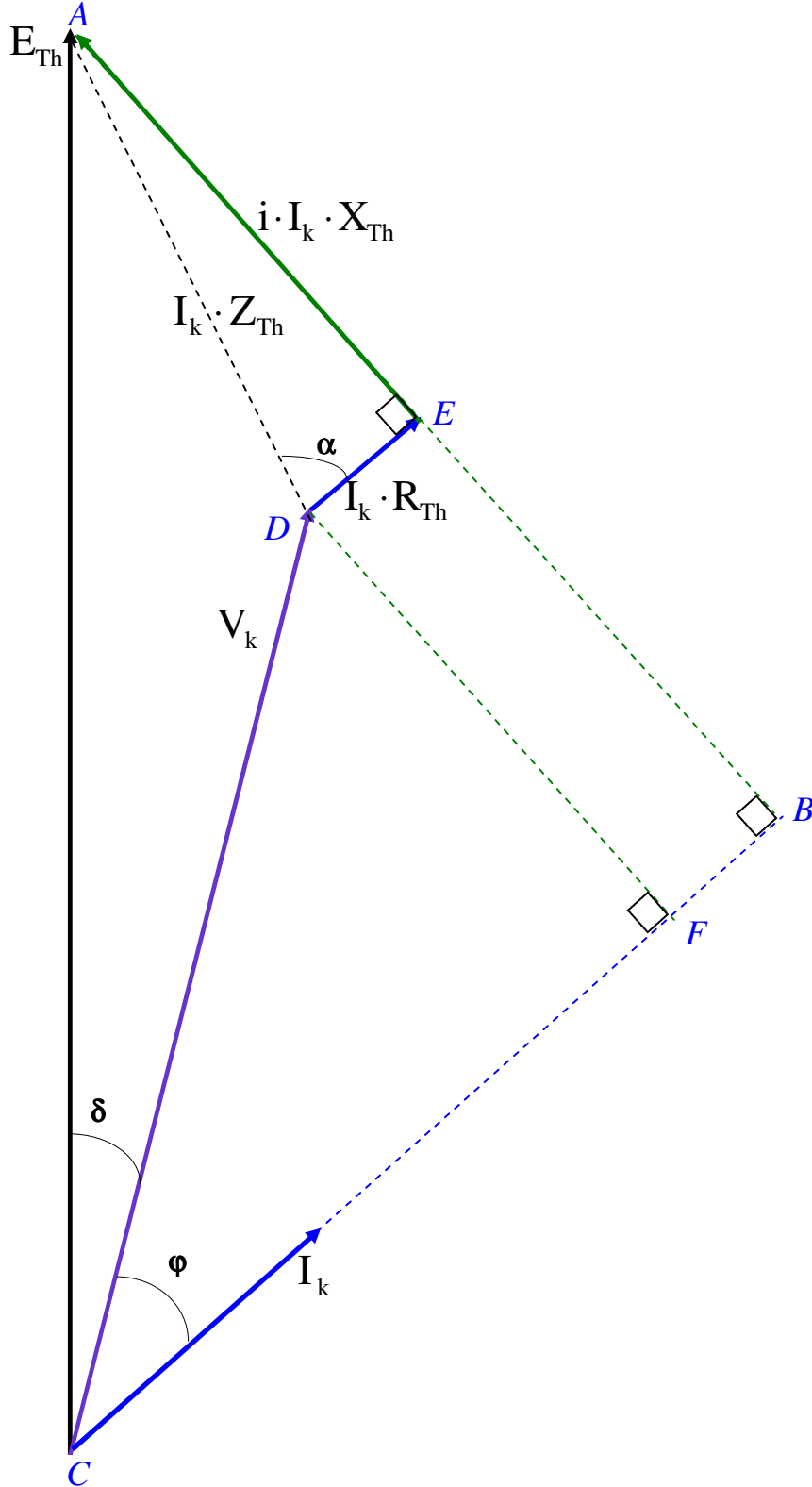
Diyagramda $\overline{DE} // \overline{FE}$; $\overline{DF} // \overline{EB}$ yardımcı ışınları çizilip, ABC üçgenine Pisagor eşitliği uygulanırsa;

$$\begin{aligned} (\overline{CF} + \overline{FB})^2 + (\overline{BE} + \overline{AE})^2 &= (\overline{AC})^2 \\ (V_k \cdot \cos(\varphi) + I_k \cdot R_{Th})^2 + (V_k \cdot \sin(\varphi) + I_k \cdot X_{Th})^2 &= E_{Th}^2 \end{aligned} \quad (4.19)$$

yazılır.

$$R_{Th} = Z_{Th} \cdot \cos(\alpha) \text{ ve } X_{Th} = Z_{Th} \cdot \sin(\alpha)$$

olduğu bilindiđinden;



Şekil 4.2 Fazör diyagram

$$(I_k^2) \cdot Z_{Th}^2 + (2 \cdot V_k \cdot I_k \cdot \cos(\alpha - \varphi)) \cdot Z_{Th} + (V_k^2 - E_{Th}^2) = 0 \quad (4.20)$$

polinomu oluşturulabilir.

Günümüzde kullanılan enerji iletim hatları için α açısı 70° ila 90° arasındadır. Yapılacak ilerideki simülasyon çalışmalarında α açısı ortalama olarak 80° alınmış olup, bu değer ile Z_{Th} 'ın değeri %1 hata sınırı içerisinde belirlenebilmiştir. Polinomun pozitif ve küçük değerli kökü Z_{Th} olarak alınır ise bu ilave çözüm ile Z_{Th} doğru olarak belirlenmiş olur.

Bu aşamaya kadar yapılan kestirimler ile E_{Th} ve Z_{Th} doğru olarak belirlenmiştir. Kararlılık analizlerinde yaygın olarak kullanılan yük açısı δ 'nın tespiti de yine Şekil 4.2'de verilen fazör diyagram içi trigonometrik ilişkilerden;

$$\delta = a \cos\left(\frac{E_{Th}^2 - I_k^2 \cdot Z_{Th}^2 + V_k^2}{2 \cdot E_{Th} \cdot V_k}\right) \quad (4.21)$$

olarak bulunur. Burada k. baraya doğru olan besleme yapıldığı yaklaşımı yapıldığından δ pozitif çıkacaktır.

Verilen kestirim ifadeleri ve fazör diyagramdan yazılan ilave eşitlikleri kullanılarak çok baralı bir güç sistemini sembolize edecek Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin hepsi (4.15 - 4.21) eşitlikleri ile kestirilmiş olur.

Bu yaklaşım ile k. bara gerisinde kalan baralardaki yük değişimleri, açma-kapama olayları, generatör reaktif güç sınır değerlerinden kaynaklanan yetmezliklerin tamamı, sadece k. baradaki yerel ölçümler ile belirlenir.

Bir sisteme ait Thevenin eşdeğer devresinin belirlenmesi, o sistemden çekilebilecek güç sınırları hakkında kesin bilgi sağlayacaktır. Zira yaygın bilinen maksimum güç transferi ilkelerinin, bu basit eşdeğer devre üzerinde değerlendirilmesi oldukça kolaydır.

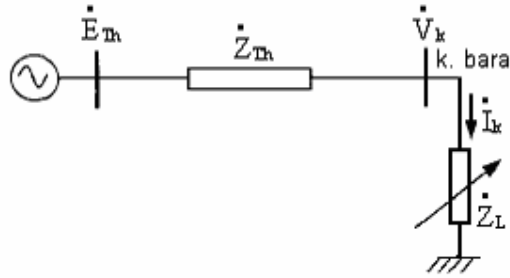
BÖLÜM 5. GERİLİM KARARLILIĞI SINIRLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Giriş

Gerilim kararsızlığına neden olan başlıca etmenler; doğrusal olmayan yükler ve bu yüklerin talep ettiği güçlerin güç sistemi tarafından tedarik edilememesidir [16]. Dolayısı ile gerilim kararsızlığı sınırının araştırıldığı baraya (örneğin k. bara) transfer edilebilecek maksimum güç değeri, inceleme yapılan baradaki gerilim kararsızlık noktasını belirleyecektir. Bu maksimum güç transfer noktası, Bölüm 2-3’de bahsedilen çeşitli gerilim kararlılığı inceleme yöntemlerindeki nokta ile aynıdır. Diğer bir deyişle, maksimum güç transfer anı, Jacobian matrisin tekil olduğu ya da klasik P-V, Q-V eğrilerinin çatallaştığı dirsek noktasına karşılık gelmektedir.

5.2. Maksimum Güç Transferi

Bu başlıkta, Güç sisteminin herhangi bir barasında gerilim kararlılığı yada gerilim kararsızlık sınırının değerlendirilmesi için, güç sisteminin aktarabileceği maksimum gücün bağlı olduğu yük değerleri belirlenecektir.



Şekil 5.1 Güç sisteminin Thevenin eşdeğeri ile beslenmiş yük

Öncelikle gerilim kararlılığı sınırının araştırılacağı bara arkasında kalan güç sisteminin Şekil 5.1'de verilen basitleştirilmiş tek kapılı bir Thevenin eşdeğer devresi şeklinde basitleştirelim. Şekil 5.1'deki devrede akım;

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_{Th}}{\dot{Z}_{Th} + \dot{Z}_L} \quad (5.1)$$

yükün görünür gücü;

$$\bar{S}_L = \bar{Z}_L \cdot \bar{I} \cdot \bar{I}^* = \bar{Z}_L \cdot |\bar{I}|^2 \quad (5.2)$$

Olur. 5.1 ifadesi 5.2'de yerine yazılır ise;

$$\bar{S}_L = \bar{Z}_L \cdot \left| \frac{\bar{E}_{Th}}{\bar{Z}_{Th} + \bar{Z}_L} \right|^2 \quad (5.3)$$

elde edilir. Empedanslar kutupsal koordinat sisteminde yazılır ise;

$$\bar{S}_L = \bar{Z}_L \angle \alpha \left| \frac{\bar{E}_{Th}}{\bar{Z}_{Th} \angle \beta + \bar{Z}_L \angle \alpha} \right|^2 \quad (5.4)$$

elde edilir. Sadeleştirme yapılır ise;

$$S_L = \frac{E_{Th}^2 \cdot Z_L}{|Z_{Th} \angle \beta + Z_L \angle \alpha|^2} \quad (5.5)$$

elde edilir. Yük üzerindeki görünür gücü maksimum yapan yük empedansının belirlenmesi için, gücün yük empedansına göre kısmi türevi alınıp sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial S_L}{\partial Z_L} = \frac{E_{Th}^2 \cdot (Z_{Th}^2 - Z_L^2)}{[Z_{Th}^2 + Z_L^2 + 2 \cdot Z_{Th} \cdot Z_{LO} \cdot \cos(\beta - \alpha)]^2} = 0 \quad (5.6)$$

Çözümünden elde edilecek yük empedansı, güç sisteminin Thevenin eşdeğerinden çekilebilecek maksimum gücü ilişkin yük empedansı olacaktır. Diğer bir deyişle, yük empedansının daha küçültülmesi, yüke transfer edilen gücü arttırmayacaktır.

$$Z_{Th}^2 - Z_L^2 = 0 \quad \text{veya} \quad Z_L = Z_{Th} \quad (5.7)$$

5.7 Eşitliği ile elde edilen çözüm, yük empedansı genliğinin güç sistemine ilişkin Thevenin empedansı genliğine eşit olduğu noktada, güç sisteminin yüke maksimum güç transfer edeceğini göstermektedir.

Bu yaklaşım ile güç sistemine ilişkin Thevenin empedansının bilinmesi halinde, gerilim kararsızlığına neden olacak maksimum güç transfer noktası bilinmiş olacaktır. Yük empedansının belirlenmesi kolay olduğundan, sadece Thevenin empedansının bilinmesi ile gerilim kararlılığı indisleri ya da marjinleri türetilenilecektir.

5.3 Maksimum Güç Transferi Yaklaşımı ile Gerilim Kararsızlık Sınırının Benzetimle İncelenmesi

Şekil 5.1'deki devrede per unit değerler cinsinden;

$$E_{Th} = 1, R_{Th} = 0.08 \text{ ve } X_{Th} = 0.4$$

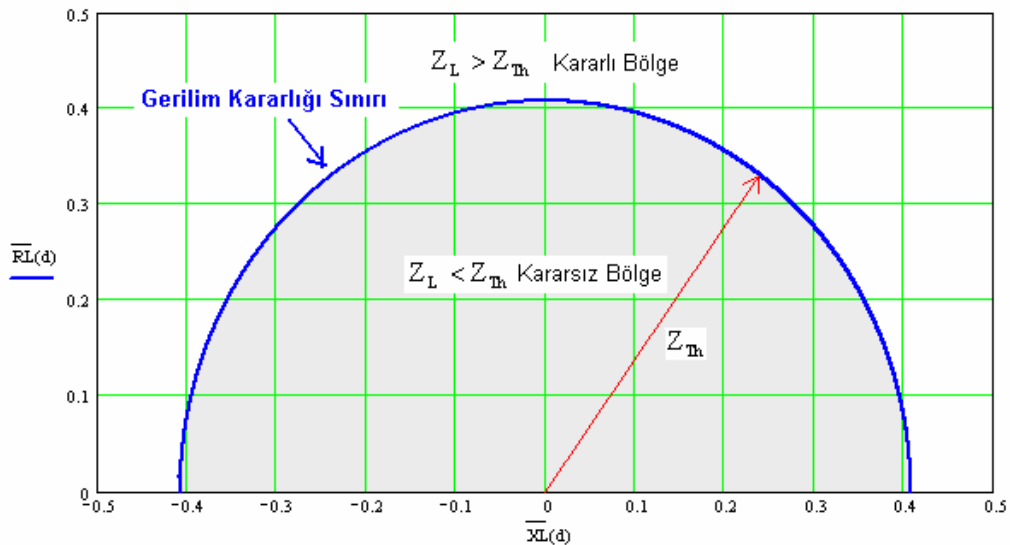
alınarak MathCAD yazılımında yapılan benzetim sonuçları Şekil 5.2-5.6'te verilmiştir.

5.3.1 Kritik yük empedans ve admitansının değerlendirilmesi

Yük üzerinde sürekli maksimum görünür gücün çekilebilmesi için $Z_L = Z_{Th}$ olması sağlanmalıdır. Bu durum, yükün R_L ve X_L bileşenlerinin değişmekle beraber, Z_L değerinin sürekli bir Z_{Th} yarı dairesi üzerinde bulunmasını gerektirir. Bu bağlamda, maksimum görünür gücü çekecek yük empedansı bileşenleri;

$$R_L = \sqrt{Z_{Th}^2 - X_L^2} \quad (5.8)$$

eşitliğini sağlamalıdır. Şekil 5.2’de $Z_L = Z_{Th}$ durumunda dairenin üstünde çalışma vardır ve maksimum güç transferi anına ya da gerilim kararlılığı açısından kararlılık sınırında çalışma anlamına gelmektedir. Dairenin dışı ($Z_L > Z_{Th}$) kararlı çalışma bölgesini, diğer taraftan dairenin içi ($Z_L < Z_{Th}$) ise kararsız çalışma bölgesidir. Şekil 5.2’de verilen empedans dairesi kriter olarak kabul edildiğinde, yük empedansı dairenin dışında kalacak şekilde çalışılmalıdır. Bu yaklaşım gerçek zamanlı gerilim kararlılığı monitöründe kullanıldığında, dairenin dışı ya da dairenin çok dışı gibi kavramlar görüntülemeyi zorlaştıracaktır.



Şekil 5.2 Yük empedansı genliğinin, güç sisteminin Thevenin empedansı genliğine eşit olması durumunda, yükün direnç ve reaktansının değişimi

Empedans dairesine benzer bir yapıda değerlendirme sağlamak ve gerçek zamanlı gösterime daha uygun bir yöntem olarak Şekil 5.3’de verilen admitans dairesi yaklaşımını önerilir.

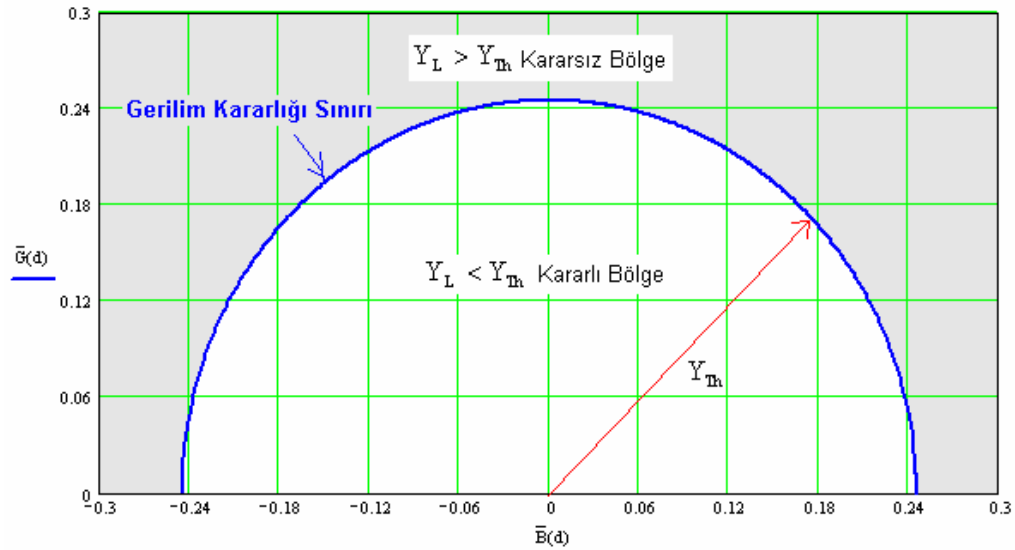
Admitans dairesi yaklaşımında maksimum güç transferi 5.7 eşitliğine benzer şekilde $Y_L = Y_{Th}$ anında olacaktır. Yük admitansı; iletkenlik ve suseptans bileşenleri cinden

$$Y_L = \sqrt{G_L^2 + B_L^2} \ ; \ G_L = \sqrt{Y_{Th}^2 - B_L^2} \quad (5.9a,b)$$

şeklinde yazılabilir.

Maksimum güç transferine ilişkin admitans daresi çizilirken, yük iletkenlik ve suseptansının ilişkisini sağlaması gerekir. Bu yaklaşımla MathCAD yazılım paketi kullanılarak çizilmiş admitans daresi Şekil 5.3’de verilmiştir.

Şekil 5.3’de $Y_L = Y_{Th}$ durumunda dairenin üstünde çalışma vardır ve maksimum güç transferi anına yada gerilim kararlılığı açısından kararlılık sınırında çalışma anlamına gelmektedir. Dairenin dışı ($Y_L > Y_{Th}$) kararsız çalışma bölgesini, diğer taraftan dairenin içi ($Y_L < Y_{Th}$) ise kararlı çalışma bölgesidir. Şekil 5.3’de verilen admitans daresi kriter olarak kabul edildiğinde, yük admitansı dairenin içinde kalacak şekilde çalışmalıdır. Bu yaklaşım gerçek zamanlı gerilim kararlılığı monitörü uygulamaları için daha kullanışlı olacaktır.



Şekil 5.3 Yük admitansı genliğinin, güç sisteminin Thevenin admitansı genliğine eşit olması durumunda, yükün iletkenlik ve suseptansının değişimi

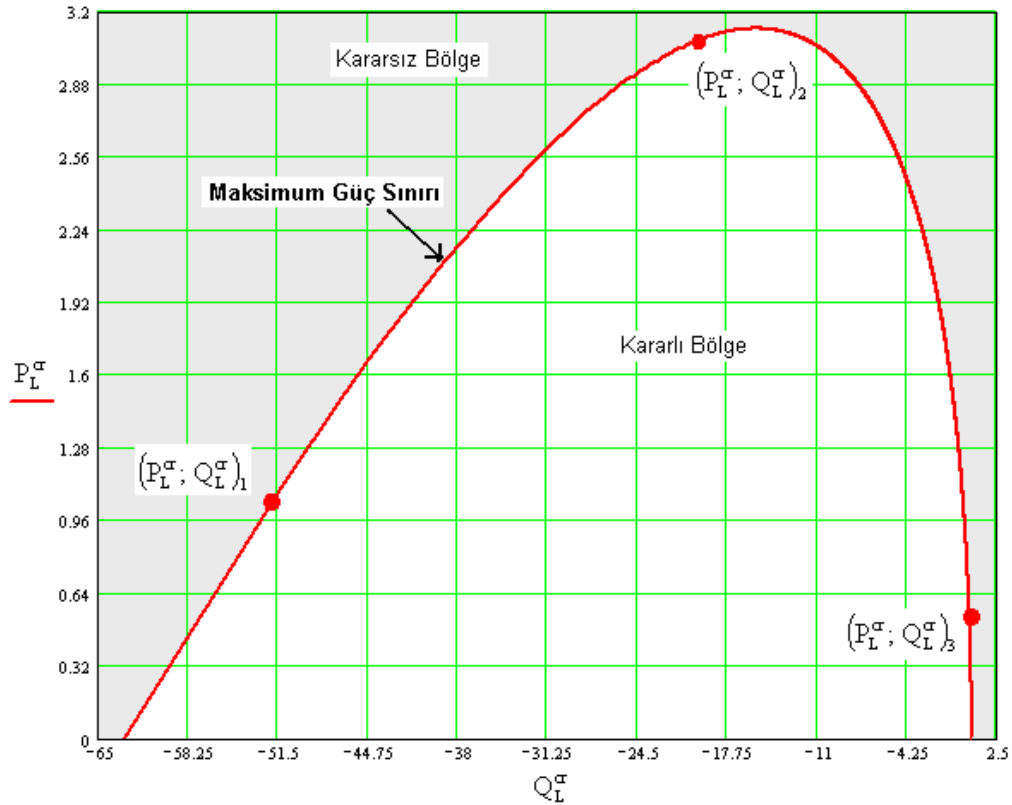
Bölüm 4’te verilen, çok baralı güç sistemine ait Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin kestirimine ilişkin yaklaşım kullanılıp, admitans diyagramı

çevrimiçi çizdirilerek, güç sistemlerinde çeşitli baralar için gerilim kararlılığı marjinleri izlenilebilir.

5.3.2. Kritik güçlerin değerlendirilmesi

5.3.1 Başlığı altında, maksimum güç transferini temin edecek şekilde, yük empedansı bileşenlerinin değişmekle beraber, genliğinin sürekli $Z_L = Z_{Th}$ tutarak yapılan benzetimler verilmiştir. Yük empedansının bileşenleri değiştiğinden dolayı yük üzerindeki; P_L , Q_L ve S_L değişecektir. Bununla beraber güç kombinasyonlarına ilişkin her bir çalışma noktası, gerilim kararlılığı açısından kritik bir nokta olacaktır. Zira sistem maksimum güç transfer edecek şartlarda işletilerek benzetim yapılmıştır.

Kritik aktif güçler (P_L^{cr}), kritik reaktif güçlere (Q_L^{cr}) karşı çizilir ise, son birkaç yıldır gerilim kararlılığı incelemelerinde kullanılan ve kritik çalışma noktaları ile teşkil edilmiş bir P-Q diyagramı elde edilir. 5.3 Başlığı altında verilen örneğe ilişkin P-Q düzlemi Şekil 5.4'de verilmiştir. Yapılan benzetimlerde iletim hattı ve kaynak için herhangi bir sınırlama uygulanmamış, ideal kabul edilmiştir.



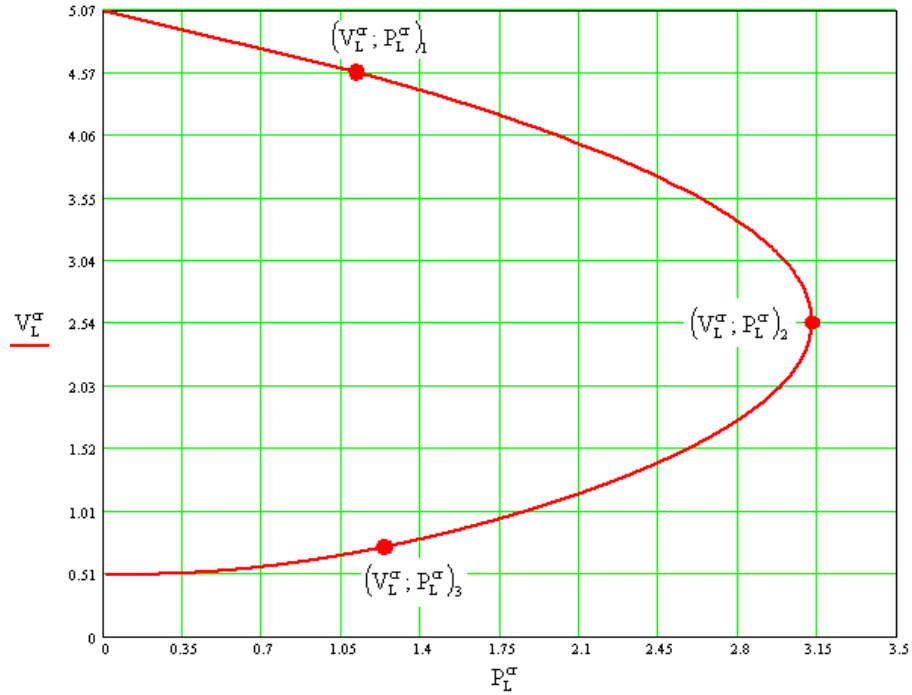
Şekil 5.4 Kritik P ve Q lar ile çizilmiş P-Q düzlemi ve kararsızlık sınırları

P-Q Diyagramı, klasik P-V ve Q-V eğrilerinden daha bütünleşik bir değerlendirme sağlamaktadır. $(P_L^{cr}; Q_L^{cr})$ 'ler ile çizilen alanın iç kısmı, yükün gerilim kararsızlığı oluşmadan çalışabileceği bölgedir. $(P_L^{cr}; Q_L^{cr})$ 'lerden oluşan sınır çizgisi ise maksimum güç sınırını vermektedir ve bu sınırın dışında güç sistemi artık transfer edilen gücü arttıramaz. Bu nedenle sınır çizgisinin dışında kalan bölge gerilim kararlılığı açısından kararsız bölgedir.

Bölüm 4'te verilen çok baralı güç sistemine ait Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin kestirimine ilişkin yaklaşım kullanılıp, P-Q diyagramı çevrimiçi çizdirilerek, güç sistemlerinde çeşitli baralar için gerilim kararlılığı marjini izlenilebilir.

5.3.3. Değiştirilmiş P-V ve değiştirilmiş Q-V eğrileri

5.3 Başlığı altında yapılan benzetimlerden elde edilen kritik gerilim ve kritik aktif güçler $(V_L^{cr}; P_L^{cr})$ bir diyagramda verilerek değiştirilmiş P-V ve değiştirilmiş Q-V eğrileri elde edilmiş olup, Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. Yapılan benzetimlerde iletim hattı ve kaynak için herhangi bir sınırlama uygulanmamış, ideal kabul edilmiştir.



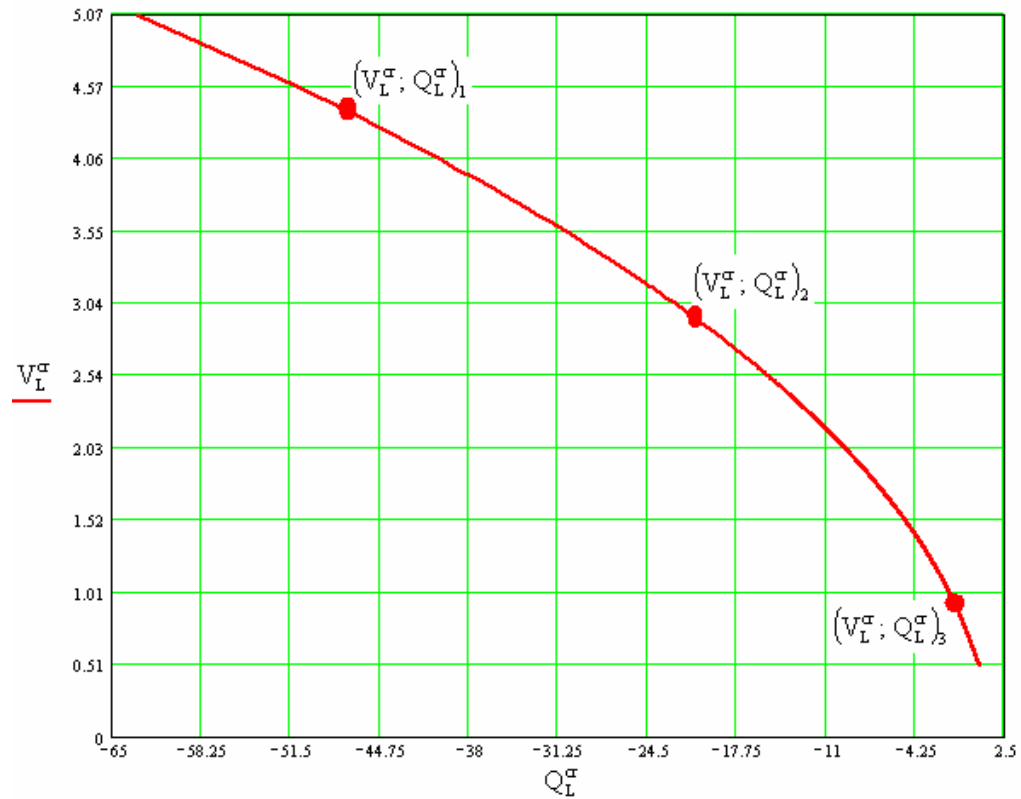
Şekil 5.5 Sürekli kritik görünür güç çekilmesi durumunda, kritik aktif güç ile kritik gerilim için çizilmiş, değiştirilmiş P-V eğrisi

Yukarıdaki değiştirilmiş P-V eğrisindeki $(V_L^{cr}; P_L^{cr})_2$ süreksizlik noktası, klasik P-V eğrilerindeki dirsek noktası ile aynı özellikte değerlendirilmemelidir. Zira bu eğri tüm güç faktörü çalışma bölgelerini için çizilmiş klasik P-V eğrisi dirsek noktalarının bileşkesi ile elde edilmiştir.

$(V_L^{cr}; P_L^{cr})_2$ noktası, yük kapasitif reaktansının Thevenin endüktif reaktansını yok ettiği anda transfer edilen maksimum aktif güce ilişkin çalışma noktasıdır. Diğer bir deyişle, bu noktada yük empedansı Thevenin empedansının eşleniğidir:

$$\left(\dot{Z}_L \right)^* = \dot{Z}_{Th} \quad (5.10)$$

Şekil 5.5’de verilen değiştirilmiş P-V eğrisinin dirsek noktası yapmasının sebebi, transfer edilen görünür gücün her noktada maksimum olması ve reaktif bileşenin tür değiştirmesidir. Dirsek noktası kapasitif yüklü çalışma bölgesi içerisinde kalmaktadır. Şekil 5.5 ve 5.6’da, kritik geriliminin en düşük değerinin 0.5pu olduğuna dikkat edilmelidir. Bu durum 5.4 konusu içerisinde yorumlanmıştır.



Şekil 5.6 Sürekli kritik görünür güç çekilmesi durumunda, kritik reaktif güç ile kritik gerilim için çizilmiş, değiştirilmiş Q-V eğrisi

5.4. Maksimum Güç Transferi Fazör Diyagramı

Şekil 5.1’deki eşdeğer devre, k. inceleme barası için oluşturulmuş Thevenin eşdeğer devresi olup, fazör diyagramın çiziminde esas teşkil edecektir. [49].

Bilindiği üzere fazör diyagramların çizilebilmesi için yeterli sayıda parametrenin bilinmesi gerekir. k. inceleme barasında yapılan ölçümlerden;

$$\dot{V}_k = V_k \angle 0 ; \dot{I}_k = I_k \angle \varphi ; \quad (5.11a,b)$$

ve P_k ; Q_k elde edilir. Yapılan ölçümler ve 4. bölümde verilen kestirim yöntemi ile;

$$\dot{E}_{Th} = E_{Th} \angle \delta ; \dot{Z}_{Th} = Z_{Th} \angle \alpha \quad (5.12a,b)$$

parametreleri kestirim ile belirlenir. K. bara için kısa devre akımı;

$$I_{k,sc} = \frac{E_{Th} \angle \delta}{Z_{Th} \angle \alpha} = I_{k,sc} \angle \delta - \alpha \quad (5.13)$$

olur. Kısa devre akımına ilişkin açılar Şekil 5.10'dan yapılan değerlendirme ile

$$-\beta = (\delta - \alpha) + \varphi \quad (5.14)$$

şeklinde bir tanımlama yapılabilir. Thevenin empedans üçgeni iç açıları toplamından;

$$\alpha + \gamma = 90^\circ \quad (5.15)$$

Şekil 5.1'e ilişkin Kirchoff gerilim denklemi;

$$\dot{V}_k = \dot{E}_{Th} - \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_k \quad (5.16)$$

şeklinde düzenlenir ve yük üzerindeki Ohm denklemi;

$$\dot{V}_k = \dot{Z}_L \cdot \dot{I}_k \quad (5.17)$$

olarak yazılır. 5.16 ve 5.17 eşitliklerinden;

$$\dot{E}_{Th} - \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_k = \dot{Z}_L \cdot \dot{I}_k \quad (5.18)$$

yazılır. 5.7 Eşitliğinden elde edilen maksimum güç transferi ifadesi gereği

$Z_L = Z_{Th}$ alınır ise, bu işlem noktasından sonra elde edilecek tüm eşitlikler; maksimum güç transfer anına ilişkin ya da gerilim kararlılığı açısından ifade edilir ise kritik değerler cinsinden elde edilecektir. Bu bağlamda, 5.18 eşitliği;

$$\dot{E}_{Th} - 2 \cdot \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_k^{cr} = 0 \quad (5.19)$$

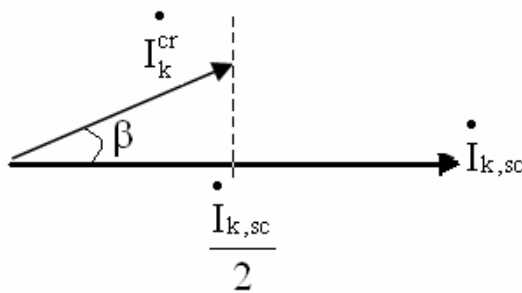
şeklini alır. Bu ifadeden kritik akım değeri çekilir ise;

$$\dot{I}_k^{cr} = \frac{\dot{E}_{Th}}{2 \cdot \dot{Z}_{Th}} = \frac{\dot{I}_{k,sc}}{2} \quad (5.20)$$

elde edilir. Bu ifade Şekil 5.7'de verilen fazörel yaklaşım ile değerlendirilir ise;

$$I_k^{cr} = \frac{I_{k,sc}}{2 \cdot \cos\beta} \quad (5.21)$$

ifadesi skaler büyüklükler ve açılar cinsinden elde edilir.



Şekil 5.7 Eşitlik 5.20'ye ilişkin akım fazörleri

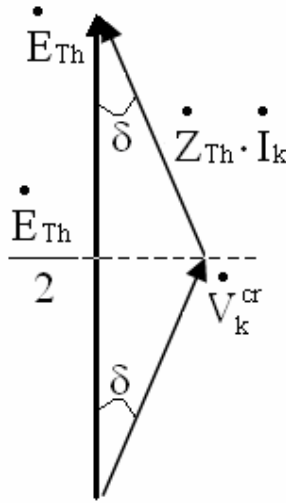
5.19 ifadesi ve Şekil 5.1'in yorumlanması ile, maksimum güç transferi anında

\dot{I}_k^{cr} fazörü ucunun her zaman $\frac{\dot{I}_{k,sc}}{2}$ 'ye çizilen dikmenin üzerinde olacağı görülür.

Maksimum güç transferi anında $Z_L = Z_{Th}$ olduğundan, 5.17 eşitliğinin kullanımı ile;

$$Z_{Th} \cdot I_k = Z_L \cdot I_k = V_k^{cr} \quad (5.22)$$

yazılır.



Şekil 5.8 Eşitlik 5.16'ya ilişkin gerilim fazörleri

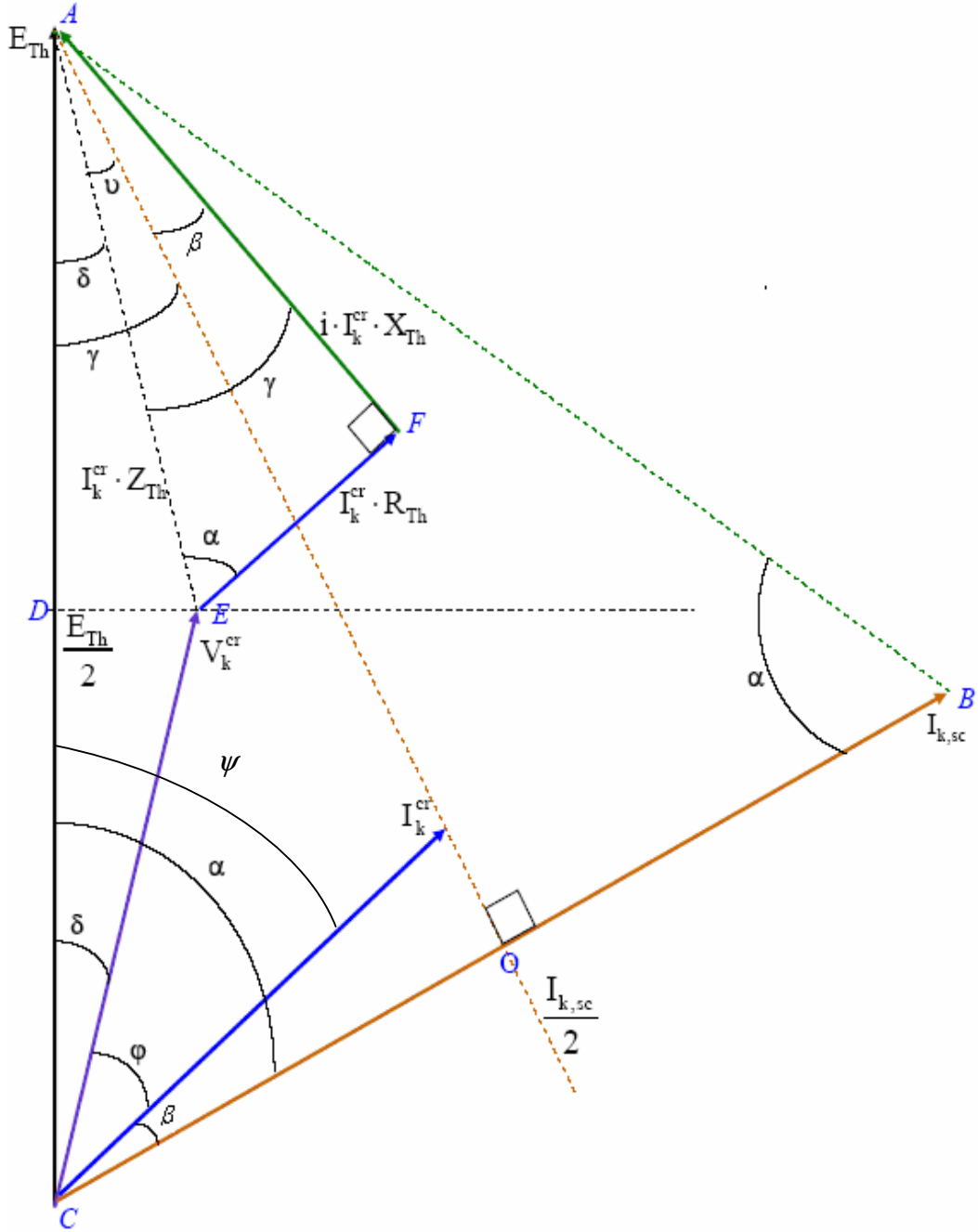
Eşitlik 5.16'ya ilişkin gerilim fazörleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekilden kolayca

görülebileceği üzere \dot{V}_k^{cr} fazörünün ucu maksimum güç transfer anları için, daima $\frac{\dot{E}_{Th}}{2}$

'ye çizilen dikme üzerinde kalacaktır. Zira fazör diyagramda oluşan üçgen ikizkenardır. Şekil 5.8'deki trigonometrik ilişkiler değerlendirilir ise V_k baradaki gerilimin kritik değeri olarak;

$$V_k^{cr} = \frac{E_{Th}}{2 \cdot \cos \delta} \quad (5.23)$$

ifadesi yazılır. Tüm çalışma noktalarında $V_k^{cr} \geq E_{Th} / 2$ 'dir.



Şekil 5.9 Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramının elde edilmesi [49]

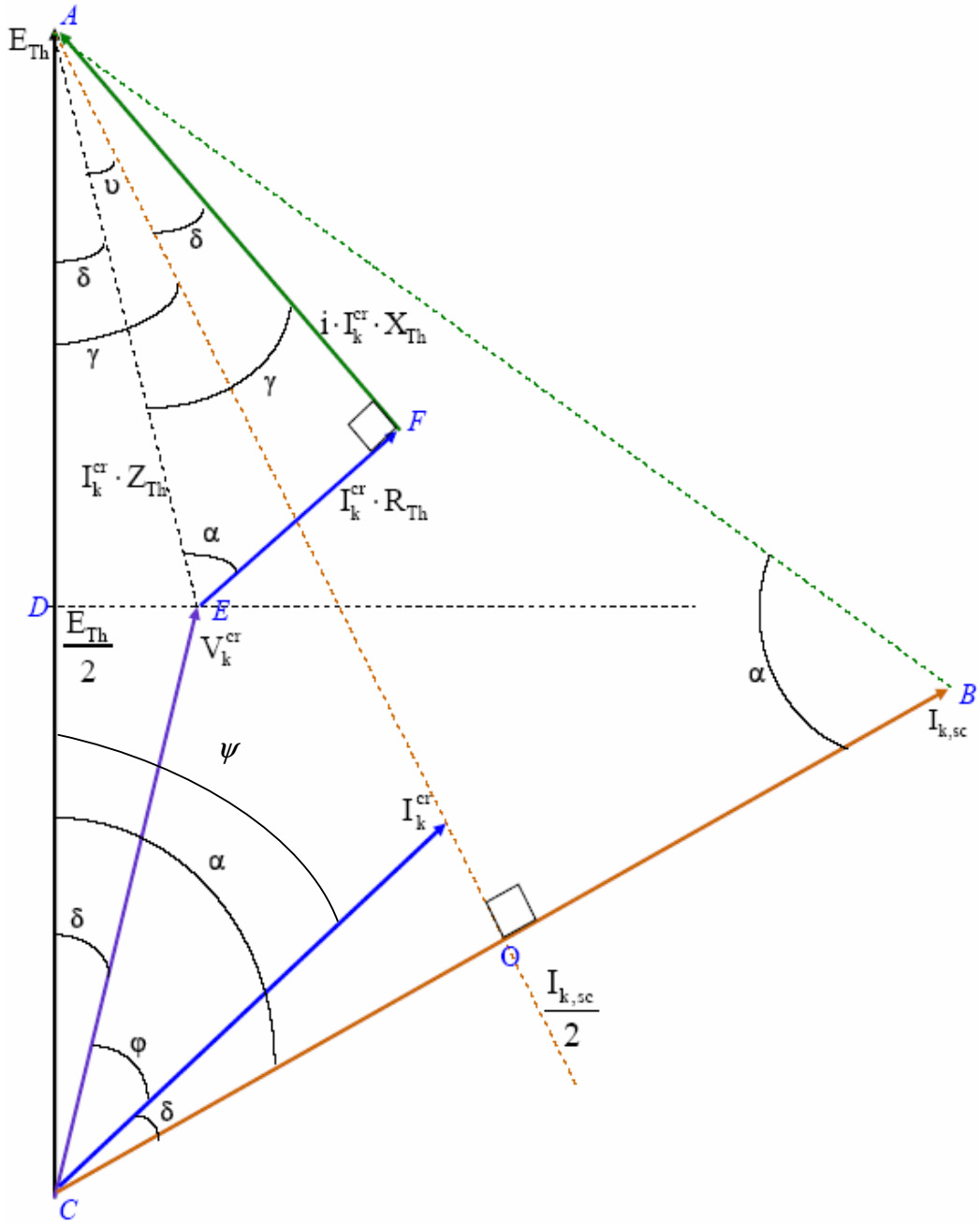
Yukarıdaki parametreler ve 5.16, 5.21 ve 5.23 eşitliklerini kullanarak çizilen maksimum güç transferi fazör diyagramı Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu fazör diyagramında karşılaşılan bazı yeni açılar tartışılır ise;

$$v = \gamma - \beta \ ; \ v = \gamma - \delta \quad (5.24a,b)$$

maksimum güç transferi esnasında

$$\beta = \delta \quad (5.25)$$

olduğu bulunur. Bu sonuç gerek 5.21 eşitliğini ve gerekse Şekil 5.9'u sadeleştirir. Bu sadeleştirmeden sonra çizilen fazör diyagram son hal olarak Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramı [49]

5.5. Gerilim Kararlılığı Kritik Değerleri

Şekil 5.10'da elde edilen kritik hal fazör diyagramı ile, k. barada gerilim kararsızlığı yaratacak kritik büyüklükler kolayca değerlendirilebilir. Gerilim kararlılığı

incelemesinde kullanılan temel büyüklüklere ilişkin kritik değerler aşağıda verilmiştir. Verilen ifadeler kararlılık incelemelerinde yaygın kullanılan δ açısı cinsindedir. Şekil 5.10'dan;

$$V_k^{cr} = \frac{E_{Th}}{2 \cdot \cos \delta} \quad (5.26)$$

$$I_k^{cr} = \frac{I_{k,sc}}{2 \cdot \cos \delta} \quad (5.27)$$

kolayca yazılır. Yukarıdaki iki eşitliğin taraf tarafa çarpılması ile kritik görünür güç;

$$S_k^{cr} = \frac{S_{k,sc}}{4 \cdot \cos^2 \delta} \quad (5.28)$$

olarak elde edilir. Şekil 5.10'u kullanılarak φ açısı α ve δ cinsinden yazılır ise;

$$\gamma + 2 \cdot \delta + \varphi = 90^\circ \quad ; \quad \alpha + \gamma = 90^\circ \quad (5.29a,b)$$

$$\varphi = \alpha - 2 \cdot \delta \quad (5.30)$$

elde edilir. Burada α güç sistemini sembolize eden Thevenin eşdeğer empedansının açısıdır. Güç ifadelerinin α 'nın fonksiyonu olması, k. bara gerisinde kalan sistemde olacak değişikliklerin, sistemin Thevenin eşdeğerine yansımaları sonucunu gösterecektir. K. baradan çekilen aktif gücün gerilim kararlılığı açısından kritik değeri;

$$P_k^{cr} = S_{k,cr} \cdot \cos \varphi \quad (5.31)$$

$$P_k^{cr} = S_{k,sc} \cdot \cos(\alpha - 2\delta) \quad (5.32)$$

ve k. baradan çekilen reaktif gücün gerilim kararlılığı açısından kritik değeri;

$$Q_k^{cr} = S_{k,cr} \cdot \sin \varphi \quad (5.33)$$

$$Q_k^{cr} = S_{k,sc} \cdot \sin(\alpha - 2\delta) \quad (5.34)$$

elde edilir.

5.6. Gerilim Kararlılığı Marjini

Gerçek zamanlı gerilim kararlılığı değerlendirmesinde, işletme anı için kararsızlık sınırına ne kadar aralık kaldığının görülmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla bir gerilim kararlılığı marjinin belirlenmesi, çalışma noktasının kolay yorumlanmasını sağlayacaktır. Kararlılık incelemelerinde pek çok marjin tanımlanabilmekle beraber, birçok parametrenin ürünü olan marjinler beraberlerinde çok hata getirmektedirler. Bu bakış açısı ve simülasyon sonuçları üzerinde yapılan değerlendirmeler; en az hata içermesi ve simülasyon sonuçları ile iyi örtüşmesi yönü ile gerilim kararlılığı marjininin oluşturulmasında parametre olarak alınmasını getirmiştir.

Gerilim kararlılığı marjini VSM_V 'nin belirlenmesinde 5.26'da verilen kritik gerilim ifadesi kullanılacaktır. Gerilim kararlılığı değerlendirilmesi yapılacak k. bara için gerilim kararlılığı marjini:

$$VSM_V = \frac{V_k - V_k^{cr}}{V_k^{cr}} \quad (5.35)$$

Bu marjin bağıl olduğundan değerlendirilmesi kolaydır. k. bara gerilimi V_k , kritik gerilim değerine yaklaşırken VSM_V sıfır değerine yaklaşır. Gerçek zamanlı uygulamalarda, sistem işletilirken VSM_V 'nin izlenilip kararsızlık değerine ne kadar yaklaşıldığı kolayca izlenebilir. Marjinin sifira yaklaşması sistemin yüklenebilirliğinin azaldığını, kararsızlığına yaklaşıldığını belirtir. Sistem operatörleri, VSM_V de kendilerine ön sınırlar koyup gerekli koordinasyonu sağlayarak, kararlı çalışmayı sürekliliğini yakalayabilirler.

BÖLÜM 6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

6.1. Giriş

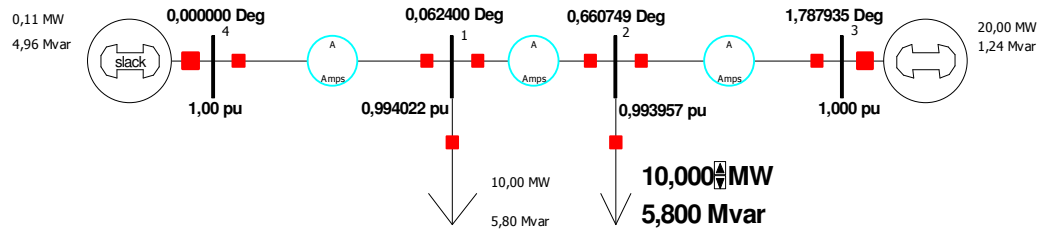
Bu bölümde, 4. bölümde elde edilen kestirim ifadeleri ve 5. bölümde elde edilen gerilim kararlılığı marjlerinin sayısal olarak değerlendirilmesi yapılacaktır. Bu amaçla yük akışı yöntemlerini kullanarak analiz yapan PowerWorld Simulator yazılımı kullanılarak örnek durumlar üzerinde simülasyonlar yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

PowerWorld Simulatorün yapılandırma parametreleri Ek1’de verilmiştir.

Tüm örneklerde $S_{\text{baz}} = 100 \text{ MVA}$ alınmıştır.

6.2. Dört Baralı Örnek Sistem

N Baralı şebekiyi minimum düzeyde temsil etmek amacıyla Şekil 6.1’de verilen dört baralı bir örnek sistem ele alınarak, yöntemler uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır.



Şekil 6.1 Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması [50].

Bu örnek sistemde, 1. 2. baralar yük barası (P-Q Bara), 3. bara üretim barası (P-V Bara) ve 4. bara da salınım barası olarak ele alınacaktır. Gerilim kararlılığı açısından 2. bara incelenecektir.

PowerWorld Simulator ile ikinci baradaki yük güç faktörü sabit korunarak güç kararsızlık noktasına kadar artırılmış ve simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Kaydedilen yerel bara (2. bara) parametreleri 4. bölümde verilen kestirim algoritmasına girilip, kestirimler ve 5.35’de verilen VSM_V gerilim kararlılığı marjinleri belirlenmiştir.

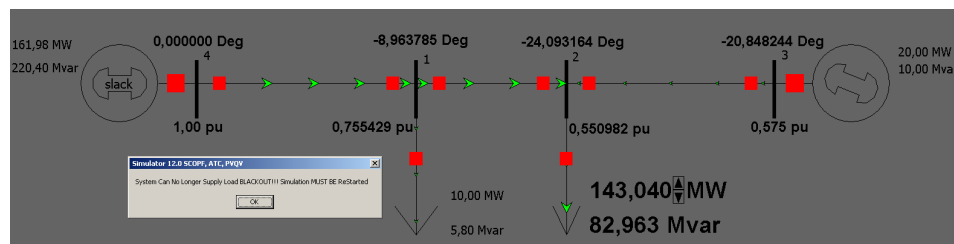
Tablo 6.1 Dört baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri

Hat No:	Baradan Baraya p - q	Hat Empedansı $R + j X$	Hattın Şönt Admitansı $G + j B$
1	1 2	$0.02 + j 0.10$	$0. + j 0.020$
2	1 4	$0.02 + j 0.10$	$0. + j 0.020$
3	2 3	$0.02 + j 0.10$	$0. + j 0.020$

Tablo 6.2 Dört baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri

Bara No	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilimin Genliği $ V $	Reaktif Limitleri Q_{min}	Güç Q_{max}
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)			
1	P-Q			10	5.8			
2	P-Q			10	5.8			
3	P-V	20				1.0	-10	10
4	Salınım					1.0		

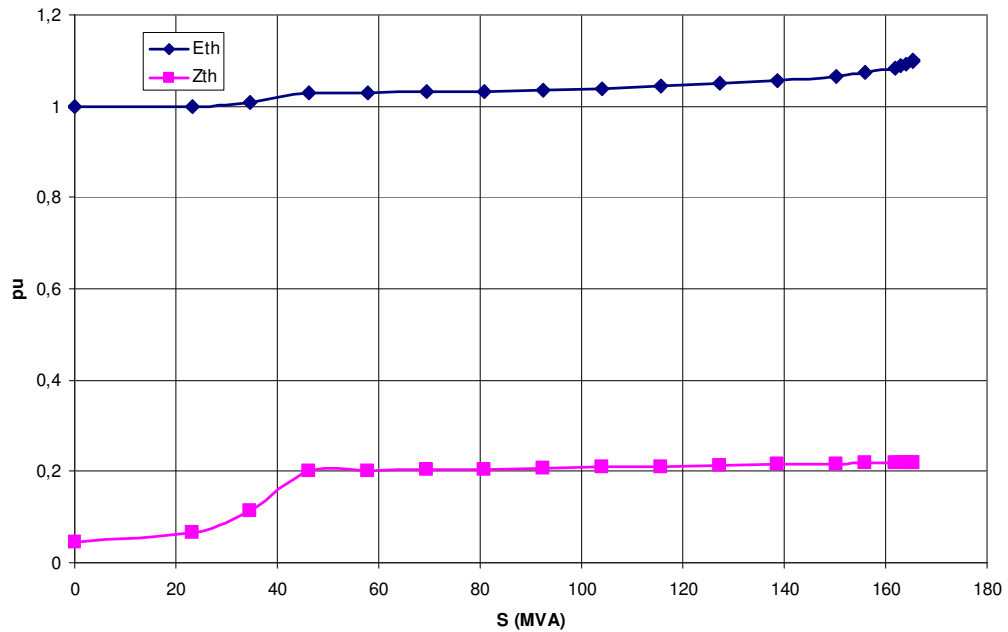
Şekil 6.1’de tek hat şeması verilen 4 baralı örnek sistem, Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilen parametreler ile yapılandırılmış ve deney barası olan 2. baradaki güç, güç faktörü korunarak gerilim kararsızlık noktasına kadar adım adım artırılmış ve Tablo 6.3’deki değerler kaydedilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Dört baralı örnek sisteminde yük akışı simülasyonunda gerilimin kararsızlığa girdiği an

2 Nolu yerel barada yapılan ölçümler ile yapılan kestirimlerden, 2 nolu bara arkasındaki güç sistemi; salınım barası nitelikli eşdeğer bir generatöre (E_{Th}) ve bir eşdeğer hat empedansına (Z_{Th}) dönüşmektedir. Bu dönüşümde sistemin herhangi bir çalışma noktasında incelenen bara geriliminin açısı, eşdeğer salınım generatörüne göre olan açı olacaktır.

Sistemde sadece 2 tane generatörün bulunduğu, bu küçük örnekte, yük akışı ile bulunan açılar Tablo 6.3'te sadece sembolik olarak verilmiş olup, kestirim sonucu bulunan açılar ile tam bir örtüşme beklenmemektedir. Bu küçük güç sisteminde açılarda oluşan farklılıklar Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Çok sayıda generatörden beslenmiş sistemlerde açı farklılıkları kendini daha açık gösterecektir. Burada hedef olan şey VSM_V gerilim kararlılık marjini ve kararsızlık noktasını değerlendirmek olduğundan, kestirim sonucu elde edilen açı referansı kaymış eşdeğer devreden bulunan kritik değerler kendi içinde doğru olup, gerilim kararlılığı marjinleri açısından gerçek sistem ile tutarlı olduğu görülmüştür (Şekil 6.3).

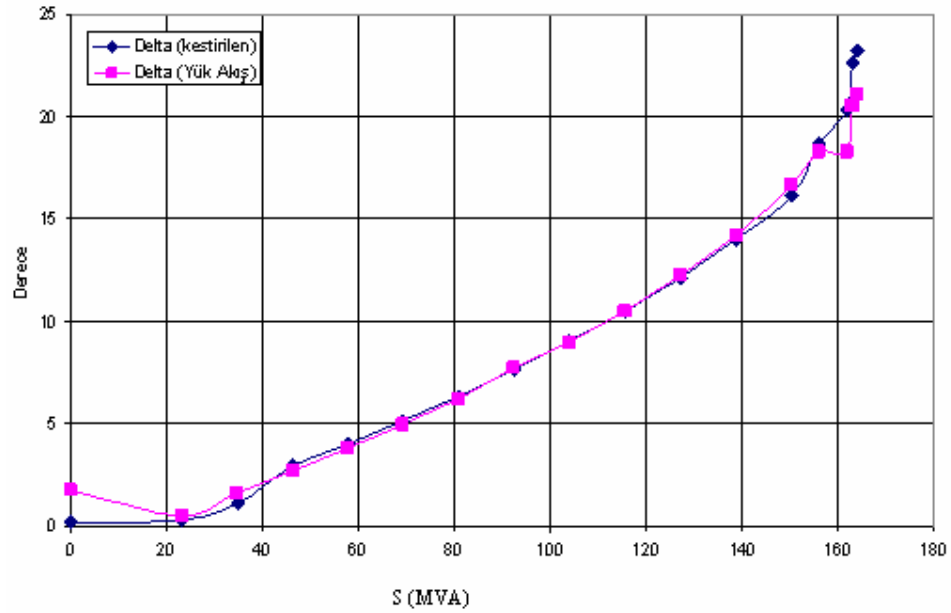


Şekil 6.3 Dört baralı örnek sistemde kestirilen Thevenin Eşdeğer devresi parametreleri

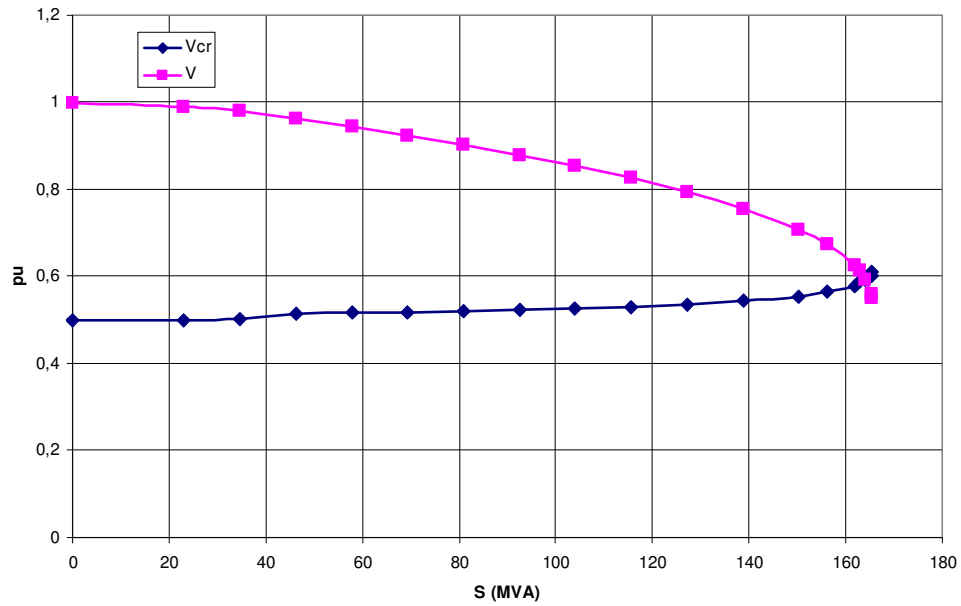
Şekil 6.3’de Thevenin Eşdeğer devresi parametrelerinin 45 MVA’ ya kadar değişiklik göstermesi normal bir durumdur. Zira 2. baradaki yük 1. baradaki yüke göre daha baskın olduğunda, 1. baradaki yük empedansı, sistemin admitans matrisinde 1. baranın etkisi azalmakta ve baskın değer artan yükün bulunduğu 2. baraya geçmektedir.

Tablo 6.3 Dört baralı örnek sisteme ilişkin simülasyon ve kestirim sonuçları

SİMÜLASYON (YÜK AKIŞI)					KESTİRİM				
P_2	Q_2	S_2	δ	V_2	E_{Th}	Z_{Th}	δ	V_2^{cr}	VSM_V
0	0	0	1.78878	1.000000	0.999012	0.04354	0.21543	0.5000000	1.0000
20	11.6	23.12	0.48294	0.988707	0.999151	0.06638	0.32843	0.4995841	0.9791
30	17.4	34.68	1.60425	0.979371	1.006824	0.11434	1.12884	0.5035141	0.9451
40	23.2	46.24	2.68273	0.961946	1.028128	0.19967	2.9242	0.5147395	0.8688
50	29.0	57.8	3.80607	0.943431	1.02941	0.20149	4.00244	0.5159693	0.8285
60	34.8	69.36	4.9823	0.923633	1.031107	0.20332	5.14170	0.5176442	0.7843
70	40.6	80.92	6.2223	0.902347	1.033272	0.20512	6.34927	0.5198283	0.7359
80	46.4	92.48	7.74024	0.879241	1.035992	0.20694	7.63637	0.5226307	0.6823
90	52.2	104.04	8.9566	0.853884	1.039334	0.20877	9.01711	0.5261780	0.6228
100	58.0	115.6	10.50203	0.825582	1.043509	0.21064	10.51265	0.5306640	0.5558
110	63.8	127.16	12.22645	0.793297	1.048705	0.21257	12.15437	0.5363763	0.4790
120	69.6	138.72	14.22233	0.754949	1.055321	0.21462	13.99473	0.5438033	0.3883
130	75.4	150.28	16.70272	0.705915	1.064103	0.21689	16.13108	0.5538631	0.2746
135	78.3	156.06	18.30859	0.673387	1.072988	0.21755	18.67440	0.5663148	0.1891
140	81.2	161.84	18.30859	0.626847	1.081527	0.21905	20.37808	0.5768682	0.0866
141	81.78	162.99	20.55414	0.61325	1.088196	0.21824	22.58886	0.5893095	0.0406
142	82.36	164.15	21.1193	0.591513	1.091452	0.21854	23.25374	0.5939843	0.0026
143	82.94	165.31	22.03314	0.559106	1.096873	0.21934	24.13623	0.6009818	-0.0697
143.04	82.96	165.35	23.71985	0.550965	1.099714	0.21766	25.72909	0.6103782	-0.0973

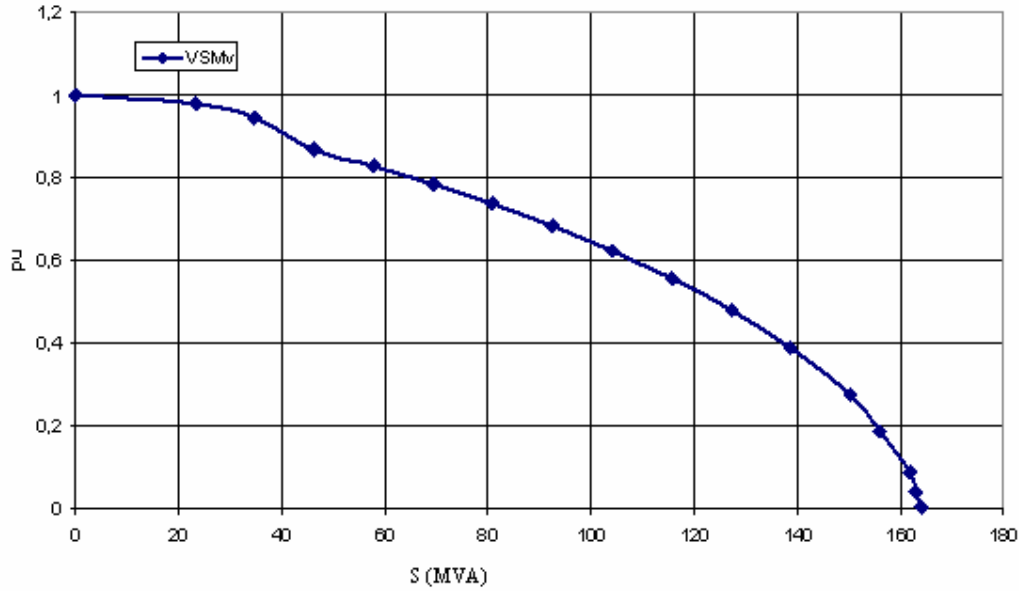


Şekil 6.4 Dört baralı örnek sistemde kestirilen ve yük akışı ile bulunan yük açıları



Şekil 6.5 Dört baralı örnek sisteme ilişkin kestirilen anlık V^{cr} ve ölçülen V 'nin yüke göre değişimi

Şekil 6.5'ten yük arttıkça kestirilen kritik gerilim değerinin arttığı ve düşen bara gerilimi ile kesişme anında gerilim kararsızlığına girildiği görülmektedir.



Şekil 6.6 Dört baralı örnek sisteme ilişkin VSM_v gerilim kararlılık marjininin değişimi

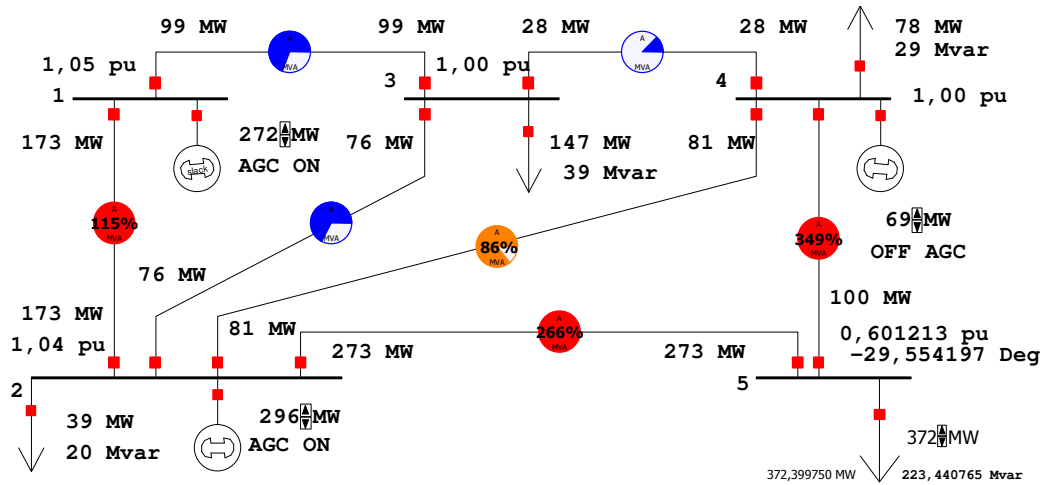
Şekil 6.6'te VSM_v'nin değişimi verilmiştir. Bu tezde elde edilen ve gerilim kararlılığının aralığının değerlendirilmesinde kullanılacak en kolay gösterge VSM_v'dir. VSM_v'nin sifıra yaklaşması, güç sisteminin gerilim kararsızlığı sınırına yaklaşması anlamına gelmektedir. Bu örnekte yük akışı yöntemiyle yapılan analizde güç sistemi 165.35 MVA değerinde gerilim kararsızlığına girmiştir. Kestirim sonucunda hesaplanan VSM_v değerlendirmesinde ise, gerilim kararsızlığının 164.15 MVA değerinden sonra oluştuğu görülmüştür. Bu durum, yük akışı yönteminin doğru sonuç verdiği kabul edilirse;

$$\frac{164.15 - 165.35}{165.35} \cdot 100 = \% -0.7257$$

hata oluştuğu görülmektedir. Hatanın negatif ve çok küçük olması nedeniyle, elde edilen marjinin daha temkinli olduğu söylenilebilir. Diğer taraftan yük akışı algoritmalarının da gerilim kararsızlık noktası civarındaki yakınsama sorunlarının bulunduğu ve bu nedenle hatalara neden olduğu bilinmektedir. Tüm bunlar birleştirildiğinde, bu tezde geliştirilen kestirim, kritik değer hesaplama ve marjin belirleme yaklaşımın kabul edilebilir doğrulukta olduğu görülmüştür.

6.3. Beş Baralı Örnek Sistem

N Baralı şebekiyi minimum düzeyde temsil etmek amacıyla, Şekil 6.7’ de, IEEE beş baralı sistem ele alınarak, yöntemler uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır.



Şekil 6.7 IEEE Beş Baralı örnek sistemin tek hat şeması [51]

Bu örnek sistemde, 3. 5. baralar yük barası (P-Q Bara), 2. 4. baralar üretim barası (P-V Bara) ve 1. bara da salınım barası olarak ele alınacaktır. Gerilim kararlılığı açısından 5. bara incelenecektir.

PowerWorld Simulator ile beşinci baradaki yük güç faktörü sabit korunarak güç kararsızlık noktasına kadar artırılmış ve simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Kaydedilen yerel bara (5. bara) parametreleri 4. bölümde verilen kestirim algoritmasına girilip, kestirimler ve 5.35’de verilen VSM_V gerilim kararlılığı marjinleri belirlenmiştir.

Tablo 6.4 Beş baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri

Hat No:	Baradan Baraya p - q	Hat Empedansı R + j X	Hattın Şönt Admitansı G + j B
1	1 3	0 + j 0.24	0 + j 0.05
2	1 2	0 + j 0.06	0 + j 0.50
3	2 3	0 + j 0.18	0 + j 0.04
4	2 4	0 + j 0.18	0 + j 0.04
5	2 5	0 + j 0.12	0 + j 0.03
6	3 4	0 + j 0.03	0 + j 0.02
7	4 5	0 + j 0.24	0 + j 0.05

Tablo 6.5 Beş baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri

Bara No	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilimin Genliği V
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	
1	Salınım					1.05
2	P-V	296	503	39	20	1.04
3	P-Q			147	39	0.99
4	P-V	70	205	78	29	1.00
5	P-Q			374	224	0.59

Şekil 6.7’de tek hat şeması verilen 5 baralı örnek sistem, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5’de verilen parametreler ile yapılandırılmış ve deney barası olan 5. baradaki güç, güç faktörü korunarak gerilim kararsızlık noktasına kadar adım adım arttırılmış ve Tablo 6.6’daki değerler kaydedilmiştir (Şekil 6.7).

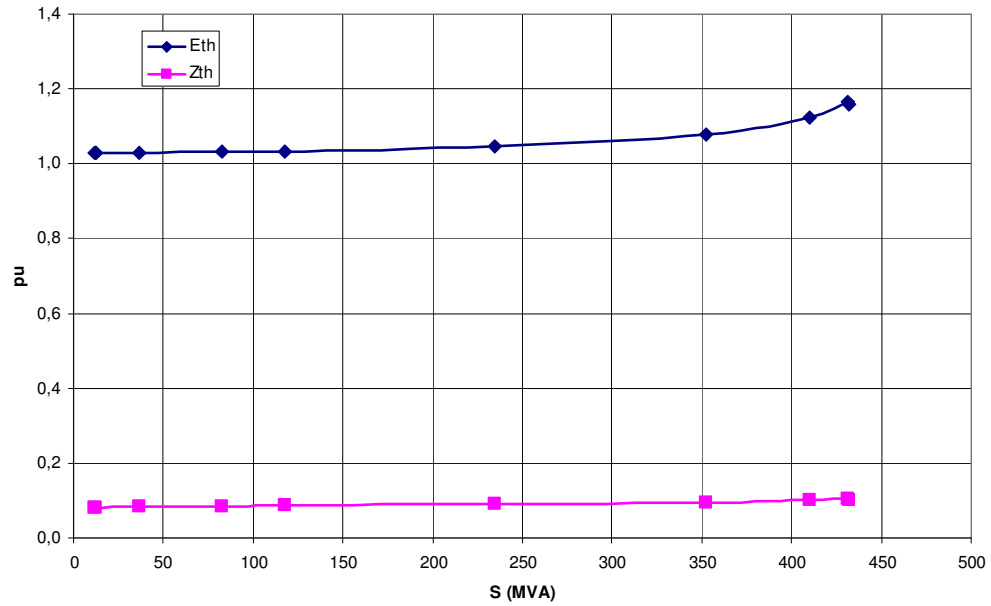
5 Nolu yerel barada yapılan ölçümler ile yapılan kestirimlerden, 5 nolu bara arkasındaki güç sistemi; salınım barası nitelikli eşdeğer bir generatöre (E_{Th}) ve bir eşdeğer hat empedansına (Z_{Th}) dönüşmektedir. Bu dönüşümde sistemin herhangi bir çalışma noktasında incelenen bara geriliminin açısı, eşdeğer salınım generatörüne göre olan açı olacaktır.

Salınım barası hariç olmak üzere, birden fazla sayıda generatörden beslenmiş bu sistemde, bir önceki simülasyona göre, açıda farklılıklar, kendini daha açık göstermektedir. Yine burada hedef olan şey VSM_V gerilim kararlılık marjini ve kararsızlık noktasını değerlendirmek olduğundan, kestirim sonucu elde edilen açı referansı kaymış eşdeğer devreden bulunan kritik değerler kendi içinde doğru olup,

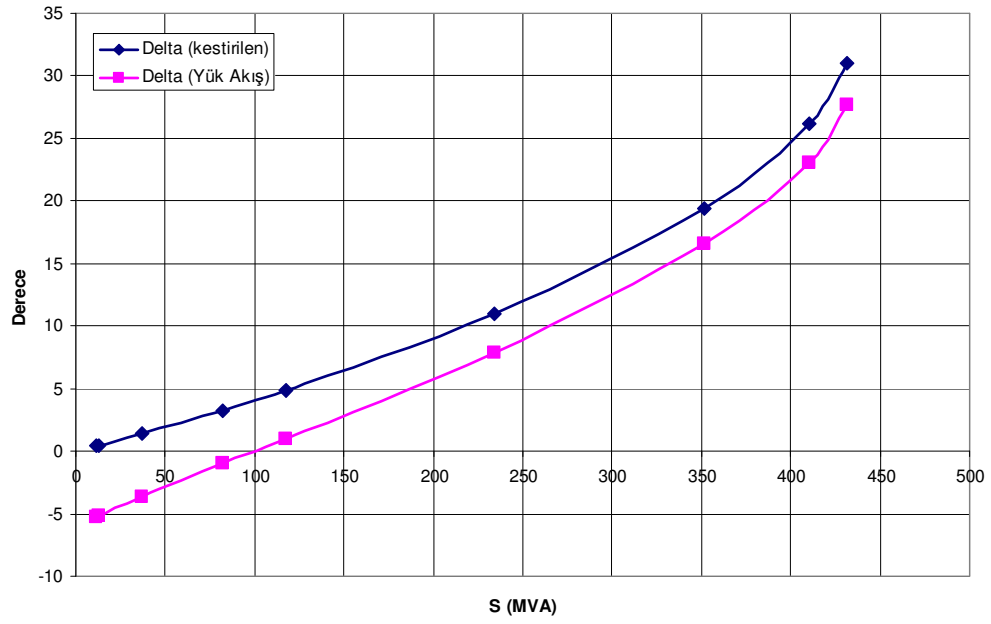
gerilim kararlılığı marjini açısından gerçek sistem ile tutarlı olduğu görülmüştür (Şekil 6.8).

Tablo 6.6 Beş baralı örnek sisteme ilişkin simülasyon ve kestirim sonuçları

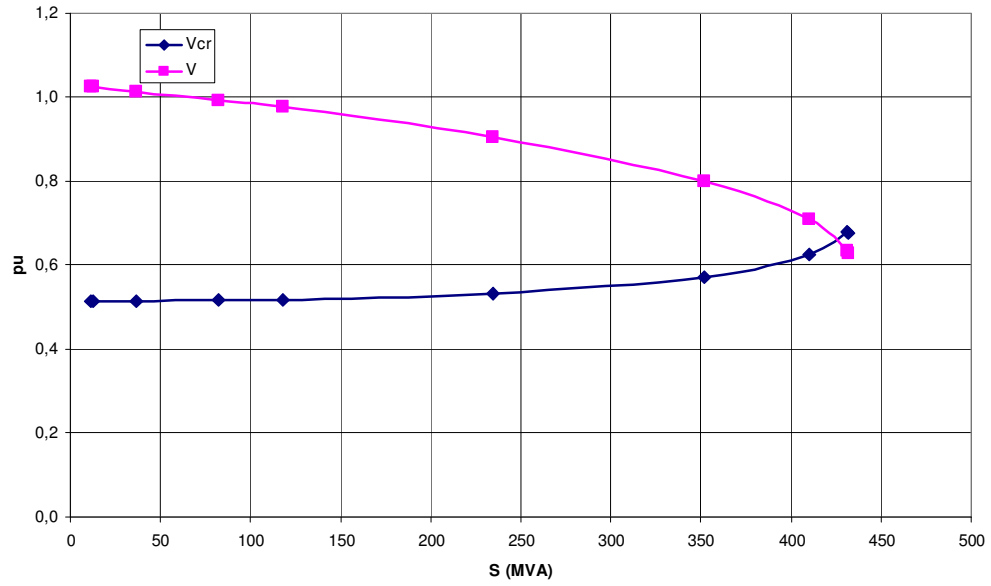
SİMÜLASYON (YÜK AKIŞI)					KESTİRİM				
P_5	Q_5	S_5	δ	V_5	E_{Th}	Z_{Th}	δ	V_5^{cr}	VSM_V
9.8	5.9	11.43	-5.22994	1.02469	1.02932	0.08112	0.42037	0.51466	1.0000
10.8	6.5	12.57	-5.16049	1.02423	1.02939	0.08116	0.43204	0.51471	0.9899
31.4	18.8	36.57	-3.69221	1.01409	1.02966	0.08229	1.37124	0.51498	0.9692
70.6	42.3	82.29	-0.93156	0.99341	1.03091	0.08400	3.27004	0.51630	0.9241
100.9	60.6	117.72	0.96393	0.97594	1.03309	0.08598	4.88703	0.51843	0.8825
200.9	120.5	234.29	7.83802	0.90652	1.04567	0.09022	10.95913	0.53255	0.7022
301.8	181.1	352.00	16.55610	0.80145	1.07797	0.09530	19.34702	0.57124	0.4030
351.8	211.1	410.29	23.09186	0.70830	1.12240	0.10019	26.13167	0.62509	0.1331
369.9	221.9	431.32	27.67563	0.63410	1.16421	0.10356	31.03501	0.67936	-0.0066
370.6	222.4	432.23	28.0552	0.62731	1.15841	0.10233	31.11765	0.67655	-0.0728
372.8	223.7	434.75	30.16924	0.59085	1.15920	0.10092	32.61622	0.68810	-0.0141



Şekil 6.8 Beş baralı örnek sistemde kestirilen Thevenin Eşdeğer devresi parametreleri

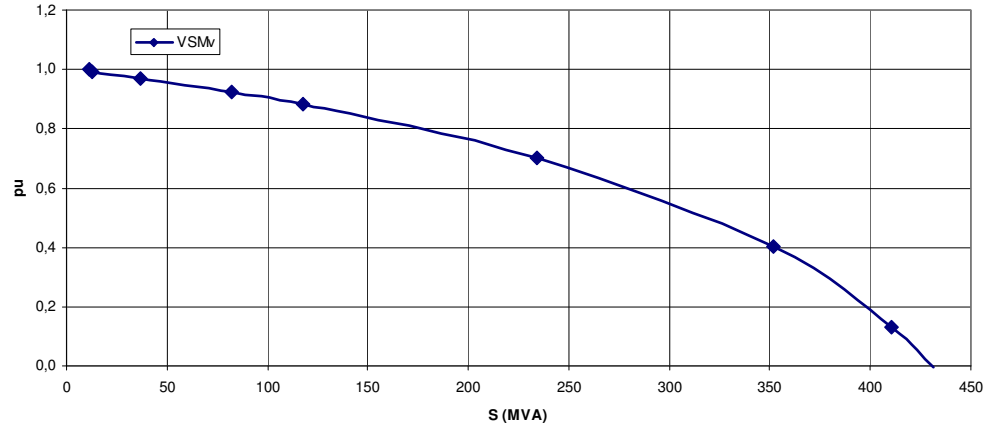


Şekil 6.9 Beş baralı örnek sistemde kestirilen ve yük akışı ile bulunan yük açıları



Şekil 6.10 Beş baralı örnek sisteme ilişkin kestirilen anlık V^{cr} ve ölçülen V 'nin yüke göre değişimi

Şekil 6.10'da yük arttıkça kestirilen kritik gerilim değerinin arttığı ve düşen bara gerilimi ile kesişme anında gerilim kararsızlığına girildiği görülmektedir.



Şekil 6.11 Beş baralı örnek sisteme ilişkin VSM_V gerilim kararlılık marjininin değişimi

Şekil 6.11'de VSM_V 'nin değişimi verilmiştir. Bir önceki simülasyonda da anlaşıldığı üzere, elde edilen ve gerilim kararlılığının aralığının değerlendirilmesinde kullanılacak en kolay gösterge VSM_V 'dir. VSM_V 'nin sıfıra yaklaşması, güç sisteminin gerilim kararsızlığı sınırına yaklaşması anlamına gelmektedir. Bu örnekte yük akışı yöntemiyle yapılan analizde güç sistemi 434.75 MVA değerinde gerilim kararsızlığına girmiştir. Kestirim sonucunda hesaplanan VSM_V değerlendirmesinde ise, gerilim kararsızlığının 431.32 MVA değerinden sonra oluştuğu görülmüştür. Bu durum, yük akışı yönteminin doğru sonuç verdiği kabul edilirse;

$$\frac{431.32 - 434.75}{434.75} \cdot 100 = \% -0.7890$$

hata oluştuğu görülmektedir. Hatanın negatif ve çok küçük olması nedeniyle, elde edilen marjinin daha temkinli olduğu söylenilebilir. Bölüm 6.2 ve Bölüm 6.3' deki örnek sistemlerden elde edilen tüm sonuçlar dikkate alındığında, bu tezde geliştirilen kestirim, kritik değer hesaplama ve marjin belirleme yaklaşımın kabul edilebilir doğrulukta olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, N baralı bir güç sistemi tek kapılı bir Thevenin eşdeğer devresine dönüştürülerek gerilim kararlılığı sınırlarının gerçek zamanlı olarak incelenebilmesi için yeni bir kestirim yöntemi geliştirilmiş ve güç sisteminde maksimum güç transferi anındaki parametreler arasındaki ilişkileri tanımlayan bir maksimum transfer güç fazör diyagramı verilmiştir. Bu fazör diyagramın değerlendirilmesi ile, gerilim kararsızlığına neden olacak kritik parametreler belirlenmiş ve gerilim kararlılığının gerçek zamanlı değerlendirilmesinde kolay yorum sağlayacak bir gerilim kararlılık marjini tanımlanmıştır.

Güç sistem gerilim kararlılığına; yük talebi, iletim şebekesinin kapasitesi ve güç üretim kapasitesi olmak üzere başlıca üç faktör etki etmektedir.

Üretim, iletim ve yüklerden oluşan N baralı güç sistemi anlık oluşturulan Thevenin eşdeğer modeli ile temsil edilebilmektedir.

Sistemin Thevenin eşdeğer modeline maksimum güç transferi teoremi uygulandığında, gerilim kararsızlık sınırına, yük empedansı genliğinin Thevenin empedansı genliğine eşit olduğu şartlarda gelindiğini göstermektedir. Bu nedenle N baralı bir sisteme ilişkin Thevenin eşdeğer devre modeli kullanıldığında, Thevenin parametrelerinin belirlenmesinin en önemli konulardan bir olduğu ve mümkün olan en az hata ile belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

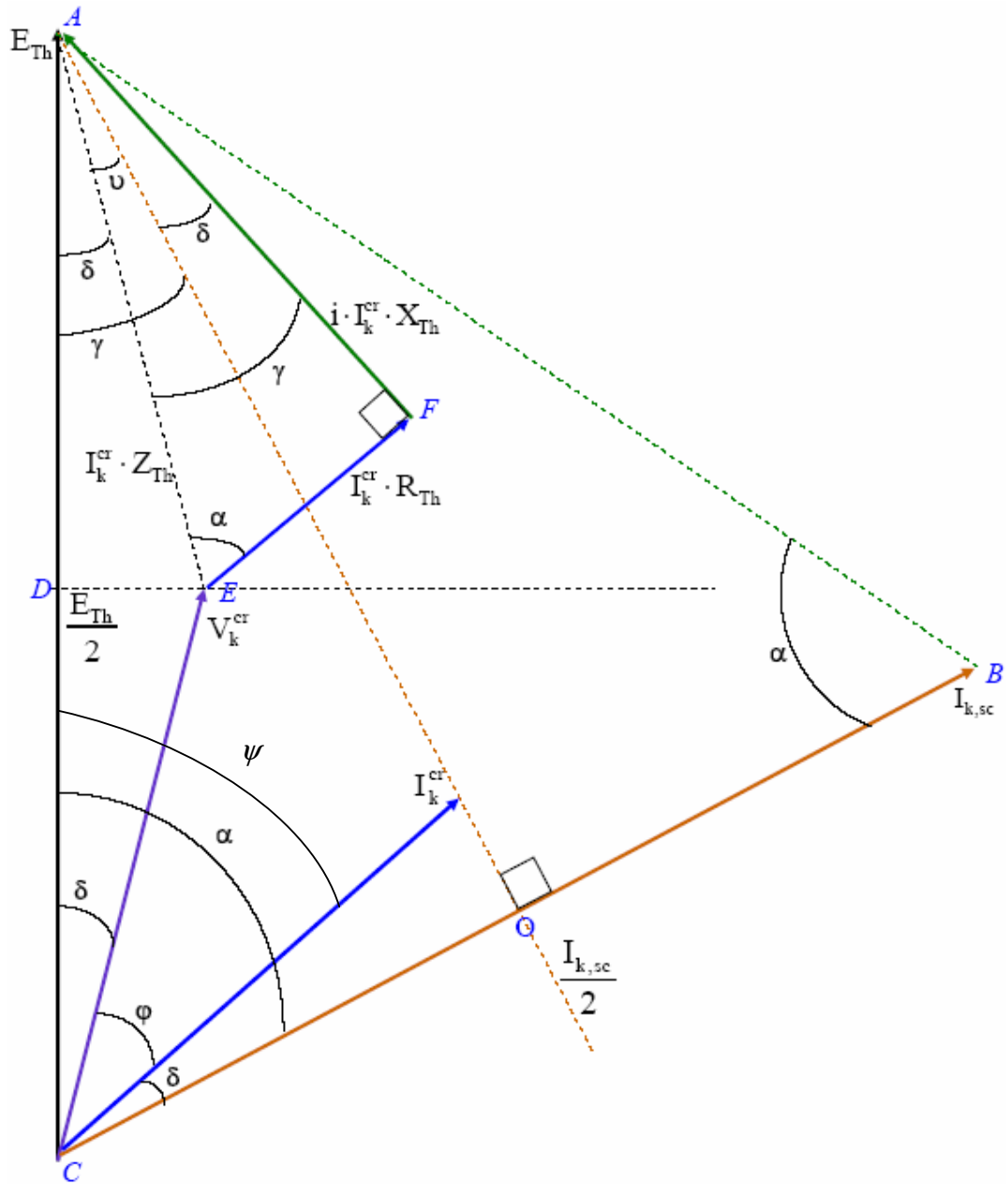
Thevenin eşdeğer devresi parametrelerinin, eksik denklem seti nedeni ile doğrudan bulunamadığı görülmüştür. Bu nedenle uygun bir kestirim yaklaşımı uygulanması gerekmektedir.

Parametre kestiriminde kullanılmak üzere oluşturulabilecek denklem setlerinin, sistem parametrelerine duyarlı olduğu saptanmıştır. Bazı setlerin kapasitif güç faktörlerinde doğru sonuçlar verdiği, bazılarının sabit yük açısında doğru sonuçlar verdiği vb görülmüştür.

Günümüz şebekelerinin çoğunlukla endüktif yüklü çalıştığı gerçeği ile, bu şartlarda duyarlılığı en az olan ve güç blançosu üzerine kurulan bir kestirim seti geliştirilmiştir.

Güç sisteminin Thevenin eşdeğer devresine ilişkin Thevenin Gerilimi (E_{Th}), δ , Thevenin Empedansı (Z_{Th}) ve açısı α olmak üzere dört bilinmeyen vardır. Oysa yazılabilecek bağımsız denklem seti sayısı ikidir. Kestirim yaklaşımında katsayı matrisini tekil yapmayacak ilave denklem seti ikinci bir ölçümden sağlanabilirse de, elde edilen dört denklem ile bu dört parametrenin doğru kestirimi gerçekleşmemektedir. Bu yöntem ile parametrelerden E_{Th} ve α tutarlı olarak bulunabilmekte ve fakat bunlara ilişkin açılar tutarsız olmaktadır. Elde edilen doğru kestirimler, sisteme ilişkin fazör diyagram ilişkilerinden kazanılan ilave polinomlar ile çözülebilmektedir. Günümüz şebekelerinde α 'nın çoğu kez 80° yada daha büyük olduğunun kabul edilmesi büyük hataya neden olmamaktadır. Zira gerilim kararsızlığına neden olan parametrelerin kritik değerleri $\cos(\delta)$ 'ya bağlıdır. Bu ifade tarzı, δ 'nın 60° değerine kadar duyarlılığı az hale getirmekte ve hesaplanan marjinlerdeki hatalar azaltmaktadır.

Gerçek zamanlı uygulamalar için sadece tek bir parametrenin; VSM_V gerilim kararlılığı marjininin izlenerek değerlendirilme yapılması, hem pratik ve hem de az hatalı bir yaklaşımdır. Başka parametrelere bağlı marjinlerde geliştirilmekte ise de, çeşitli parametrelerin çarpımları ile oluşturulmuş ürünleri barındıran marjinlerde hatalar katlanmakta ve artmaktadır.



Şekil 7.1 Şekil 5.10 Maksimum güç transferi / gerilim kararlılığı kritik hal fazör diyagramı

Elde edilen maksimum güç transferi fazör diyagramı, gerilim kararsızlığı konusuna kolay bir bakış sağlamıştır. Kararsızlık anında, fazör diyagramda V_k^{cr} 'nin ucu daima $\frac{E_{Th}}{2}$ den geçen dikmenin üzerinde olacaktır. Benzer şekilde I_k^{cr} 'nin ucu da daima $\frac{I_{k,sc}}{2}$ 'den geçen dikmenin üzerinde olacaktır. Dolayısı ile kararlı çalışma

şartlarında V_k vektörünün ucu D'den geçen dikmenin altına düşmemelidir. Benzer şekilde I_k vektörünün ucu da \overline{AO} 'nı aşmamalıdır.

Elde edilen maksimum güç transferi fazör diyagramı, eğitim alanında ilgili derslerin görselleştirilmesinde kolaylıklar sağlayacaktır.

Klasik yük akışı yöntemleri tüm baralardaki bazı parametrelerin bilinmesi ve diğerlerinin bilgisayar destekli analizini gerektirmekte ve özellikle gerilim kararsızlığında yakın noktalarda yakınsama sorunları göstermektedirler. Bu çalışmada kararlılık değerlendirmesi yapabilmek için k. yerel baradan alınacak P_k , Q_k ve I_k ölçümleri almak yeterli olmaktadır. Gerek ölçümlerin- toplanacak bilgilerin azlığı ve bilgi-işlem yükü açısından bakıldığında, önerilen kestirim ve değerlendirme yöntemi büyük kolaylık sağlamaktadır.

Yük akışı analizi ile yapılan karşılaştırmalı analizlerde, önerilen değerlendirme yöntemleri, %-0.7257 ve %-0.7890 gibi küçük hata payları ile gerilim kararsızlığı noktasını belirleyebilmiştir. Bu hata payı, yüksek olasılıkla yük akışı algoritmalarının kararsızlık noktası civarında neden olduğu yakınsama problemlerinden kaynaklanmaktadır. Zira simülasyonlarda kullanılan PowerWorld Simulator 12.0 yazılımının, kritik değer civarında yapılan tekrarlamalı analizlerde de kendi içinde benzeri hataları yaptığı gözlenmiştir.

BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmalara dayanarak:

N baralı güç sistemine ilişkin Thevenin eşdeğer parametrelerinin bulunması konusu, bir optimizasyon problemi olarak da ele alınabilir. Çalışma esnasında bir süre bu konu üzerinde de çalışılmış olup, genetik algoritmaların iyi performans sağladığı görülmüştür. Sorun optimizasyon kısıtlarının belirlenmesinde çıkmıştır. Detaylı incelemede, bu yaklaşımın yeni katkılar sağlayabileceği fikri uyanmıştır.

Elde edilen maksimum güç fazör diyagramına ilişkin parametre bileşenlerinin değişim aralıkları analiz edilebilir ve gerilim kararlılığına etki eden parametrelerin çalışma aralıkları belirlenebilir. Fazör diyagramındaki vektörlerin değişim yörüngeleri, farklı çalışma şartlarında gerilim kararsızlığı olayının oluşumu ve bertaraf edilmesi konusunda katkı sağlayabilir.

Geliştirilen indeksin farklı baralara uygulanması ve kombinasyonel değerlendirilmesi ile gerilim kararlılığı açısından en kritik baralar, sırası ile belirlenebilir ve kararsızlık süreci başlamadan önce baralarda tedbirler geliştirilebilir.

Elde edilen değerlendirme yöntemi, mikrokontrolör tabanlı sistem ile programlanarak, gerçek zamanlı uygulamalardaki performans araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] VAN CUTSEM, T., VOURNAS C., Voltage Stability of Electric Power Systems. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] VAN CUTSEM, T., VOURNAS C., "Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales," IEEE Transactions in Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 146-154, February 1996.
- [3] GLOVER, J.D., SARMA, M.S., Power System Analysis and Design, 3rd ed., Brooks/Cole, 2001.
- [4] CROW, M., Computational methods for electric power systems, CRC Press, 2002.
- [5] AJJARAPU, V., CHRIST, C., "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, " IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, , pp.416-423, February 1992.
- [6] CIGRE Task Force 38-02-11, Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena, CIGRE Publication, 1994.
- [7] CANİZARES, C.A., DE SOUZA, A.Z., QUİNTANA, V.H., "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 1441-1450, August 1996.
- [8] CHİANG, H.D., JEAN-JUMEAU, R., "Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems," Proceeding of the 1993 IEEE/PES Summer Meeting, July 1993.
- [9] THOMAS, R.J., TİRANUCHİT, A., "Voltage instabilities in electric power networks," Proceedings of the 18. Southeastern Symposium on System Theory, Apr. 1986, pp. 359-363.

- [10] THOMAS, R.J., TIRANUCHIT, A., "A posturing strategy against voltage instabilities in electric power system," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp.87-93, February 1988.
- [11] LÖF, P.A., SMED, T., ANDERSSON, G., HILL, D.J., "Fast calculation of a voltage stability index," IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 1, pp. 54-64, February 1992.
- [12] TAMURA, Y., MORI, H., IWAMOTO, S., "Relationship between voltage instability and multiple load flow solutions in electric power systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 102, no. 5, pp. 1115-1125, May 1983.
- [13] TAMURA, Y., MORI, H., IWAMOTO, S., "Current issues in the analysis of voltage instability phenomena," Proc. Bulk Power System Phenomena – Voltage Stability and Security, EPRI, pp.5-39, January 1989.
- [14] KESSEL, P., GLAVITSCH, H., "Estimating the voltage stability of a power system," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 3, July 1986, pp. 346-354.
- [15] TUAN, T.Q., FANDINO, J., HADJSAID, N.J., SABONNADIÈRE, C., VU, H., "Emergency load shedding to avoid risks of voltage instability using indicators," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 341-351, February 1994.
- [16] VU, K., BEGOVIĆ, M., NOVOSEL, D., SAHA, M., "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 1029-1035, August 1999.
- [17] MILOSEVIĆ, B., BEGOVIĆ, M., "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurement," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 121-127, February 2003.
- [18] VAN CUTSEM, T., "A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse," IEEE Transactions in Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 145-156, February 1991.
- [19] CANÍZARES, C.A., DE SOUZA, A.Z., QUÍNTANA, V.H., "Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 8, pp. 1-8, 1993

- [20] TAYLOR, C.W., "Concept of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No. 2, pp. 480-488, April 1992.
- [21] GUZMAN, A.D., TZIOUVARA, E., SCHWEITZER, O., MARTI, K.E., "Load and wide-area network protection system improve power system reliability," Proceeding of 59. Annual Protective Relaying Conference, Atlanta, Georgia, April 2005.
- [22] SANDBERG, L., ROUDEN, K., EKSTAM, L., "Security Assessment Against Voltage Collapse Based on Real-time Data Including Generator Reactive Power Capacity," Proc. CIGRE, 1994.
- [23] TAYLOR, C.W., RAMANATHAN, R., "BPA Reactive Power Monitoring and Control Following the August 10, 1996 Power Failure," Proc. VI SEPOPE, Salvador, Brazil, May 1998.
- [24] TAYLOR, C.W., "The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control," Proceeding of the 2000 IEEE/PES Winter Meeting, Vol. 1, January 2000.
- [25] KUNDUR, P., Power System Stability and Control, EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [26] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401, May 2004.
- [27] CIGRE Task Force 38-02-12, Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse, CIGRE Publication, 1994.
- [28] IEEE Working Group on Voltage Stability, Voltage Stability of Power System: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience, IEEE Special Publication 90TH0358-PWR, 1990.
- [29] TAYLOR, C.W., Power System Voltage Stability, EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [30] CIGRE Task Force 38-02-05, Load Modeling and Dynamics, Electra, pp.124-142, May 1990.
- [31] IEEE Task Force, Load Presentation for Dynamic Performance Studies, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, May 1993.

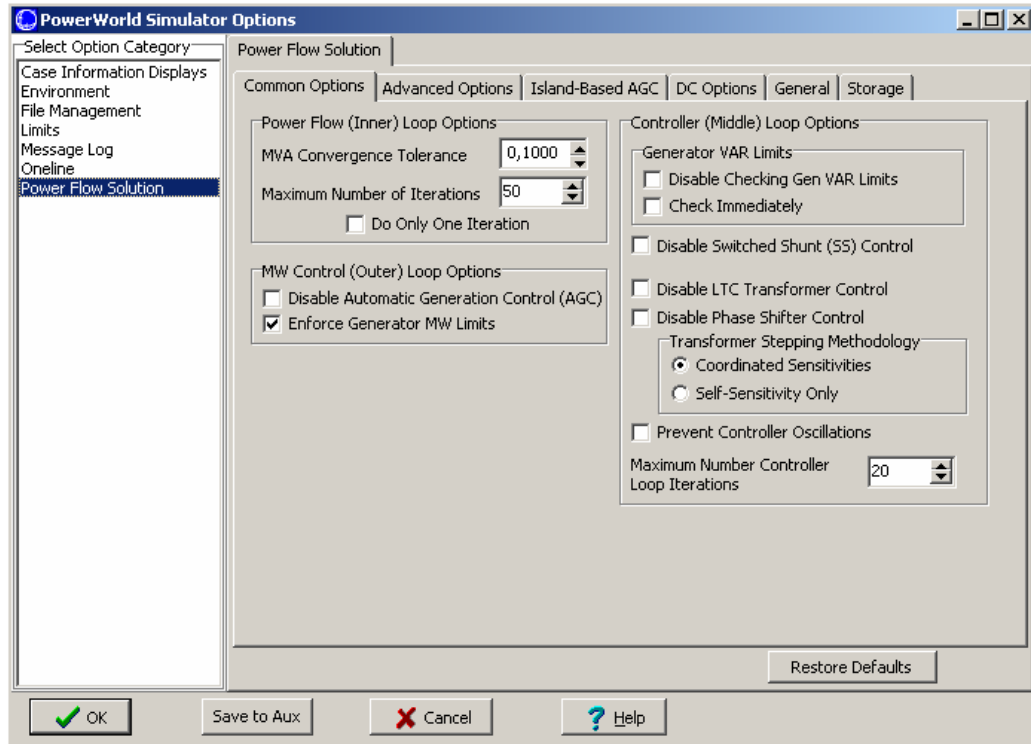
- [32] IEEE Task Force, Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 10, No. 3, pp. 1302-1313, August 1995.
- [33] KARLSSON, D., HILL, D.J., "Modeling and Identification of Non-linear Dynamic Loads in Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 157-166, February 1994.
- [34] XU , W., MANSOUR, Y., "Voltage stability analysis using generic dynamic load models," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 479-493, February, 1994.
- [35] IEEE Working Group on Power System Stability, Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools, IEEE Power System Stability Subcommittee Special Publication SP101PSS, 2002.
- [36] IEEE Standard Board. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Standard. 1992.
- [37] IEEE Task Force on Excitation Limiters, Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, pp. 706-713, December 1995.
- [38] DOBSON, I., CHIANG, H.D., Towards a Theory of Voltage Collapse in Electric Power Systems, System and Control Letter, Vol.13, 1989.
- [39] DOBSON, I., CHIANG, H.D., "New Methods for Computing a Closest Saddle-node Bifurcation and Worst Case Load Power Margin for Voltage Collapse," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No. 3, pp. 905-103, August 1993.
- [40] GAO, B., MORISON, G.K., KUNDUR, P., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.7, No. 4, pp. 1529-1542, November 1992.
- [41] GAO, B., MORISON, G.K., KUNDUR, P., "Towards the Development of a Systematic Approach for Voltage Stability Assessment of Large-scale Power Systems," IEEE Transaction on Power Systems, Vol.11, No. 3, pp.1314-1324, August 1996.
- [42] SUZUKI, M., MASEGI, K., "Direct calculation of voltage-stability limit of electric power systems," Electrical Engineering in Japan, Vol. 111, No. 7, pp. 40-48. 1991.

- [43] CONCORDIA, C., "Voltage stability simplified," *International Journal of Electrical & Energy Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 364-366, October 1992.
- [44] BEGOVIĆ, M.M., PHADKE, A.G., "Control of voltage stability using sensitivity analysis," *IEEE Transactions in Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 114-123, February 1992.
- [45] AJJARAPU, V., CHRIST, C., "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, " *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp.416-423, February 1992.
- [46] YORİNA, N., HARADA, S., CHENG, H., "A method to approximate a closest loadability limit using multiple load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 424-429, February, 1997.
- [47] HAQUE, M.H., 2003. On-line monitoring of maximum permissible loading of a power within the voltage stability limits. In *IEE Proceedings of Generation Transmission And Distribution*, January 2003, London, UK
- [48] ALZAHAWI, T., SACHDEV, M.S.. and RAMAKRISHNA, G., 2005. A Special Protection Scheme For Voltage Stability Prevention. In *Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1-4 May 2005, Saskatoon, Canada
- [49] TURAN, M., DEMIRCIÖGLU, S.B., YALCIN, M.A., 2006. Voltage Stability Evaluation by Using Maximum Power Transfer Phasor Diagram. In *Journal of Applied Science, Asian Network For Scientific Information*, Accepted.
- [50] YALÇIN, M.A., 1995. Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [51] ZHOU, S., 2005. Identification of Multi Simultaneous Anomalies by Innovation Graph Approach. In *Proceeding of 15th PSCC, 2005, Liege, Belgium*.

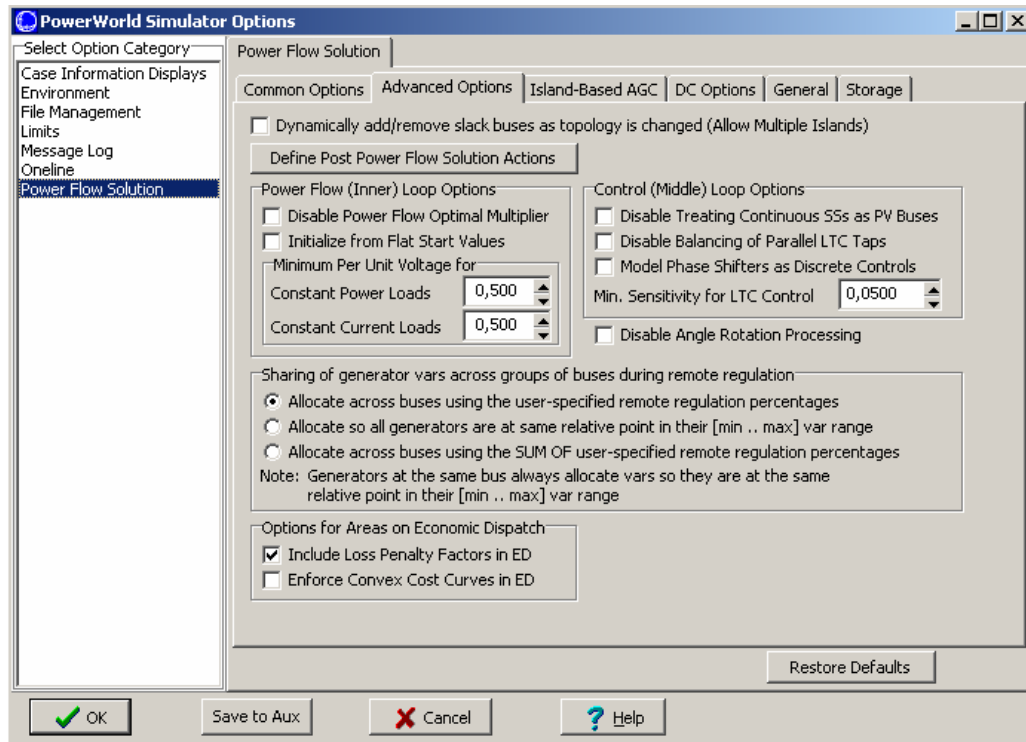
EKLER

EK 1. Simülâtör Yapılandırma Parametreleri

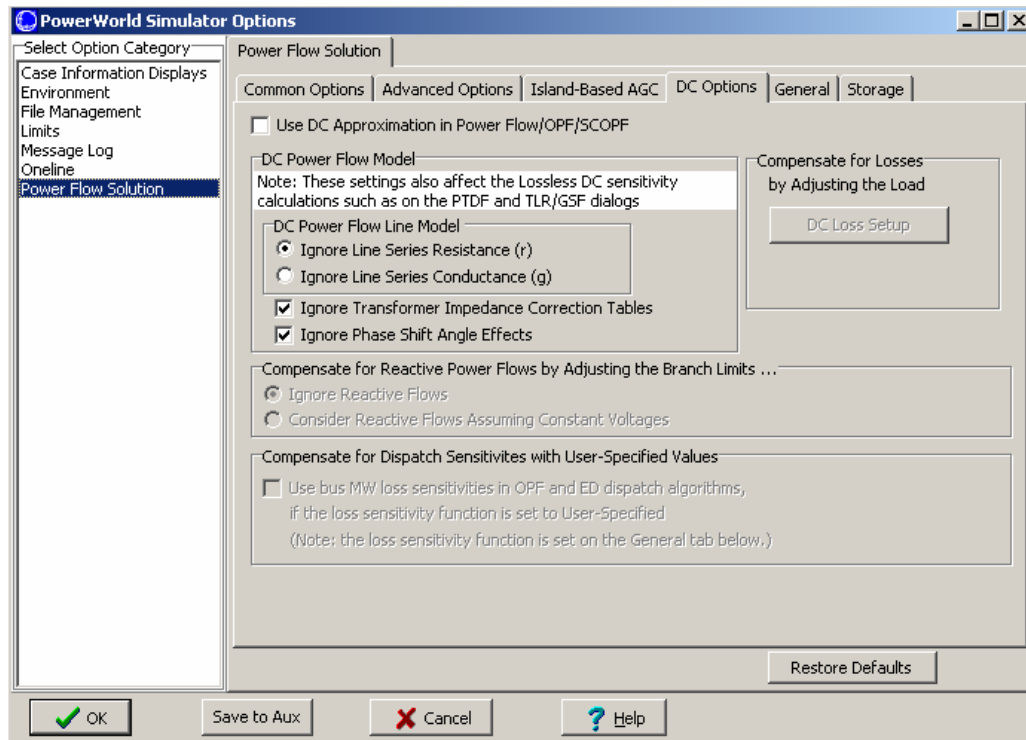
PowerWorld Simulator 12.0 Eğitim Sürümüne ilişkin yapılandırma parametreleri aşağıda şekiller ile verilmiştir.



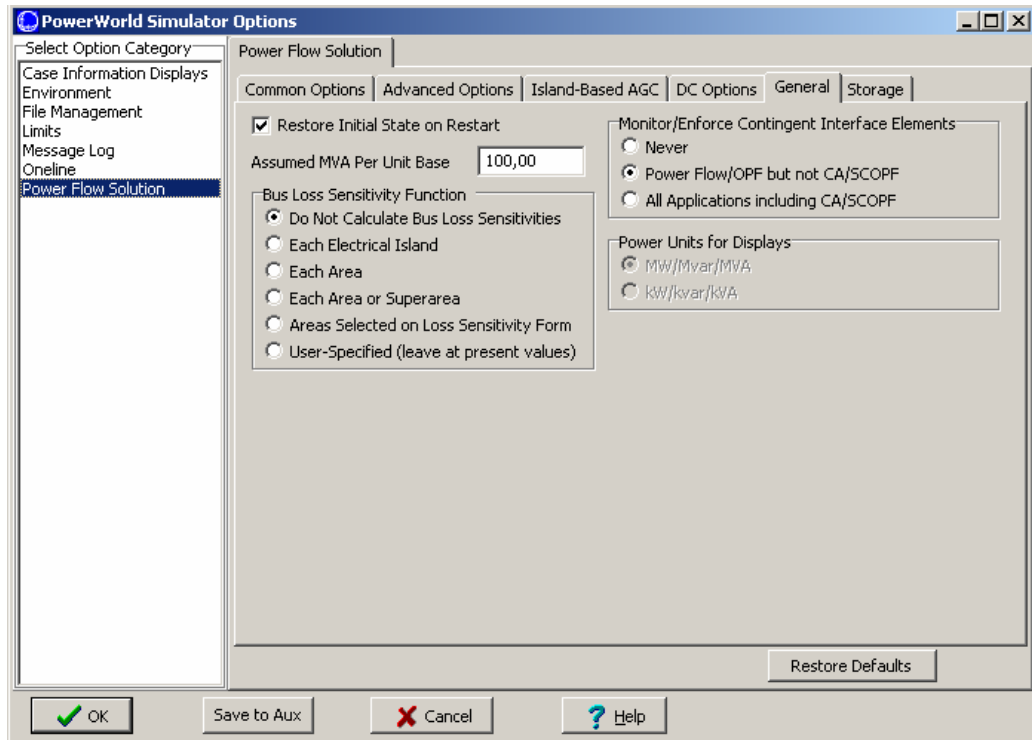
Şekil Ek1.1 Ortak özellikler



Şekil Ek1.2 Gelişmiş özellikler



Şekil Ek1.3 DC Analiz özellikler



Şekil Ek1.4 Genel özellikler

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve liseyi Adapazarı'nda tamamladı. 1995 senesinde Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1999 senesinde Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, yüksek lisans eğitimini tamamlayarak yüksek mühendis unvanını almıştır. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Halen öğrenimine ve ağaç sanayinde iş hayatına devam etmektedir.