

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM
KARARLILIĞI VE İYİLEŞTİRİLMESİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Burak EĞRİDERELİ

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM
KARARLILIĞI VE İYİLEŞTİRİLMESİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Burak EĞRİDERELİ
(504021011)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ocak 2006

Tez Danışmanı	Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK
Diğer Jüri Üyeleri	Doç. Dr. İstemihan GENÇ (İ.T.Ü)
	Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU(Kocaeli Ü.)

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bana destek olan, çalışmalarım sırasında beni yönlendiren ve fikirlerini benimle paylaşan hocam Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK' a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini sürekli hissettiğim aileme teşekkür ederim.

ARALIK 2005

Burak EĞRİDERELİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI	4
2.1. Giriş	4
2.2. Gerilim Kararlılığının Tanımı	5
2.2.1. Tanım 1 (CIGRE)	5
2.2.2. Tanım 2 (IEEE)	5
2.3. Gerilim Kararsızlığının Sınıflandırılması	6
2.4. Gerilim Çöküş Mekanizması	7
2.4.1. Gerilim Çökmesinin Oluşumu	9
2.4.2 Gerçek Olaylara Bağlı Temel Karakteristik	10
2.5. Statik Ve Dinamik Analiz	11
2.6. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri	11
2.6.1. L-İndisi	11
2.6.2. P-V Eğrileri	13
2.6.3. V-Q Eğrileri	14
2.6.4. Tekil Değer Analizi	15
2.6.5. Jakobien Matrisi Determinantı	18
3. SÜREKLİ YÜK AKIŞI VE DURUM ANALİZİ	19
3.1. Giriş	19
3.2. Sürekli Yük Akışı Tekniği	19
3.2.1. Temel Prensipte	20
3.2.2. Yük Akışı Denklemlerinin Tekrar Düzenlenmesi	21
3.2.3. Tahmin Basamağı	24
3.2.4. Düzeltme Basamağı	26
3.2.5. Matematiksel Formülasyon	29
3.2.6. Süreklilik Parametresinin Seçimi	31
3.3. Durum Analizi	31
3.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Cihazlarının Yerleşimi İçin Aday Bara Belirlenmesi	35

4. GERİLİM KARARLILIĞI İNDİSLERİ	37
4.1. Giriş	37
4.2. Gerilim Kararlılığı İndisleri	37
4.2.1. Durum Analizi ve Jakobien Matrisi Özdeğerleri	37
4.2.2. L-İndisi	39
4.2.2.1. L-İndislerinin Hesaplanması	40
5. FACTS CİHAZLARI VE YÜK AKIŞI KONTROLÜ	42
5.1. Giriş	42
5.2. Yük Akışı Kontrolü	42
5.2.1. Şönt Kompanzasyon	45
5.3. Facts Cihazları	46
5.3.1. Statik Var Kompanzatörleri (SVC) ve Sistemleri	46
5.4 Statik Var Kompanzatörlerinin Yeri ve Boyutunun Seçimi	49
5.4.1. Yük Akışı için SVC Modeli	50
6. ÖRNEK SİSTEM ÇALIŞMALARI	51
6.1. Giriş	51
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
8. KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	

KISALTMALAR

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTC	: Load Tap Changer
ULTC	: Under Load Tap Changer
SVD	: Singular Value Decomposition
SVC	: Statik Var Compensator

TABLO LİSTESİ

Sayfa No.

Tablo 2.1	: Gerilim çöküşünde cevap süreleri.....	7
Tablo 6.1	: 14 baralı sistem gerilim kararlılık indisleri.....	54
Tablo 6.2	: 30 baralı sistem gerilim kararlılık indisleri.....	55
Tablo 6.3	: 14 baralı sistem yük baraları L-indislerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	56
Tablo 6.4	: 30 baralı sistem yük baraları L-indislerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	57
Tablo 6.5	: Örnek sistemlere ait $\sum L^2$ değerleri.....	58
Tablo 6.6	: 14 baralı sistem yük baralarının J_R matrisi özdeğerlerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	59
Tablo 6.7	: 30 baralı sistem yük baralarının J_R matrisi özdeğerlerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	60
Tablo 6.8	: 14 baralı sistem yük baralarının J_R^{-1} matrisi köşegen elemanlarına göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	61
Tablo 6.9	: 30 baralı sistem yük baralarının J_R^{-1} matrisi köşegen elemanlarına göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.....	62
Tablo 6.10	: 14 baralı sistem için yük artımının L-indislerine etkisi.....	63
Tablo 6.11	: 30 baralı sistem için yük artımının L-indislerine etkisi.....	64
Tablo 6.12	: 14 baralı sistem için yük artımının jakobien matrisi özdeğerlerine etkisi.....	65
Tablo 6.13	: 30 baralı sistem için yük artımının jakobien matrisi özdeğerlerine etkisi.....	66

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Gerilim çöküş mekanizması için örnek radyal sistem.....	8
Şekil 2.2 : İki baralı sistem için hat diyagramı.....	12
Şekil 2.3 : P-V eğrileri.....	14
Şekil 2.4.a : İşletme Noktasının V-Q Eğrilerinde Gösterimi.....	15
Şekil 2.4.b : Şönt Kompanzasyon Cihazlarının Karakteristiklerinin Gösterimi...	15
Şekil 3.1 : Sürekli yük akışında işletme noktalarının bulunması.....	20
Şekil 3.2 : Sürekli yük akış analizi basamakları.....	21
Şekil 3.3 : Sürekli yük akışı tahmin-düzeltilme basamakları	24
Şekil 3.4 : Canizare' s yöntemi grafiksel gösterimi.....	27
Şekil 3.5 : Chiang' s yöntemi grafiksel gösterimi.....	28
Şekil 5.1 : Örnek enerji iletim sistemi.....	44
Şekil 5.2 : P, Q ve δ arasındaki ilişki.....	45
Şekil 5.3 : Örnek iletim sistemi için yük akışı.....	46
Şekil 5.4 : Transfer edilen güç ile açı değişimi.....	46
Şekil 5.5 : Svc süseptans modeli.....	47
Şekil 6.1 : IEEE 14 baralı örnek sistem.....	52
Şekil 6.2 : IEEE 30 baralı örnek sistem.....	53
Şekil 6.3 : 14 baralı sistemde 14 no' lu bara L-indisi değişimi.....	68
Şekil 6.4 : 14 baralı sistemde 13 no' lu bara L-indisi değişimi.....	69
Şekil 6.5 : 14 baralı sistemde 9 no' lu bara L-indisi değişimi.....	69
Şekil 6.6 : 14 baralı sistemde λ_{14} ' ün değişimi.....	70
Şekil 6.7 : 30 baralı sistemde 30 no' lu bara L-indisi değişimi.....	71
Şekil 6.8 : 30 baralı sistemde 29 no' lu bara L-indisi değişimi.....	72
Şekil 6.9 : 30 baralı sistemde λ_{30} ' un değişimi.....	72
Şekil 6.10 : 14 baralı sistemde 14 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{14} ' ün değişimi.....	74
Şekil 6.11 : 14 baralı sistemde 14 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{13} ' ün değişimi.....	75
Şekil 6.12 : 14 baralı sistemde 14 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_9 ' un değişimi	75
Şekil 6.13 : 14 baralı sistemde SVC büyüklüğü ile λ_{14} , λ_{13} , λ_9 değişimi.....	76
Şekil 6.14 : 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{30} ' un değişimi.....	77
Şekil 6.15 : 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{29} ' un değişimi.....	77
Şekil 6.16 : 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{28} ' in değişimi.....	78
Şekil 6.17 : 30 baralı sistemde SVC büyüklüğü ile λ_{30} , λ_{29} , λ_{28} değişimi.....	78

Şekil 6.18	: 14 baralı sistem için SVC ile L-indisleri değişimi.....	79
Şekil 6.19	: 30 baralı sistem için SVC ile L-indisleri değişimi.....	80
Şekil 6.20	: 14 baralı sistemin SVC' siz gerilim profili.....	81
Şekil 6.21	: 14 baralı sistemin 50 MVar' lık SVC ile gerilim profili.....	81
Şekil 6.22	: 30 baralı sistemin SVC' siz gerilim profili.....	82
Şekil 6.23	: 30 baralı sistemin 25 MVar' lık SVC ile gerilim profili.....	82
Şekil 6.24	: 14 baralı sistemde SVC' nin gerilim profiline etkisi.....	83
Şekil 6.25	: 30 baralı sistemde SVC' nin gerilim profiline etkisi.....	84
Şekil 6.26	: 14 baralı sistemde PV reaktif limitlerinin dahil olup olmaması halinde $S-\lambda_{14}$ değişimi.....	85
Şekil 6.27	: 14 no' lu baraya ait P-V eğrisi.....	86
Şekil 6.28	: 30 no' lu baraya ait P-V eğrisi.....	87
Şekil 6.29	: Üreteç reaktif güç limitleri dahil olduğunda 14 no' lu bara P-V eğrisi.....	88
Şekil 6.30	: Üreteç reaktif güç limitleri dahil olduğunda 30 no' lu bara P-V eğrisi.....	88

SEMBOL LİSTESİ

Y	: Bara admitans matrisi
$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$	: Bara admitans matrisi elemanları
S_1	: Kompleks güç
V_1, V_2	: Düğüm gerilimleri
I_1	: Bir no' lu düğüm akımı
L_j	: L-indisi
$f(x)$	: Non-lineer fonksiyon
x	: Non-lineer fonksiyon değişkeni
J	: Sistem jakobien matrisi
i	: İterasyon adım aralığı
P_k	: K barasına aktarılan aktif güç
Q_k	: K barasına aktarılan reaktif güç
V	: Bara gerilimi
δ	: Gerilim faz açısı
θ	: Admitans açısı
Y_{Kn}	: Bara admitans matrisi elemanı
$P(x)$	: Aktif enerji fonksiyonu
$Q(x)$	: Reaktif enerji fonksiyonu
n	: Toplam bara sayısı
PV	: Generatör barası
PQ	: Yük barası
i	: Bara indeks elemanı
P_{Gi}	: i' nci bara aktif gücü
P_{Qi}	: i' nci bara reaktif gücü
P_{Ti}	: i' nci bara net aktif gücü
g_{ij}, b_{ij}	: Bara admitans matrisi elemanları kutupsal bileşenleri
P_{Li0}	: Temel durumdaki aktif güç
Q_{Li0}	: Temel durumdaki reaktif güç
k_{Li}	: Yük değişim hızı çarpanı
Ψ_i	: Bara güç faktörü
S_Δ	: Görünen güç
λ	: Yük parametresi
λ_i	: Jakobien matrisi özdeğeri
t	: Teğet vektör matrisi
F_λ	: Yük/üretim fonksiyonu
β_i	: Ağırlık faktörü
σ	: Tahmin basamağı adım aralığı
v	: Bara gerilim büyüklüğü vektörü
K	: % yük değişim vektörü
x_k	: Süreklilik parametresi durum değişkeni
m	: Teğet vektörü boyutu
ΔP	: Reel güç artış miktarı
ΔQ	: Reaktif güç artış miktarı

$\Delta\theta$	: Gerilim açısı artış miktarı
J_R	: İndirgenmiş jakobien matris
ξ	: J_R sağ özvektör matrisi
Λ	: J_R sol özvektör matrisi
η	: J_R köşegen özvektör matrisi
q	: Modal reaktif gücü vektörü
U,V	: nxn boyutunda orthonormal matrisler
Σ	: nxn boyutunda diagonal orthonormal matrisler
σ_i	: A matris tekil değeri
L	: L-indisi

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI VE İYİLEŞTİRİLMESİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Elektriksel güç, ekonomik ve çevresel sebepler yüzünden uzun mesafelere iletildiği için son yıllardaki ilgi, gerilim kararlılığı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda, gerilim kararlılığı tüm işletim koşulları altında sürekli halde belirlenen işletim limitlerindeki yüklerin gerilim genliklerinin kararlılığını muhafaza etmek amacıyla, yeterli reaktif güç beslemesini, sistemin sağlama kabiliyeti olarak verilebilir.

Gerilim kararlılığı problemi, yakın zamanda enerji sistemlerinde meydana gelen birçok arıza nedeniyle araştırmacıların ilgisini çeken ciddi bir konu haline gelmiştir ve bu problemin üzerinde daha da fazla durulmasına sebep olmuştur. Ekonomik sebepler yüzünden, enerji sistemleri maksimum yüklenilebilirlik sınırlarında işletilmektedirler ve bunun bir sonucu olarak, sistemlerin gerilim çöküşlerine maruz kalma ihtimali artmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak, gerilim kararlılığı konusu, gerilim kararsızlığının oluşum mekanizması, analiz yöntemleri, sürekli yük akışı ve tanımlanan indislerin performanslarının incelenmesiyle ele alınmıştır. İndislerin performanslarının incelenmesinde kullanılan iki test sistemi için yapılan yük artımı ile indislerin değişimleri incelenip, birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Daha sonra, gerilim kararsızlığının iyileştirilmesinde kullanılacak olan reaktif güç kompanzasyon cihazlarının en uygun baralara yerleşimi için, sistemlere ait indirgenmiş jakobien matrislerinin tersinin köşegen elemanları incelenmiş ve reaktif güç kompanzasyon cihazlarının yerleşimi için en uygun baralar belirlenmiştir. Bu cihazlar baralara yerleştirildikten sonra, gerilim kararsızlığındaki ve gerilim profilindeki gelişmeler incelenmiştir.

Klasik yük akışı denklemlerinin, gerilim kararlılık sınırının tespitinde yetersiz kaldığı noktada, sürekli yük akış analizi kullanılmıştır. Bu amaçla klasik yük akış denklemleri tekrar düzenlenip, sürekli yük akış analizine uygun hale getirilmiştir.

Belirlenen bu kritik baralara ait P-V eğrileri, sürekli yük akışı yöntemiyle elde edilip, baraların gerilim kararsızlığına geçtikleri noktalar tespit edilmiştir.

Tezde, sistemlerdeki üreteçlerin PV reaktif güç limitleri ihmal edildiğinden, bu limitlerin dahil edilmesi durumundaki indislerin değişimi incelenmiş ve baraların gerilim kararsızlığına çok daha çabuk sürüklendiği, indisler bazında gözlemlenmiştir.

ELECTRIC POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY AND ENHANCEMENT ANALYSIS

SUMMARY

The planning, operation and control of a power system are to a significant extent governed by stability consideration. Power system stability may be broadly defined as that property of a power system that enables it to remain in a state of operating equilibrium under normal operating conditions and to regain an acceptable state of equilibrium after being subjected to a disturbance.

The voltage stability problem in power systems is attracting more attention from researchers around the world mainly because of several voltage collapse incidents in recent history. Due to power system restructuring as well as utility economics these days, many companies operating their systems close to the maximum loadability limits thereby unwittingly pushing their systems toward the brink of collapse. Hence, the voltage stability problem have become more prominent.

First of all, voltage instability mechanism, analysis methods, continuation power flow, modal analysis and voltage stability indices are studied. Load increase is made for the two test systems to compare the reactions of the voltage stability indices.

Then, reactive compensation devices that are used to enhance the voltage stability of the load buses, are placed to the most critical load buses of the systems. The diagonal elements of the J_R^{-1} matrix are used to determine the most suitable buses to locate the devices. The effect of the devices on both voltage stability and voltage magnitude profile of the buses is determined.

In some cases, finding voltage stability margin of the power systems with conventional power flow equations are impossible. At that point, continuation power flow analysis is used. For this purpose, conventional power flow equations are rearranged.

The P-V curves for the most critical buses of the systems are drawn by the help of continuation power flow. By the help of these curves, the points where the buses pass voltage instability zone are mentioned.

In the thesis, PV reactive power limits of the generators are ignored. The reactions of the indices when the limits of the generators are included are studied. Then the results are compared and found that when limits are included, buses pass to voltage instability zone very earlier.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç, teknolojik gelişmeler ve nüfus artışına bağlı olarak hızla artmaktadır. Enerji üretim ve tüketim merkezleri arasındaki uzaklıkların büyük olması enerji iletiminde, oldukça uzun yüksek gerilim hatlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bir elektrik güç sisteminin planlaması, işletimi ve kontrolünde, enerji sisteminin kararlılığının da göz önüne alınması gerekmektedir.

Enerji sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası, tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteğeni anlamındadır. Senkronizmanın ani olarak kaybının söz konusu olduğu ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa devreler gibi büyük bozucu etkilere sistemin cevabı; geçici hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonra mekanik regülatörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye cevabı, dinamik hal kararlılığı ve beklenen yük değişimleri ya da küçük bozucu etkilere sistemin cevabı ise sürekli hal kararlılığı olarak adlandırılır [1,2].

Diğer yandan; gerilim kararlılığı, tüm işletim koşulları altında sürekli halde belirlenen işletim limitlerinde, yük gerilimi genliklerinin kararlılığını muhafaza etmek için yeterli reaktif güç beslemesini sistemin sağlama kabiliyetidir [3]. Elektriksel güç, ekonomik ve çevresel nedenler yüzünden uzun mesafelere iletildiği için gerilim kararlılığı son yıllarda üzerinde çokça durulan bir konu haline gelmiştir. Son yıllarda, gerilim kararsızlığı bir çok şebeke çökmelerine neden olmuştur. Buna ilişkin örnekler;

- Amerika Birleşik Devletleri, Florida, 22 Eylül 1977
- Fransa, 19 Aralık 1978
- Belçika, 4 Ağustos 1982
- Amerika Birleşik Devletleri, Florida, 2 Eylül 1982
- Japonya, Tokyo, 23 Haziran 1987
- Amerika Birleşik Devletleri, Batı Tennessee, 22 Ağustos 1987 [4,5].

Gerilim kararlılığı incelemelerinde kullanılan yöntemler sürekli hal (statik) ve dinamik yöntemler olarak ikiye ayrılır. Sürekli hal yöntemlerinden bazıları,

- Jakobien matrisi tekil değeri [6]
- Jakobien matrisi özdeğerleri [7]

Bir güç sisteminin güvenilir ve arzu edilir şekilde çalışmasını sağlamak için gerilim kararlılığı açısından iyileştirici önlemlerin alınması gerekir. Sistemde gerilim kararlılığını iyileştirmek için, tasarım ve işletim aşamasında bir takım önlemler alınabilir. Bunlara örnek olarak; reaktif güç kompanzasyon cihazlarının uygun yerlere konumlandırılması ve kontrolü, ayrıca kritik durumlarda yük atmanın gerçekleştirilmesi verilebilir [5,8].

Gerilim kararsızlığının başlıca nedeni yeterli reaktif güç verilememesi olduğu için, reaktif güç rezervleri yeterli miktarda ve uygun yerlerde yerleştirilmiş olmalıdır. Sistemde hangi baralara reaktif güç kompanzasyon cihazlarının yerleştirileceği problemi genellikle hassasiyet analizleri kullanılarak incelenir [8,9]. Bu tezde, hangi baralara reaktif güç rezervlerinin yerleştirileceğinin belirlenmesinde, indirgenmiş jakobien matrisi tersinin köşegen elemanları kullanılmıştır.

Bu tezde, ilk olarak bölüm 2' de, gerilim kararlılığının genel olarak ifadesi ve gerilim kararlılığında kullanılan analiz yöntemlerinin incelenmesiyle başlanmıştır. İncelenen yöntemlerin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar irdelenip, gerilim kararlılığının analizinde hangi yöntemin en uygun olduğu incelenmiştir. Bölüm 3' te, sürekli yük akışı ve durum analizi incelenmiştir. Geleneksel yük akışı denklemlerinin sonuç vermediği bazı durumlarda, çözümün elde edilmesini sağlayan bu yöntem ile gerilim kararlılığı analizi gerçekleştirilip, indislerin performanslarının karşılaştırılmaları yapılabilmektedir.

Bölüm 4' te, performansları karşılaştırılacak olan gerilim kararlılığı indisleri hakkında bilgi verilip matematiksel formülasyonları incelenmiştir.

Bölüm 5' te gerilim kararsızlığının iyileştirilmesinde kullanılacak olan reaktif güç kompanzasyon cihazları hakkında bilgi verilmiştir. Facts cihazları gibi, gerilim kararsızlığının iyileştirilmesinde kullanılan cihazların tipleri ve kullanım alanları belirtilmiştir.

Bölüm 6’ da, 14 ve 30 baralı iki örnek sistem için gerilim kararlılık indisleri hesaplanıp karşılaştırmaları yapılmıştır. Sonra, gerilim kararlılığının iyileştirilmesinde kullanılacak olan statik reaktif güç kompensatörlerin (SVC) yerleştirileceği uygun yük baralarının bulunması için hassasiyet analizi yapılmıştır. Statik reaktif güç kompensatörlerin yerleştirileceği yük baralarının belirlenmesinin ardından, bu baralara SVC’ ler uygulanmış ve gerilim kararlılığı ve gerilim profilinde meydana getirdikleri gelişmeler verilip karşılaştırılmıştır.

Bölüm 7’ de, test sistemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırmaları yapıp, gerilim kararlılığı ve gerilim profilinde elde edilen sonuçlar hakkında yorumlarda ve tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI

2.1. Giriş

Gerilim kararlılığı problemi, yakın zamanda enerji sistemlerinde meydana gelen birçok arıza nedeniyle araştırmacıların ilgisini çeken ciddi bir unsur haline gelmiştir. 23 haziran 1987 tarihinde Tokyo enerji sisteminde tipik bir gerilim çöküş hadisesi meydana gelmiştir [4]. Öğle vakti sonrası yükteki artış miktarı %1/dakika idi. Önlem olarak tüm şönt kapasitörler devreye alınmış ancak 500 kV' luk sistemde gerilim düşmeye başlamıştı. 20 dakika içinde gerilim 0.75 pu' luk bir değere kadar düşmüştü. Koruma röleleri şebekenin bazı bölgelerinin irtibatını kesmiş ve 8000MW'lık bir yük düşüşü meydana gelmiştir.

Ekonomik sebepler yüzünden, enerji sistemleri maksimum yüklenilebilirlik sınırlarında işletilmektedirler ve bunun bir sonucu olarak, sistemlerin gerilim çöküşlerine maruz kalma ihtimali artmaktadır. Bu yüzden gerilim kararlılığının önemi daha da artmaktadır.

Gerilim çöküşünün dinamik yada statik bir fenomen olup olmadığı konusu bugüne dek tartışılan bir konudur [10]. Ancak bugün gerilim çöküşünün dinamik bir fenomen olduğu kabul görmüştür. Bununla birlikte birçok analiz, statik analiz yöntemleriyle yapılmaktadır.

Enerji sistemlerinde ortaya çıkabilecek gerilim kararsızlığı problemi, kararlılık analizinin sadece bir yönüdür [11]. Gerilim kararsızlığının tipik bir özelliği, sistemde meydana gelen çöküşün sonuna kadar sistem frekansının sabit kalmasıdır. Bu, aktif güç bakımından üretim ve tüketim arasında dengenin korunduğunu göstermektedir. Sistemin değişik bölgeleri arasında meydana gelebilecek olan güç dalgalanmaları sınırlayıcı bir fenomen olabilmektedir. Bununla birlikte bu durum, sistemde bir gerilim kararsızlığı durumunda, gerilim kararsızlığı sorunları ile elektro mekanik dalgalanmalarının birbirine karışması suretiyle ortaya çıkabilir. Bu durumda, gerilim kararlılığını açısıl kararlılıktan ayırt etmek oldukça zor olmaktadır. Bu bölümde;

gerilim kararlılığının temel konseptleri, analiz yöntemleri ve güç sistem modelleri ele alınmıştır.

2.2. Gerilim Kararlılığının Tanımı

Literatürde gerilim kararlılığının çeşitli tanımları bulunmaktadır. Bu tanımlar, zaman çerçevesinde, sistem durumlarını, büyük ve küçük arızaları dikkate almaktadır.

2.2.1. Tanım 1 (CIGRE)

CIGRE gerilim kararlılığını, diğer dinamik kararlılık problemlerine benzer şekilde genel bir yolla tanımlamıştır [12]:

“Bir sistemin küçük arıza kararlılığına sahip olduğu, meydana gelen küçük bir arızanın ardından, yüklere yakın bölgelerdeki gerilimlerin benzer veya arıza öncesi değerlerine yakın olarak kalabilmesidir.”

Bir arızaya maruz kalmış ve belirli bir çalışma durumunda bulunan bir sistemin, yüklere yakın bölgelerdeki gerilim değerleri arıza sonrası denge değerlerine benzerlik gösteriyorsa kararlı olduğu söylenebilir.

Arıza sonrası denge gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırların altında bulunması halinde sistem gerilim çöküşüne uğramaktadır.

2.2.2. Tanım 2 (IEEE)

Gerilim kararlılığı hakkında IEEE tarafından yapılan tanımlar aşağıda belirtildiği gibidir [13]:

“Gerilim kararlılığı; sistem geriliminin belirli sınırlar içinde korunmasıdır ki böylece yük admitansı yükseldiğinde, yükün gücü de artacak ve böylece hem güç hem de gerilim kontrol edilebilir olacaktır. Gerilim çöküşü, sistemin büyük bir bölümünde meydana gelen gerilim kaybının yol açtığı gerilim kararsızlığı durumunun bir sonucudur.”

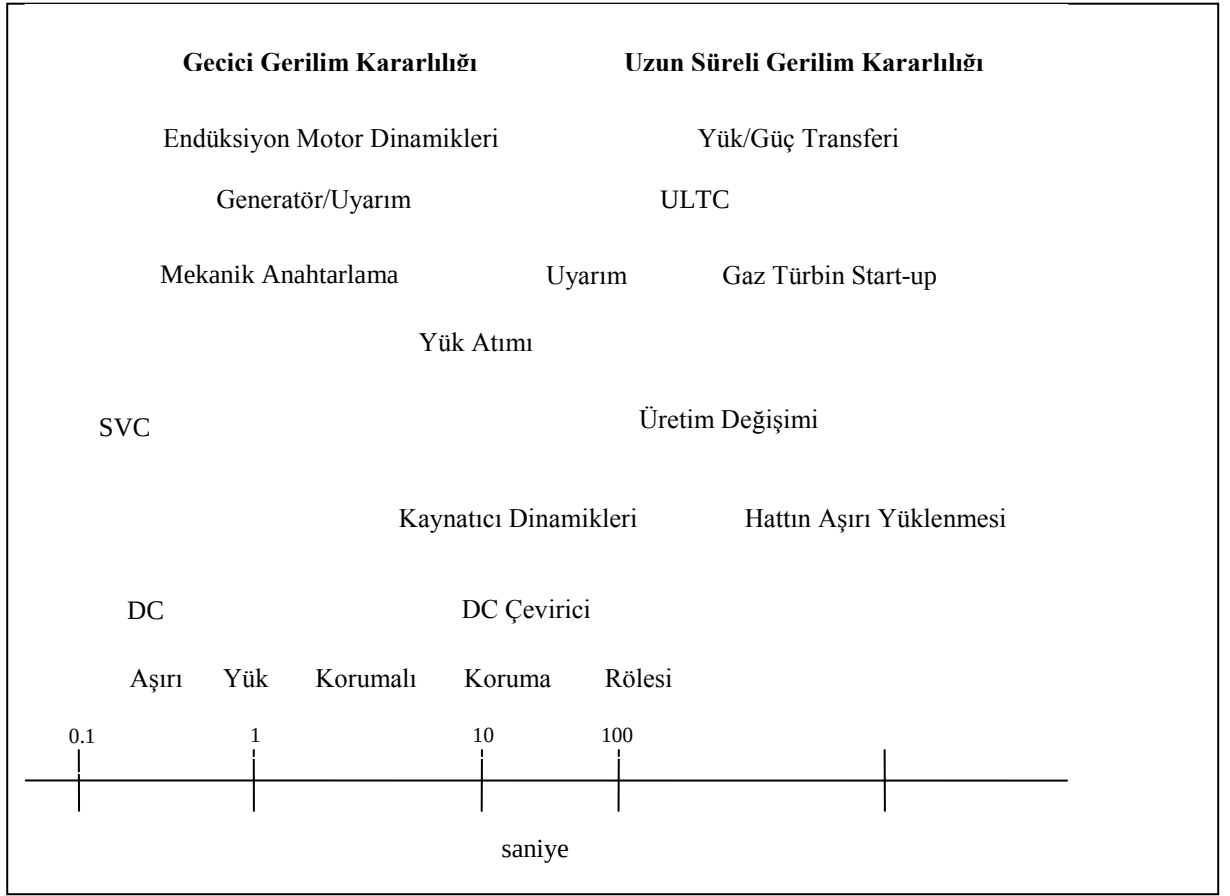
“Gerilim güvenliği, sistemin sadece kararlı bir şekilde çalışma kabiliyeti değil, aynı zamanda meydana gelebilecek çeşitli arıza yada işletme durumları karşısında kararlı halde kalabilme (sistem geriliminin iyileştirilmesine kadar olan süre boyunca) yeteneğidir.”

“Bir sistemde gerilim kararsızlığı durumu, yükteki artış veya sistemde meydana gelen değişimlerden dolayı gerilimin hızla aşağıya düşmesi ve işletmeci ve otomatik kontrol sistemlerinin hatayı düzeltmekte yetersiz kaldığı durumlarda meydana gelir. Gerilim düşüşü birkaç saniye olabileceği gibi 10-20 dakika kadar da sürebilir. Eğer düşüş azalmadan devam ederse, kararlı hal açısızlık ve gerilim çöküşü kaçınılmazdır.”

2.3. Gerilim Kararsızlığının Sınıflandırılması

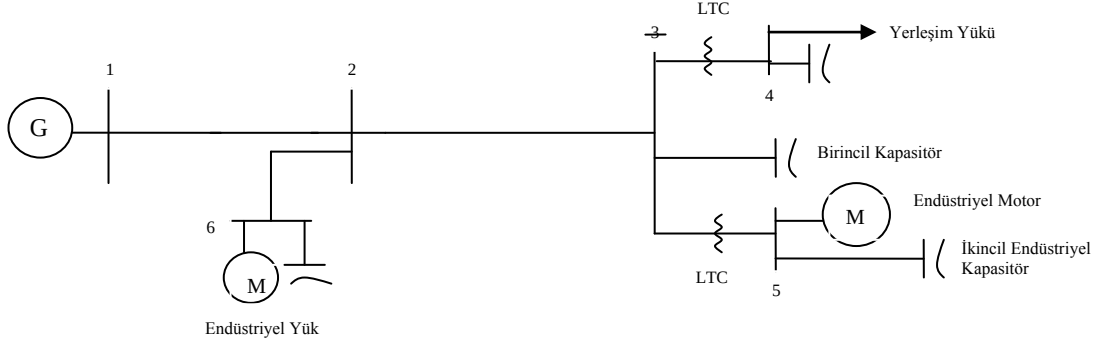
Gerilim kararsızlığı dinamikleri süre bakımından, saniyeden daha ufak sürelerden onlarca dakikalara kadar uzanan zaman aralıklarını kapsayabilmektedir. Dinamik fenomenin açıklanması için cevap süresi çizelgesi kullanılmıştır. Tablo 2.1, generatörler, uyarma sistemleri, endüksiyon motorları, koruma röleleri ve üretim kontrolleri gibi birçok güç sistemi bileşen ve kontrolleri, gerilim kararlılığında rol oynamaktadırlar. Sistem karakteristikleri ve arıza hangi fenomenin daha önemli olduğunu belirleyecektir. Tablo 2.1’ de gerilim kararlılığı; geçici gerilim kararlılığı ve uzun dönem gerilim kararlılığı olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.1 Gerilim çöküşünde cevap süreleri



2.4. Gerilim Çöküş Mekanizması

Gerilim çöküşünün incelenmesi için Şekil 2.1' deki gibi bir radyal sistem [14] ele alınabilir. Bu sistem bir adet **i)** endüstriyel yük, bir adet **ii)** yerleşim yükünden oluşmaktadır. Bu yükler değişik karakteristik özelliklere sahiptir. Endüstriyel yüklerin büyük bir bölümü endüksiyon motorlarından oluşmaktadır ve bunlar düşük güç faktörlerinde çalışmaktadırlar. Bu yükler gerilim dalgalanmalarından önemli bir şekilde etkilenmezler. Buna karşın yerleşim yükleri, daha yüksek güç faktörlerinde çalıştıkları gibi, gerilimde meydana gelen değişimlerden etkilenirler.



Şekil 2.1: Gerilim çöküş mekanizması için radyal sistem

Gerilim çöküşü, yükte meydana gelen bir artış veya iletim hattının yada generatörün kaybindan dolayı meydana gelmektedir. Bu, iletim hattı sonundaki gerilimin düşmesine sebep olur. Toplam yerleşim yükü, gerilimdeki düşüşle birlikte azalmaktadır. Endüstriyel yükler gerilimdeki bu düşüşten fazlaca etkilenmezler. Endüstriyel yüklerdeki reaktif güç kompanzasyon cihazları, reaktif güç katkısını azaltacaktır. Bu yüzden endüstriyel yüklerde net bir reaktif güç ihtiyacı oluşacaktır. Fakat bu, yerleşim bölgelerindeki yükün düşmesiyle büyük oranda dengelenmektedir. Bunun sonucu gerilim, başlangıç değerinin ortalama %95'lik bir değerine düşecek ve bu değerinde çalışmaya devam edecektir.

Yükün yakınındaki gerilim düştüğünde, transformatör LTC' leri devreye girecek ve hat sonundaki gerilimi arttırmaya çalışacaktır. Bu, yerleşim yükünün artmasına ve daha fazla reaktif güç çekmesine neden olacaktır. Yerleşim yükündeki bu artış, transformatörün birincil taraf geriliminin düşmesine yol açacaktır. Birincil taraftaki reaktif güç kompanzasyon cihazları daha az reaktif güç üreteceklerdir ve bu, reaktif güç kaybının artmasına neden olacaktır. Böylece gerilim, nominal değerinin ortalama %90' ına düşecektir.

Yerleşim yüklerinin büyük bir yüzdesi ısınmada kullanılmaktadır. Isıtıcılarda bulunan termostatlar, çıkış gücünü muhafaza etmek için yükü arttırmaya çalışırlar. Bu da gerilimin düşmesine sebep olur. Gerilim kabul edilebilir bir sınırın altına düştüğünde, endüstriyel yükler içinde bulunan endüksiyon motorlarının hızı düşecektir. Bu, endüksiyon motorları tarafından çekilen reaktif akımı arttıracak ve bütün sistemde bir gerilim çöküşüne sebep olacaktır. Tüm bu senaryo birkaç dakika ile birkaç saat arasında gerçekleşebilir.

2.4.1. Gerilim Çökmesinin Oluşumu

Tipik bir gerilim çöküşü aşağıdaki gibi gerçekleşir:

1. Güç sisteminde bulunan, yük merkezlerine yakın büyük üretim birimleri devre dışı kalabilir. Bunun sonucu olarak bazı enerji iletim hatları aşırı yüklenir ve reaktif güç kaynakları minimuma iner.
2. Aşırı yüklü bir hattın kaybı sonucu geri kalan hatlara ek yük biner. Bu, hatlardaki reaktif güç kaybını artırır. Bu nedenle sistemde büyük bir reaktif güç talebi oluşur.
3. Enerji iletim hattının kaybedilmesinin hemen ardından, ek reaktif güç talebine bağlı olarak yakın yük merkezlerinde önemli bir gerilim azalması olur. Ancak otomatik gerilim regülatörleri uyarmayı artırarak, terminal gerilimlerini eski değerine getirir. Bunun sonucu oluşan ek reaktif güç, generatör transformatörleri ve hatlar üzerinde daha büyük gerilim düşümü oluşturur. Bu aşamada, generatörlerin P-Q çıkış kapasiteleri, yani endüi ve uyarma akımlarının ısınma sınırları içinde olmaları beklenir. Hız regülatörleri, çıkış gücünü (MW) azaltarak frekansı düzenlerler.
4. Yük merkezlerinde enerji iletim hattı gerilim seviyesinin azalması, dağıtım sistemine de yansiyacaktır. Kademe değiştirici alt istasyon transformatörleri, 2-4 dakika arasında dağıtım gerilimi ve yüklerini eski durumlarına getirir. Her kademe değişimi ile enerji hattındaki yük artışı, hattın aktif ve reaktif kayıplarını artırır. Bunun sonucunda enerji iletim hatlarında daha büyük gerilim düşümleri oluşur.
5. Sonuç olarak, her kademe değiştirme işlemiyle sistem genelinde generatörlerin reaktif çıkışı artacaktır. Böylece generatörler birer birer izin verilen sürekli uyarma akımının belirlediği reaktif güç sınırına ulaşırlar. İlk generatör uyarma akımı sınırına ulaştığında uç gerilimi düşer. Belirli bir çıkış gücü (MW) için uç gerilimi düşünce, endüi akımı artar. Bu nedenle, endüi akımını izin verilen sınırlar içinde tutmak için reaktif çıkış sınırlanır. Paylaşılan reaktif yük diğer generatörlere gönderilecek, böylece aşırı yüklenen generatör sayısı gitgide artacaktır. Otomatik uyarma kontrollü generatör sayısı azaldıkça sistem gerilim kararsızlığına yatkın hale gelecektir.

Bu süreç sonunda gerilim çöküşü meydana gelecek ve büyük ihtimalle üretim birimlerinde senkronizasyon kaybı ve önemli bir gerilim çöküşü görülecektir [25].

2.4.2. Gerçek Olaylara Bağlı Temel Karakteristik

Dünyada meydana gelen gerilim çökmelerine dayanılarak, gerilim çökmesi aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:

1. Başlangıç olayı birçok nedene bağlı olabilir: Sistem yükündeki doğal artışlar gibi küçük sistem değişiklikleri ya da bir üretim biriminin kaybı veya aşırı yüklü bir hattın kaybı gibi ani büyük bozucular etkiler. Bazen hiç beklenmeyen bir bozucu etki, sistemi gerilim çöküşüne götürebilir.
2. Problemin ana noktası, sistemin reaktif taleplerini karşılayamamasıdır. Genellikle, fakat her zaman olmamakla birlikte, gerilim düşümü aşırı yüklü hatlarla birlikte sistem koşullarını da kapsar. Komşu alanlardan reaktif güç alımı zor olduğunda, ek reaktif güç desteği gerektiren her değişiklik gerilim düşümüne sebep olabilir.

Bazı durumlarda gerilim çöküş dinamiğinin süresi daha da kısa olabilir ve birkaç saniye sürebilir. Bu tür olaylar genellikle endüksiyon motorları veya DC çeviricileri gibi uygun olmayan yük elemanları nedeniyle gerçekleşir. Bu tür gerilim kararsızlığının zaman süresi rotor açısı kararsızlığı ile aynıdır. Birçok durumda gerilim ve açı kararsızlığı arasındaki ayrım açık olmayabilir ve her iki duruma ait koşullar da mevcut olmayabilir. Bu tür gerilim kararsızlığı geleneksel geçici kararlılık simülasyonlarıyla incelenebilir. Endüksiyon motor yükleri, generatör ve iletim ekipmanları ile ilgili olarak çeşitli kontrol ve koruma aletlerini içeren uygun modeller kullanılır.

3. Gerilim düşümü sistem koşulları ve karakteristiklerinden kuvvetle etkilenir. Gerilim kararsızlığı/düşmesine neden olan önemli faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Üretim merkezi ile yük birimleri arasındaki büyük uzaklık
- Düşük gerilim durumlarındaki kademe değiştirme
- Uygun olmayan yük karakteristikleri
- Çeşitli kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon eksikliği

4. Gerilim çökmesi problemi şönt kondansatörün kompanzasyonda çok fazla kullanılmasıyla artabilir. Reaktif güç kompanzasyonu, şönt kompanzatörler, Statik Var sistemleri ve senkron kondanserlerin birlikte kullanımı ile etkili şekilde gerçekleştirilebilir [25].

2.5. Statik Ve Dinamik Analiz

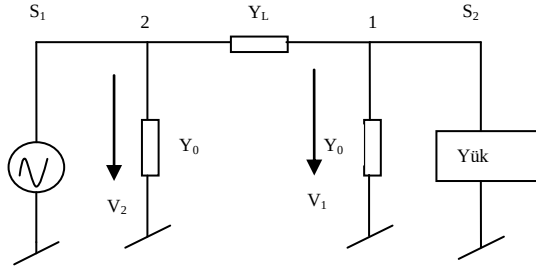
Gerilim kararlılığının statik veya dinamik bir fenomen olup olmadığı geçmişten beri tartışılan bir konudur. Dinamik ve statik kararlılık için zaman aralıkları farklıdır . Dinamik gerilim kararlılığı için zaman aralığı, milisaniyelerden birkaç saniyeye kadar uzanmaktadır. Bununla birlikte, statik gerilim kararlılığı için bu süre birkaç dakikadan birkaç saate kadar olmaktadır. Gerilim kararlılığında önemli rol oynayan 3 bileşen; tap değiştirici dinamikler, yük dinamikleri ve generatör uyarım dinamikleridir. Bu nedenle gerilim kararlılığı dinamik bir olaydır. Gerilim kararlılığı çoğunlukla bir kararlı hal durumu olarak yansıtılmıştır ve daha uzun zaman aralığı dahil edilerek göz önüne alınmıştır. Gerilim kararlılığının analizi için kullanılan yöntemlerin çoğu enerji sistemlerinin statik modelleri baz alınarak geliştirilmiştir. Bu sebeple statik gerilim kararlılığı yöntemleri üzerinde durulacaktır.

2.6. Gerilim Kararlılığı Analiz Yöntemleri

Gerilim kararlılığının analizinde en çok kullanılan 5 yöntem: **i)** L-indisi **ii)** P-V eğrileri **iii)** Q-V eğrileri **iv)** Tekil değer analizi **v)** Jakobien matrisi determinantı. Bu yöntemlere ek olarak bir de durum analizi yöntemi bulunmaktadır.

2.6.1. L İndisi

1986 yılında Kessel ve Glavitsch [16], hızlı bir gerilim kararlılığı indisi ileri sürmüşlerdir. Bu yöntem ile gerilim kararlılığı, sistemin çalışma noktası hesaplanmadan bulunabilmektedir. Şekil 2.2' de belirtildiği gibi iki baralı bir sistem düşünelim.



Şekil 2.2: İki Baralı Sistem için Hat Diyagramı

1 numaralı düğümün özellikleri sistemin admitans matrisi cinsinden ifade edersek.

$$Y_{11}.V_1 + Y_{12}.V_2 = I_1 = S_1^* / V_1^* \quad (2.1)$$

$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$ [Y] admitans matrisinin elemanlarıdır ve S_1 kompleks güçtür.

$$S_1 = V_1.I_1^* \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_1 + \frac{Y_{12}}{Y_{11}}.V_2 = \frac{S_1^*}{Y_{11}.V_1^*}$$

veya

$$V_1^2 + V_0.V_1^* = \frac{S_1^*}{Y_{11}} \quad (2.3)$$

Burada;

$$V_0 = \frac{Y_{12}}{Y_{11}}.V_2 = -\frac{Y_L}{Y_L + Y_0}.V_2 \text{ olmaktadır.}$$

Referans [16]' da ifade edildiği gibi, 2.3 no'lu denklemin çözümü sistemin gerilim kararlılık sınırını işaret etmektedir. Bu noktada;

$$\left| 1 + \frac{V_0}{V_1} \right| = \frac{S_1}{Y_{11}^*.V_1^2} = 1 \quad (2.4)$$

Bu ilişki, gerilim kararlılığının incelenmesinde L_j gibi bir indikatörün tanımlanmasında kullanılabilir. Tanım aralığı $0 < L_j < 1$ 'dir.

Tüm sistemin gerilim kararlılık durumunu belirten en genel indikatör, her baradaki maksimum L_j değerleridir. L indisi, sistemin o anki çalışma durumunun gerilim kararlılık sınırına olan uzaklığı hakkında bilgi vermesi açısından önem kazanmaktadır. L_j indikatörü, sistemde meydana gelebilecek gerilim çöküşünün hangi baralardan kaynaklanabileceği hakkında bilgi vermektedir.

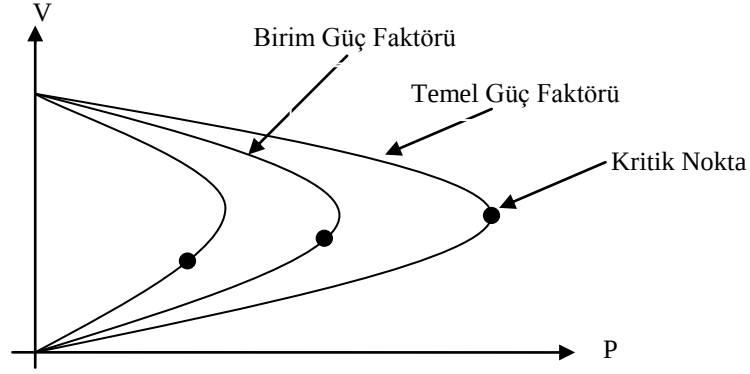
2.6.2. P-V Eğrileri

P-V eğrileri, toplam sistem yükünün (P), kritik bara gerilimine (V) göre değişimi şeklinde çizilir. Bu eğriler, yük akışı sonuçlarından yararlanılarak çizilir. Gerilim kararlılığı ile doğrudan ilişkili olan, kararlı hal yüklenebilirlik limitlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadırlar. Yük akışı, adım adım arttırılan yük durumları için gerçekleştirilir. Şekil 2.3, P-V eğrilerini göstermektedir. Şekil olarak paraboliktirler. Eğrinin üst yarısında, sistem yükü artarken gerilim düşmektedir. Bu bölgede eğim negatiftir. Eğrinin burun noktası (genellikle kritik nokta olarak da adlandırılır), yüke iletilebilecek maksimum gücü verir. Kritik noktaya karşılık düşen bara gerilimi *kritik gerilim* olarak adlandırılır. Sistemde bulunan belirli tek bir baranın gerilim profili, kritik noktanın tesbitini mümkün kılacaktır. Sistemin gerilim kararlılığı bu bara ile sınırlanmıştır. Bu baranın gerilim profili kullanılarak tüm sistemin gerilim kararlılığı hakkında çalışmalar yapılabilir ve bu bara *kritik bara* olarak adlandırılır. P-V eğrilerindeki bir dezavantaj, kritik noktaya yakın bölgede yük akışı Jakobien matrisinin tekil olma eğilimi göstermesi ve yük akışı çözümlerinin bu nokta etrafında sapmalar göstermesidir. Bu yüzden, sürekli yük akışı [15] gibi yöntemleri kullanarak, kritik noktaya yakın bölgede çözüm elde edilebilir.

P-V eğrileri, sistemin gerilim kararlılığı sınırının belirlenmesinde kullanılabilir. Gerilim kararlılık sınırı, sistemde bir gerilim çöküşü meydana getirebilecek ilave yük artışı olarak tanımlanabilir. Bu miktar, P-V eğrilerinden tesbit edilebilir ve kritik nokta ile temel yüklenme durumu arasındaki farka (MW) eşittir.

Şekil 2.3, farklı güç faktörleri için çizilen P-V eğrilerini göstermektedir. Güç faktörü değiştikçe kritik noktanın yeri de değişmektedir.

Kritik gerilim değeri temel güç katsayısında daha yüksektir. Bu gerilim kararlılığında önemli bir durumdur.

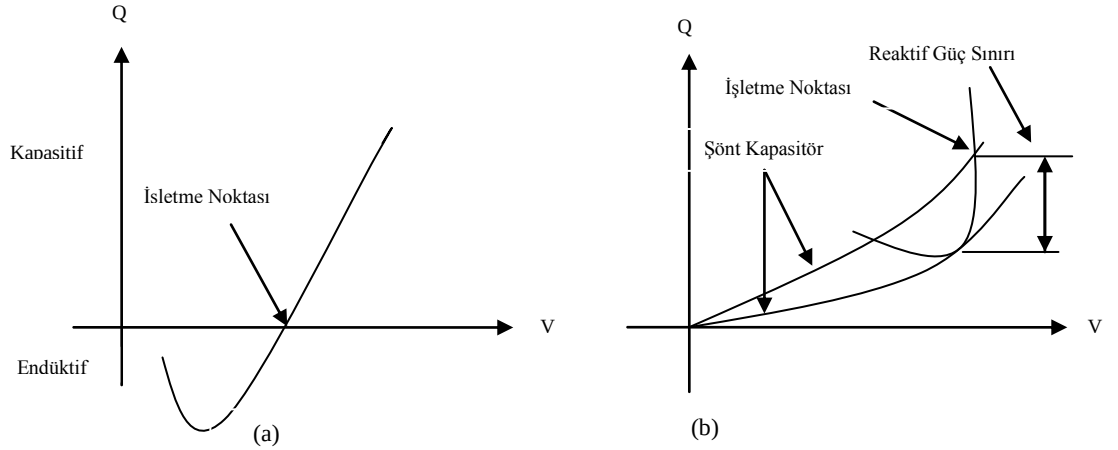


Şekil 2.3 : Enerji Sistemi P-V Eğrileri

2.6.3. V-Q Eğrileri

V-Q eğrileri, sistemdeki kritik baraya ait gerilimin aynı baranın reaktif gücüne göre değişimini gösterir. Baraya ait V-Q eğrisinin elde edilmesi için, belirli bir barada hayali bir senkron kondansatör tanımlanır ve bu baranın, reaktif güç limitleri olmayan gerilim kontrollü bir bara olduğu varsayılır. Senkron kondansatör geriliminin değişik değerleri için bir dizi yük akış simülasyonları yapılır ve buna karşılık gelen reaktif güç çıkış değerleri elde edilir. V-Q eğrileri, kondansatör reaktif güç çıkışının gerilime göre çizimiyle elde edilir. Gerilim, bağımsız değişken olarak alınır. Bu eğriden çalışma noktası, hayali senkron kondansatör çıkartılarak elde edilir. V-Q eğrilerinin bazı avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Gerilim kararlılığının reaktif güçle yakından ilişkili olduğu bilinmektedir ve gerilim kararlılık sınırı bu eğrilerden direkt olarak elde edilebilmektedir. Bu Şekil 2.4.a' da gösterildiği gibi, çalışma noktası ile eğrinin orta noktası arasındaki sınırdır.



Şekil 2.4 : a) İşletme Noktasının V-Q Eğrilerinde Gösterimi

b) Şönt Kompanzasyon Cihazlarının Karakteristiklerinin Gösterimi

- Şönt kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri aynı çizimler üzerinde direkt olarak çizilebilir. Bu durumda reaktif güç sınırı, çalışma noktası ile kompanzasyon cihazlarının V-Q eğrilerine teğet olduğu nokta arasındaki uzaklıkla hesaplanabilir. Bu, Şekil 2.4.b' de gösterilmektedir.
- Daha iyi bir analiz için, generatörlerin reaktif güçleri aynı çizim üzerinde gösterilebilir. Generatörlerden bazıları Var limitlerine ulaştığında, V-Q eğrisinin eğimi azalmaktadır.
- Test barası reaktif kompanzasyon karakteristikleri, V-Q eğrisi üzerine direkt olarak çizilebilir. V-Q sistem karakteristiği ile kompanzasyon karakteristiğinin kesişim noktası, işletme noktasını vermektedir (Şekil 2.4.b).

V-Q eğrileri kuruluşlar tarafından gerilim kararlılığının analizinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır.

2.6.4. Tekil Değer Analizi (SVD) [21-22]

1988'de Thomas ve Tiranuchit [6], jakobien matrisinin minimum tekil değerini temel alan global bir gerilim kararlılık indikatörü geliştirmişlerdir. Tanımladıkları bir A matrisinin, tekilliğe olan yakınlığının o matrisin minimum tekil değeri olduğunu kanıtlamışlardır. Düzeltme amaçlı kontrol ölçümlerinin türetilmesinde, göz önünde bulundurulması gereken önemli bir unsur, jakobien matrisinin tekilliğe ne kadar yakın olduğudur.

Yukarıdaki sorunun incelenmesi için aşağıdaki temel problemi ele alalım: Burada bir A matrisi tanımlayalım ve A matrisinin özelliklerini, $A + \Delta A$ 'nın tekil olduğunu varsayarak elde edelim.

$$A + \Delta A = A.(I + A^{-1}.\Delta A) \quad (2.5)$$

$(I + A^{-1}.\Delta A)$ teriminin tersinin olduğu ancak $|A^{-1}.\Delta A| < 1$ koşulu gerçekleştiğinde söylenebilir ve $|\Delta A| < \frac{1}{|A^{-1}|}$ koşulu gerçekleşmiş ise $|A^{-1}.\Delta A| < 1$ koşulu

sağlanmış demektir. Bundan dolayı, A matrisinin tekilliğe yakınlığı $|A^{-1}|^{-1}$ 'dir.

Gerilim kararlılığı indisinin faydasını daha iyi anlayabilmek için, matris formatında bir dizi non-linear matematiksel denklemler aşağıda tanımlanmıştır;

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ f_n(x) \end{bmatrix} = y \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemde x değişkeni için çözüm aramaktayız ve bu, Newton-Raphson iteratif metoduyla gerçekleştirilebilir.

Örneğin;

$$x(i+1) = x(i) + J^{-1} [y - f\{x(i)\}] \quad (2.7)$$

Burada J matrisi, tersi alınabilen bir matristir ve jakobien matrisi olarak adlandırılır. Newton-Raphson metodu yük akış problemini çözmek için kullanılabilir. Yük akış denklemleri kutupsal koordinatlarda aşağıdaki gibidir:

$$P_K = V_K * \sum_{n=1}^N Y_{Kn} \cdot V_n \cdot \cos(\theta_{Kn} + \delta_K - \delta_n) \quad (2.8)$$

$$Q_K = V_K * \sum_{n=1}^N Y_{Kn} \cdot V_n \cdot \sin(\theta_{Kn} + \delta_K - \delta_n) \quad (2.9)$$

P_K, Q_K : K barasına sağlanan aktif ve reaktif güçler

V_K, V_n : K ve n baralarındaki bara gerilimleri

δ_K, δ_n : K ve n bara gerilimlerinin faz açıları

θ_{Kn} : Admitans açısı

Y_{Kn} : Bara admitans matrisi elemanları

Yük akış problemi için

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Yük akışı için Jakobien matrisinin formu;

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

J matrisinin tersi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$J^{-1} = \frac{1}{|J|} * \text{Adj } J \quad (2.14)$$

Eğer $|J| = 0$ ise, Jakobien' in tersi yok ve tekildir. Jakobien matrisinin tekil değer analizi, sistemin gerilim çöküşüne olan yakınlığı hakkında bilgi vermektedir. Sistemin gerilim çöküşüne yaklaşması durumunda, jakobien matrisinin minimum tekil değeri sıfıra yaklaşmaktadır.

Tekil değer analizi, gerilim kararlılığının incelenmesinde etkili bir indis olmasına rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki, analiz için gerekli zamanın uzun olmasıdır. Binlerce baranın bulunduğu büyük sistemlerde analizin

yapılması için, uzun zaman ve çok büyük bir hafızaya ihtiyaç vardır. Diğer bir dezavantajı ise, tekil değerin sisteme bağımlı olmasıdır ve fiziksel hiçbir anlamının olmamasıdır. Bundan dolayı, minimum tekil değer ile reel kritik nokta arasındaki sınır hakkında bilgi elde edilememektedir. Bu durum sadece tekil değerin sıfır olması durumunda geçerli değildir.

2.6.5. Jakobien Matrisi Determinantı [18]

Yük akış yöntemi olarak en çok tercih edilen yöntemlerden biri Newton-Raphson yöntemidir ve jakobien matrisi bu yöntemin temelidir. Jakobien matrisi sistem denklemlerinden elde edilir. Yük akışı sonucunun bulunabilmesi için bu matrisin tersinin hesaplanması gerekmektedir. Normal işletme şartlarında jakobien' in işareti her zaman pozitif olmaktadır. Ancak jakobien matrisinin determinantı sıfıra yaklaşır veya sıfır olursa, sistem kararsız bölgede veya kararsızlık bölgesine yakın bir bölgede çalışıyor demektir. Bu durum aperiodyk bir kararsızlıktır çünkü muhtemelen yük ihtiyacı sağlanabilecek kapasitenin üstündedir. Ayrıca yeterli reaktif gücün sağlanamaması durumunda, gerilim çöküşüne sebep olma eğilimindedir.

Orta ve büyük sistemlerde bara sayısı çok fazla olduğu için, matrisin boyutu da artmaktadır ve jakobien matrisi determinantı bilgisayar kapasitesini aşacak duruma gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı, jakobien matrisi determinantı yöntemi küçük sistemler için daha uygundur.

3. SÜREKLİ YÜK AKIŞI VE DURUM ANALİZİ

3.1. Giriş

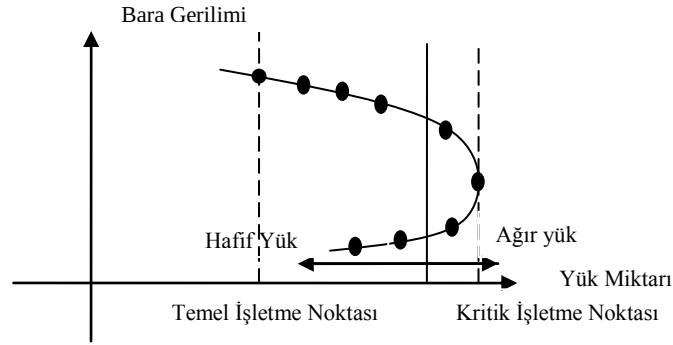
Gerilim kararsızlığı probleminin gün geçtikçe artan bir şikayet unsuru olmasından dolayı, kuruluşlar gerilim kararsızlığı problemi üzerine daha çok eğilmektedirler. Bu problemin incelenmesi için bazı teknikler geliştirilmiştir. Günümüzde bazı kuruluşlar problemin incelenmesinde, geçmişteki gerilim büyüklüklerini bir gerilim kararlılık göstergesi olarak alırken diğerleri, P-V yada Q-V eğrilerine dayanan performans kriterlerini kullanmaktadırlar.

3.2. Sürekli Yük Akış Tekniği

Bölüm 2.6’da ele alınan indislerdeki en önemli dezavantaj, Newton-Raphson yük akışına ait jakobien’ in gerilim kararlılık sınır noktasında tekil olmasıdır. Bu problem nedeniyle, geleneksel yük akış yöntemleri, sistemlerin gerilim kararlılık sınır noktasında yetersiz kalmakta ve sonuç verememektedir. Sürekli yük akış yöntemi bu sorunu, geleneksel yük akış denklemlerinin yeniden formüle edilmesiyle çözmektedir ve tüm yüklenme durumları için güvenilir sonuçlar vermektedir.

Son yıllardaki yük akışı hesaplamalarında genellikle, sürekli yük akışı tekniği uygulamaları yer almaktadır [16,17].

Sürekli yük akışında Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi, çözüm yolu boyunca bir dizi işletme noktasının belirlenmesi gerçekleştirilir. Bulunan işletme noktalarının oluşturduğu bu dizi, sürekli bir yük akışı çözümü oluşturur. Bu çözüm, temel işletme durumundan başlar, kararlı hal gerilim çöküş noktası olan kritik işletme noktasından geçer ve düşük gerilim bölgesine ulaşır.

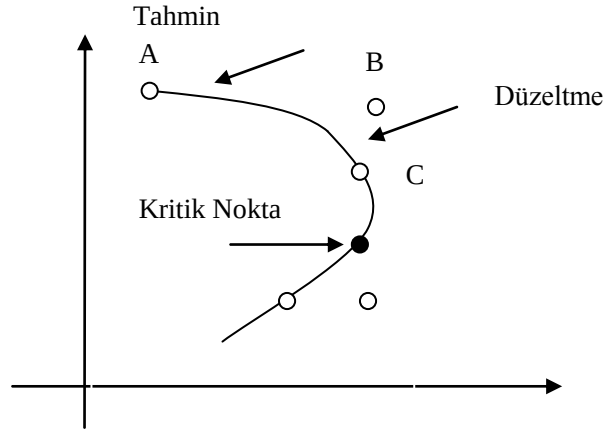


Şekil 3.1 : Sürekli Yük Akışında İşletme Noktalarının Bulunması

3.2.1. Temel Prensip

Bu teknik Ajjarapu ve Christy tarafından 1992 yılında geliştirilmiştir [15]. Sürekli yük akış analizi Şekil 3.2' de gösterildiği gibi, tahmin ve düzeltme fonksiyonlarını içeren iteratif bir işlemler bütünüdür. Bu bölümde sürekli yük akışının genel konseptleri verilmiştir. Yük akış denklemlerinin tekrar formülasyonundan sonra sürekli yük akışının çözümünde kullanılan tahmin-düzeltilme şeması analiz edilmiştir. Birçok tahmin-düzeltilme şemaları benzer tahmin basamaklarına sahiptir ancak düzeltme basamaklarında farklılıklar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- V.Ajjarapu ve C.Christy [15] tarafından geliştirilen sabit süreklilik parametresi metodu,
- C.A.Canizares ve F.L.Alvarado [19] tarafından geliştirilen Dikey plan metodu ve
- H.D.Chiang [20] tarafından geliştirilen sabit ark uzunluğu metodu



Şekil 3.2 Sürekli yük akış analizi basamakları

Başlangıçta bilinen bir çözüm kullanılarak (A), belirli bir bölgedeki yük artışı için bir teğet tahmin doğrusu kullanılarak, bu duruma ait çözüm (B) kestirilir. Bir sonraki işlem olan düzeltme basamağında, geleneksel yük akış yöntemleri kullanılarak kesin sonuç (C) elde edilir ve bu işlem sırasında sistem yükünün sabit olduğu kabul edilir.

3.2.2. Yük Akışı Denklemlerinin Tekrar Düzenlenmesi

Sürekli yük akış tekniğinin arkasındaki temel prensip, tekrar formüle edilen yük akış denklemleri üzerinde ifade edilen tahmin-düzeltilme şemasıdır. Bu bölümde yük akış denklemleri formüle edilecektir. N-baralı bir sistem için olan klasik yük akış denklemleri

$$P_{Gi} - P_{Li} = P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.1)$$

$i \in PV$ ve PQ bara indeksi

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.2)$$

$i \in PQ$ bara indeksi

$$V_i = V_{i0} (sabit) \quad i \in PV \text{ baraları indeksi ve gevşek (slack) barası} \quad (3.3)$$

$$Q_n = Q_{n0} (sabit) \quad n \text{ barası, gevşek baradır} \quad (3.4)$$

G, N ve L ifadeleri sırasıyla üretim, yük ve iletimi göstermektedir. V_i ve θ_i ifadeleri i barasındaki kompleks bara gerilimlerinin büyüklük ve açılarını göstermektedir. $(g_{ij} + jb_{ij})$ ifadesi ise bara admitans matrisinin (i, j) ' nci elemanını göstermektedir.

Sürekli yük akışının formülasyonunda, yük değişiminin simule edilebilmesi için ekstra bir parametre olan λ tanımlanmıştır. Yük barası güç faktörünün sabit olduğu varsayımı altında;

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda(k_{Li}S_{\Delta} \cos \Psi_i) \quad (3.5)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda(k_{Li}S_{\Delta} \sin \Psi_i) \quad (3.6)$$

İfade edilen bu denklemlerdeki parametreler aşağıda belirtilmiştir;

P_{Li0}, Q_{Li0} : Temel durum yükünde, yük barasındaki aktif ve reaktif güçler

k_{Li} : Yük değişim hızını işaret eden çarpanlar

Ψ_i : Her baradaki güç faktörü

S_{Δ} : Bilinen görünen güç miktarı

Benzer şekilde generatörler de aktif güç çıkışlarını, sistemdeki güç dengesini korumak için ayarlamalıdır.

$$P_{Gi} = P_{Gi0} (1 + \lambda.k_{Gi}) \quad (3.7)$$

Burada P_{Gi0} , temel işletme noktasında bulunan üretim baralarının reel güç çıkışlarıdır. k_{Gi} ise, yük/üretim değişimini işaret eden çarpanlardır. Generatörün reaktif gücü aşağıdaki bağıntıyı sağlamaktadır.

$$Q_{Gi} \leq Q_{Gil} \quad (3.8)$$

Burada Q_{Gil} , üretim barasındaki reaktif güç limitörleridir.

Yukarıdaki denklemlerde λ , yük ve üretimdeki değişimi simule etmek için oluşturulan ekstra bir değişkendir. $k_{Li}, k_{Gi}, \Psi_i, S_{\Delta}$ ise bilinen sabitlerdir. Yük ile üretim arasındaki ilişkiyi dP_{Li} / dP_{Gi} üretim modeli olarak karakterize edebiliriz.

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda.d.P_{Li} \quad (3.9)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda.d.Q_{Li} \quad (3.10)$$

$$P_{Gk} = P_{Gk0} + \lambda.d.P_{Gk} \quad (3.11)$$

Yük-üretim değişimini klasik yük akışı denklemlerine yerleştirdiğimizde aşağıdaki denklemleri elde ederiz,

$$P_{Gi0} - P_{Li0} + \lambda.(dP_{Gi0} - dP_{Li0}) = \sum_{j=1}^n V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.12)$$

$$Q_{Gi0} - Q_{Li0} - \lambda.dQ_{Li} = \sum V_i V_j [g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.13)$$

$$V_i = V_{i0} (\text{sabit}) \quad i \in \text{PV baraları indeksi ve gevşek (slack) barası} \quad (3.14)$$

$$\theta_n = \theta_{n0} (\text{sabit}) \quad n \text{ barası gevşek baradır} \quad (3.15)$$

Bu sabitleri 3.12 ve 3.13 no' lu denklemlerle birleştirirsek aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

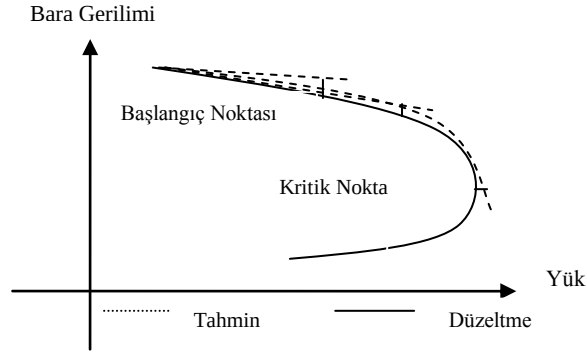
$$F(x) = F(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (3.16)$$

n_1 adet P-Q barası, n_2 adet P-V barası ve bir de gevşek (slack) barası bulunan bir sistem için F fonksiyonunun boyutu $2n_1 + n_2$ 'dir. Bu $n_1 + n_2$ adet 3.12 no' lu ve n_2 adet de 3.13 no' lu denklem demektir. Bu sistem için toplam bilinmeyen değişken sayısı $2n_1 + n_2 + 1$ ' dir. Bu bilinmeyen değişkenlerden $2n_1$ tanesi gerilim faz açısı, n_2 tanesi gerilim büyüklüğü ve 1 tanesi de yük faktörüdür. Bilinmeyen sayısı denklem sayısından bir büyüktür. Bu durumda çözüm tek bir nokta değildir ancak yüksek boyut uzayında bir dizi noktalar bütünüdür. Bu da yük akışı çözüm sürecini oluşturmaktadır.

3.2.3. Tahmin Basamağı

Tahmin-düzeltilme basamağı , yük akışı çözümlerinin tasarlanması için kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Çeşitli tahmin-düzeltilme taslakları arasında, tahmin basamakları genellikle aynıdır. Tahmin basamağı, o anki çalışma noktasında teğet doğrultusu boyunca gerçekleştirilir. Teğet doğrultusu aşağıdaki eşitliği yerine getirir,

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V & F_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3.17)$$



Şekil 3.3 Sürekli yük akışı tahmin-düzeltilme basamakları

Yukarıdaki denklemde $\begin{bmatrix} F_\theta & F_V \end{bmatrix}$ ifadesi, klasik Jakobien matrisi ile aynıdır.

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

F_λ daha önceden belirtilen yük/üretim örnek fonksiyonlarıdır.

$$F_\lambda = \begin{bmatrix} --- & (dP_{Gi0} - dP_{Li0}) & --- & I & --- & -dP_{Li0} & --- \end{bmatrix}^T \quad (3.20)$$

3.16 no' lu denkleme benzer şekilde, 3.17 no' lu denklemdeki bilinmeyen değişken sayısı denklem boyutundan 1 fazladır.

Eğer t' yi teğet vektörü ifade etmek için kullanırsak,

$$t = \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & --- & t_k & --- & t_{2n_1+n_2+1} \end{bmatrix}^T \quad (3.21)$$

3.17 no' lu denkleme ait basit bir çözümün elde edilebilmesi için teğet vektördeki t_i 'lerin ($i=1,2,\dots,2n_1+n_2+1$) en az bir tanesi sıfırdan farklı olmak zorundadır. Teğet doğrultusunda bir nokta bulabilmek için sıfırdan farklı bu elemana ait k adında bir indeks tanımlayalım ve bu elemanı birim değer olarak ayarlayabiliriz.

$$t_k = 1$$

Sıfırdan farklı olan bu bileşene karşılık gelen elemana süreklilik parametresi denmektedir. Bu durumu 3.17 no' lu denklem ile birleştirirsek,

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V & F_\lambda \\ \text{-----} \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

e_k elemanı, k . elemanı hariç tüm elemanları sıfır olan bir satır vektörüdür. Klasik Jakobien matrisi ile karşılaştırıldığında, 3.22 no' lu denklemden yeni Jakobien matrisinde ilave bir satır ve sütun vardır. Süreklilik parametresinin uygun seçilmesi durumunda, genişletilen matris süreç boyunca iyi durumda kalır.

Süreklilik parametresinin belirlenmesinde değişik metodlar bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de, 3.22 no' lu denklemin sonucundan, bir sonraki iterasyona ait süreklilik parametresinin bulunmasıdır.

$$k : |t_k| = \max \{ |t_1|, |t_2|, \dots, |t_{2n_1+n_2+1}| \} \quad (3.23)$$

Bu yöntem ile, yükün değişmesinden etkilenen en güvenilir parametre süreklilik parametresi olarak seçilir.

Teğet doğrultusu bulunduğu taktirde, tahmin aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} \pm \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Burada σ , pozitif adım aralığının boyutudur.

3.2.4. Düzeltme Basamağı

Düzeltme basamağı 3.16 no' lu denklemin çözümü için kullanılır. Denklem boyutu ve bilinmeyen değişken sayısı arasındaki fark nedeniyle, çözüm yolunda bir sonraki işletme noktasının bulunması için bir denklem yaratılması gerekmektedir. Bu ekstra denklemin yaratılması için 3 değişik yöntem bulunmaktadır.

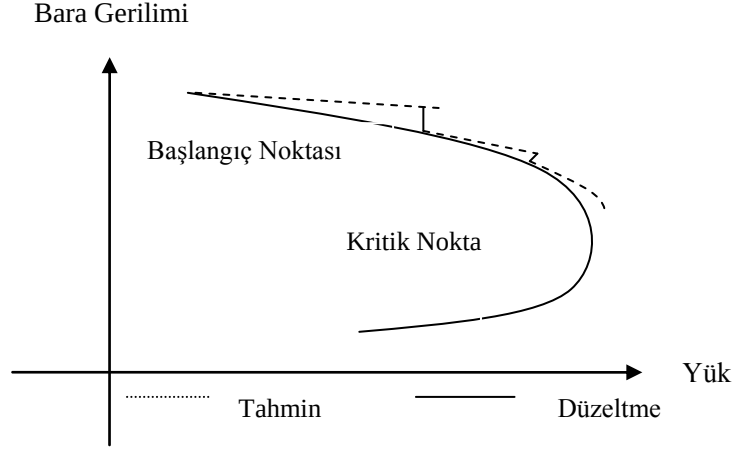
Ajjrapu ve Christy [15] süreklilik parametresinin ilave bir denklemin oluşturulmasını sağlayabildiğini bulmuşlardır. Süreklilik parametresinin değişmemesi sağlanarak,

$$\begin{bmatrix} F_{\theta} & F_V & F_{\lambda} \\ \hline & & \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \hline 0 \end{bmatrix} \quad \text{elde edilir.} \quad (3.25)$$

Bu yönteme sabit süreklilik parametresi yöntemi denir. Bu tahmin-düzeltilme şeması Şekil 3.3' te gösterilmiştir. Bu şekilde ilk iki iterasyonda, yük parametresi süreklilik parametresi olarak kullanılmıştır ve üçüncü iterasyonda gerilimin büyüklüğü kullanılmıştır.

Canizares ve Alvarado [19], düzeltme vektörünü sınırlamak için teğet doğrultusuna dik bir düzlem kullanmışlardır.

$$\begin{bmatrix} F_{\theta} & F_V & F_{\lambda} \\ \hline & & \\ d\theta & dV & d\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \hline 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$



Şekil 3.4 : Canizare' s yöntemi grafiksel gösterimi

Bu metoda dikey düzlem metodu denir ve düzeltme taslağı süreklilik parametresinden bağımsızdır.

Chiang [20], bu ekstra denklemi oluşturmak için sabit ark uzunluğunu kullanmaktadır. Çözüm yolu boyunca, yeni çözüm noktası ile o anki çözüm noktası arasındaki uzaklık Şekil 3.5' te gösterilmiştir.

$$\|(\theta, V, \lambda) - (\theta, V, \lambda)_c\|^2 = s^2 \quad (3.27)$$

$$\|x\| = \sqrt{\sum (\beta_i \cdot x_i)^2} \quad (3.28)$$

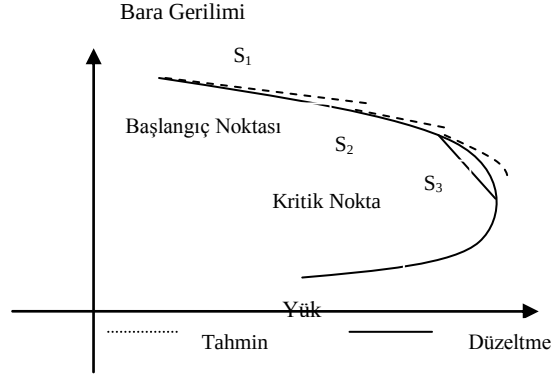
β_i , ağırlık faktörüdür. Bu metod sabit ark uzunluğu metodu olarak adlandırılır.

$\beta_i=1$ (herbir i değeri için) Euclid normu için,

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V & F_\lambda \\ \theta_p - \theta_c & V_p - V_c & \lambda_p - \lambda_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Bu duruma karşılık düşen tahmin basamağında adım aralığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\sigma^2 = s^2 / \left(\sum_i d\theta_i^2 + \sum_i dV_i^2 + d\lambda_i^2 \right) \quad (3.30)$$



Şekil 3.5 Chiang' s yöntemi grafiksel gösterimi

Bu yöntemin performansı büyük oranda süreklilik parametresinin seçimine bağlıdır. Bu metodla karşılaştırıldığında, dikey düzlem metodu düzeltme taslağında daha çok bilgi vermektedir. Daha önemli bir yönü ise, düzeltme basamağında, süreklilik parametresinin seçimine bağlı değildir. Sabit ark uzunluğu metodu, geometrik olarak çok açık veriler verir ve en gözde yöntemdir. Çeşitli ağırlık faktörü kombinasyonlarıyla, değişik süreklilik yöntemleri formüle edilebilir. Sabit süreklilik parametresi metodu ve dikey düzlem metodu bu kombinasyonlara örnek olarak gösterilebilir.

$$\beta_i = \{0 \quad i \neq k ; 1 \quad i = k\}$$

Burada k, süreklilik parametresi indeksidir. Dikey düzlem metodu da, ağırlık faktörünün aşağıdaki gibi ayarlanmasıyla türetilebilir,

$$\beta_i = 1 \quad (\text{Herbir } i \text{ değeri için})$$

Ancak ağırlık faktörlerinin seçiminde izlenecek belirli bir algoritma bulunmamaktadır ve sistemden sisteme farklılık göstermektedir.

Sabit süreklilik parametresi metodu, bahsedilen yöntemler arasındaki en basit ve kolay uygulanabilir yöntemdir. Uygun süreklilik parametresi seçimi ile, performansı kabul edilebilir seviyede olmaktadır.

3.2.5. Matematiksel Formülasyon

Bu analizdeki amaç, sistemin maksimum yüklenilebilirlik noktasının bulunması olduğu için, problem aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$F(\delta, v) = \lambda.K \quad (3.31)$$

Burada; δ : Bara gerilimi açıları vektörü

v : Bara gerilim büyüklüğü vektörü

K : Her baradaki yük değişim yüzdesini ifade eden vektör

λ : Yük parametresi

3.31 no' lu denklemi bir başka şekilde yazacak olursak;

$$F(\delta, v, \lambda) = 0$$

Tahmin basamağında, durum değişkenlerinden birinde (örn. δ, v, λ) meydana gelen değişimle birlikte, bu değişime ait yeni çözümün tahmininde lineer yaklaşımlar kullanılır. Denklemin her iki tarafının türevi alınarak ve türevsel bileşenleri birincil çözümde yok edilerek, aşağıdaki gibi bir dizi lineer denklemleri matris formunda elde ederiz:

$$[F_\delta, F_v, F_\lambda] \begin{bmatrix} d\delta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} = [0] \quad (3.32)$$

İlave edilen (λ) değişkeninin tanımlanmasına bağlı olarak ekstra bir denklemin oluşturulması için, teğet vektör elemanlarından biri +1 veya -1 değerine ayarlanır. Bu bileşen süreklilik parametresi ile ilgilidir. Bu durumda 3.32 no'lu denklem aşağıdaki şekli almaktadır,

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_v & F_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

e_k , tüm girişlerin sıfır olduğu durumdaki vektördür. Bu durum sadece süreklilik parametresi olarak seçilen değişken için geçerli değildir çünkü bu durumda giriş değeri 1' dir.

Başlangıçta süreklilik parametresi olarak λ (yük parametresi) seçilir ve eğiminin işareti pozitifdir. Teğet vektör bulunduğunda, süreklilik parametresi olarak, tangent vektördeki en büyük girişe sahip olan bara gerilimi seçilir ve onun işareti bir sonraki tahmin basamağı boyunca kullanılır. Teğet vektör bulunduktan sonra, bir sonraki çözüm aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \delta^{yeni} \\ v^{yeni} \\ \lambda^{yeni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{eski} \\ v^{eski} \\ \lambda^{eski} \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Adım aralığı σ öyle seçilmelidir ki, belirlenen süreklilik parametresi için bir çözüm olabilsin. Eğer verilen bir adım aralığında, düzeltme basamağında çözüm bulunamıyorsa, adım aralığı çözüm elde edilene kadar azaltılmalıdır.

Düzeltilme basamağında, orijinal denklemler dizisi $F(\delta, v, \lambda) = 0$ bir tek denklem ile arttırılır ve bu denklem, süreklilik parametresi olarak seçilmiş durum değişkeninin değerini belirtir. Yeni denklemler dizisi şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} F \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (3.35)$$

Burada x_k , süreklilik parametresi olarak seçilmiş durum değişkenidir ve $\eta = x^{yeni}$ 'dir. Sürekli yük akışı tahmin basamağında, x_k 'nın diferansiyel değişiminin sıfırdan farklı olması sağlanır ($dx_k = \mu 1$). Böylece düzeltme basamağında, x_k 'nın değeri belirlenmiş olur ve diğer durum değişkenlerinin değerleri bulunabilir. Bu denklemler dizisi Newton-Raphson yük akış yöntemi ile çözülür. Buradaki ilave denklem ile, Jakobien' in maksimum yüklenme durumunda tekil olmaması sağlanmış olur ve bu noktada bir çözüm elde edilebilmektedir.

3.2.6. Süreklilik Parametresinin Seçimi

Süreklilik parametresinin seçimi ile ilgili çeşitli yöntemler vardır. Matematiksel olarak, en büyük teğet vektöre sahip durum değişkeni, süreklilik parametresi olarak seçilir. Daha basit bir anlatımla, verilen çözüm yakınında, en büyük değişim miktarına sahip durum değişkenidir. Bir enerji sistemi söz konusu olduğunda, en iyi seçim λ yük parametresi olacaktır. Bu seçim, başlangıç durumu (temel durum) normal yada düşük yüklenme hali ile karakterize edilmişse doğru sonuçlar elde etmemizi sağlayacaktır. Bu tip durumlarda, gerilim büyüklüğünün değeri ve açıları, yük değişimi karşısında çoğunlukla sabit kalmaktadır. Diğer tarafta, yükün basamak şeklinde artırılması sonucu, çözüm yolu kritik noktaya yaklaşır ve gerilim büyüklüğünün değerlerinde ve açılarında önemli değişiklikler meydana gelir. Bu durumda λ , iyi bir süreklilik parametresi olamayacaktır. Bu yüzden süreklilik parametresinin seçimi her basamakta tekrarlanmalıdır. İlk basamakta süreklilik parametresinin seçimi yapıldıktan sonra, diğer basamaklar için uygun seçimlerin yapılması için aşağıdaki ifade kullanılabilir;

$$x_k : |t_k| = \max \{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_m|\}$$

Burada t teğet vektörüdür ve $m = 2n_1 + n_2 + 1$ boyutundadır. k indeksi, teğet vektörün maksimum komponentini ifade etmektedir.

3.3. Durum Analizi [11]

Gerilim kararlılığı için durum analizi aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Lineerleştirilmiş yük akış denklemini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Burada;

ΔP : Bara reel gücündeki artış miktarı

ΔQ : Baraya enjekte edilen reaktif gücün artış miktarı

$\Delta \theta$: Bara gerilimi açısındaki artış miktarı

ΔV : Bara gerilimi büyüklüğündeki artış miktarı

$J_{P\theta}, J_{PV}, J_{Q\theta}, J_{QV}$ elemanları da, yük akış jakobienin elemanlarıdır.

Sistem gerilim kararlılığı hem aktif hem de reaktif güçlerden etkilenir. Bununla birlikte, aktif güç her bir işletme noktasında sabit tutulmaktadır ve gerilim kararlılığı, reaktif güçteki ve gerilimdeki artış ilişkisi ile hesaplanmaktadır. Aktif güçteki artışların formlara yansıtılmasına rağmen, değişik çalışma noktalarındaki reaktif güç ve gerilim arasındaki artım ilişkileri üzerinde çalışılarak, sistem yükündeki ve transfer seviyelerindeki değişimler hesaba katılmıştır.

3.36 no'lu denklemi sadeleştirmek için, $\Delta P = 0$ olduğunu varsayalım;

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}] \Delta V$$

$$= J_R \cdot \Delta V$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (3.37)$$

Burada,

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}]$$

J_R , sistemin sadeleştirilmiş jakobien matrisi olarak adlandırılır. J_R matrisi, bara gerilimi büyüklüğü ve enjekte edilen reaktif güç arasındaki ilişkiyi doğrudan gösteren bir matristir. Reel güç ve açı bölümlerini sistemin kararlı hal kararlılık denklemlerinden çıkartırsak, reaktif güç ihtiyacı ve bu gücün sağlanması konusuna daha fazla odaklanma imkanı bulabiliriz.

Sistemin gerilim kararlılığı karakteristikleri, sadeleştirilmiş jakobien matrisinin özdeğerlerinin ve özvektörlerinin hesaplanmasıyla belirlenebilir.

$$J_R = \xi \cdot \Lambda \cdot \eta \quad (3.38)$$

Burada;

$\xi : J_R$ 'nin sağ özvektör matrisi

$\Lambda : J_R$ 'nin köşegen özdeğer matrisi

$\eta : J_R$ ' nin sol özvektör matrisi

ve

$$J_R^{-1} = \xi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \eta \quad (3.39)$$

3.37 ve 3.39 no' lu denklemlerden;

$$\Delta V = \xi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q \quad (3.40)$$

veya

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \cdot \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad \text{olarak ifade edilebilir} \quad (3.41)$$

Her özdeğer λ_i ve bu özdeğerlere karşılık gelen ξ_i, η_i sağ ve sol özvektörleri, Q-V cevabının i' nci durumunu (mod) belirler.

$\xi^{-1} = \eta$ olduğuna göre, 3.40 no' lu denklem aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\eta \cdot \Delta V = \Lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q$$

veya

$$v = \Lambda^{-1} \cdot q \quad (3.42)$$

Burada;

$v = \eta \cdot \Delta V$ durum gerilimi varyasyonları vektörü

$q = \eta \cdot \Delta Q$ durum reaktif gücü varyasyonları vektörü

i' nci durum için,

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i \quad (3.43)$$

Eğer $\lambda_i > 0$ ise, i' nci durum gerilim ve reaktif güç değişiminin aynı doğrultuda olduğunu gösterir ve sistem gerilim kararlılığının sağlandığını belirtir. Eğer $\lambda_i < 0$ ise, durum gerilim ve reaktif değişimi ayrı doğrultudadır ve sistem gerilim kararsızdır.

Bu sonuçlardan, λ_i 'nin büyüklüğünün, i 'nci durum gerilimin kararlılık derecesini belirlediği görülmektedir. λ_i 'nin pozitif ancak değer olarak küçük olması, i ' nci durum geriliminin kararsızlığa bu oranda yakın olduğunu ifade etmektedir. $\lambda_i = 0$ olması, i ' nci durumda gerilimin çöküşünü ifade etmektedir.

Durum analizinin uygulanması, kritik alanların ve elemanların belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Bara katılım faktörleri, λ_i 'nin k barasındaki V-Q hassasiyetine katkısını göstermektedir. Bunlar, J_R matrisinin sağ ve sol özvektörleri cinsinden şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_{ki} = \xi_{ki} \cdot \eta_{ik} \quad (3.44)$$

Tüm iletim hat dirençlerinin ihmal edildiği ve sistemin Y bara matrisinin simetrik olduğunu varsayarsak, indirgenmiş Jakobien matrisi de simetrik olmaktadır. Bu varsayımlar altında şu sonuçlara varabiliriz;

1. J_R ' nin tüm özdeğer ve özvektörleri reeldir. Aynı özdeğere karşılık gelen sağ ve sol özvektörleri de birbirine eşittir.
2. Eğer özdeğerlerden herhangi birisi negatif ise sistem, gerilim kararlılığı sınır noktasını (en az bir özdeğerin sıfıra eşit olduğu durum) geçmiş ve gerilim kararsızdır.

Sistemdeki iletim hatlarının dirençlerinin yansıtılması veya Y matrisinin asimetrik olduğunu varsaydığımızda, J_R matrisi yaklaşık olarak simetrik olacaktır ve J_R ' nin özdeğerlerini temel alan gerilim kararlılık kriteri belirli bir noktaya kadar geçerli olacaktır.

3.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Cihazlarının Yerleşimi İçin Aday Baraların Belirlenmesi

Bir elektrik enerji iletim sistemi; güç taleplerini, yük bara gerilimleri izin verilebilen limitler içinde kalacak şekilde kaliteli ve güvenilir olarak sağlamalıdır. Sistemin en iyi şekilde çalışması için reaktif güç üretim yerleri ve üretim miktarlarının da en iyi şekilde belirlenmesi gerekir [26]. Gerilim kararlılığı açısından ise, sistem talebi değiştiği zaman reaktif güç rezervleri, sistemin gerilim çökmesine hareket etmemesini sağlayacak biçimde yerleştirilmiş olmalıdır.

Elektrik enerji sisteminde, facts cihazları gibi elemanların yerleştirileceği baraların belirlenmesi için çeşitli kriterlere göre yapılan duyarlılık analizlerine dayalı yöntemler vardır. Burada, 3.3 no' lu bölümde incelenen indirgenmiş jakobien matrisini temel alan duyarlılık analizini inceleyeceğiz. Svc gibi facts cihazlarının hangi baralara yerleştirilmesinin daha uygun olduğunu belirlemek için indirgenmiş jakobien matrisinin tersi incelenecektir [27].

Bir güç sistemi için Newton-Raphson yönteminden,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

olup, burada,

ΔP ; bara aktif gücündeki artımsal değişme

ΔQ ; bara reaktif gücündeki artımsal değişme

$\Delta \theta$; bara gerilim açısındaki artımsal değişme

ΔV ; bara gerilim genliğindeki artımsal değişme

dir.

Jakobien matrisin elemanları ise yük akışı ve bara gerilim değişimleri arasındaki duyarlılığı verir.

Sistem gerilim kararlılığı P ve Q' nun her ikisinden birden etkilenir. Bununla beraber, her bir işletme noktasında biz P' yi sabit tutabiliriz ve, Q ve V arasındaki artımsal ilişkiyi göz önüne alarak gerilim kararlılığını değerlendirebiliriz. Bu Q-V

eğrisi yaklaşımına benzerdir. Formülasyonda, P' deki artımsal değişmelerin ihmal edilmesine rağmen, sistem yükü veya güç transfer seviyelerindeki değişmelerin etkileri, farklı işletme koşullarında Q ve V arasındaki artımsal ilişki incelenerek göz önüne alınır.

Yukarıdaki göz önüne alınan unsurlara dayalı eşitlik (3.45)' de $\Delta P=0$ alınırsa,

$$\Delta Q = J_R \cdot \Delta V \quad (3.46)$$

olup burada,

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}] \quad (3.47)$$

dir. Önceden de belirtildiği gibi burada J_R , sistemin indirgenmiş Jakobien matrisidir.

(3.46) no' lu eşitlikten,

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (3.48)$$

yazılabilir. O zaman J_R^{-1} matrisi, indirgenmiş V-Q jakobianıdır.

J_R^{-1} ' in i nci köşegen elemanı, bara i deki V-Q duyarlılığıdır. Bir baradaki V-Q duyarlılığı, verilen işletme noktasında Q-V eğrisinin eğimini gösterir. Pozitif V-Q duyarlılığı ise kararlı bir işletimin göstergesidir. Buna göre daha küçük duyarlılık ise daha kararlı bir sistemdir. Kararlılık azaldığı zaman duyarlılığın genliği artar, kararlılık sınırında ise sonsuz olur. Tersine; bir negatif duyarlılık, kararsız işletimin göstergesidir. Buna göre küçük negatif duyarlılık ise çok kararsız bir işletim durumunu gösterir [4-5].

Böylece, eğer biz kararlı bir işletim durumunda J_R^{-1} ' in köşegen elemanlarını büyükten küçüğe doğru sıralarsak, baraları da reaktif güç bakımından kararsızlığa yakınlıklarına göre sıralamış oluruz [27].

4. GERİLİM KARARLILIĞI İNDİSLERİ

4.1. Giriş

Gerilim kararlılığı uzun zamandan bu yana üzerinde çalışmalar yapılan bir konudur. Bu çalışmalar genellikle sadece teorik boyutta kalmıştır. Ancak gerçek enerji sistemlerinde, gerilim kararsızlığına bağlı olarak gerçekleşen ciddi arızaların meydana gelmesinin ardından bu konuya daha fazla önem verilip, araştırmaların pratik yönüne de deyinilmeye başlanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalar, generatör karakteristiklerinden başlayıp, yük karakteristiklerine kadar uzamaktadır. Bu çalışmalar gerçekleştirilirken, özellikle gerilim kararlılığı indislerinin incelenmesi ve bu indislerin kullanılarak gerekli düzeltme işlemlerinin gerçekleştirilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bu bölümde çeşitli gerilim kararlılığı indisleri üzerinde durulmuştur ve bu indislerin sistem performansına yaptıkları etkilere genel karakteristikleri açısından değinilmiştir. Bu bölümde incelenecek indisler arasında;

1. Durum analizi ve jakobien matrisi özdeğerleri
2. L-indisi

4.2. Gerilim Kararlılığı İndisleri

Literatürde tanımlanan çeşitli gerilim kararlılığı indisleri bulunmaktadır. Bu indislerin birçoğu, Newton-Raphson yük akışından türetilen jakobien matrisini temel almaktadır. Diğerleri ise yük akışı denklemlerinden türetilen indislerdir.

4.2.1. Durum Analizi Ve Jakobien Matrisi Özdeğerleri

Yük akışı jakobien matrisi, sistemin o anki çalışma durumunda, sistemin gerilim kararsızlığına veya gerilim çökmesine ne kadar yakın olduğunu gösteren bir indekstir. Gerilim kararlılığı analizinin, jakobien matrisi özdeğerleriyle yapılması özellikle büyük ve kompleks enerji sistemlerinin incelenmesi açısından uygundur. İndirgenmiş jakobien matrisi, barada artarak değişen aktif gücün (ΔP) sıfıra eşit olduğunu varsaymaktadır. Bu varsayımla, orijinal jakobien matrisinin boyutu yarıya

düşmekte ve boyutu yarıya inen bu matris de indirgenmiş jakobien matrisi (J_R) olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda Newton-Raphson denklemi şu şekli almaktadır;

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (4.1)$$

ΔV : Artış biçiminde değişen bara gerilimi büyüklüğü

ΔQ : Barada artarak değişen reaktif güç büyüklüğü

$$J_R = \xi \cdot \Lambda \cdot \eta \quad \text{olduğunu varsayalım} \quad (4.2)$$

ξ : J_R matrisinin sağ özvektör matrisi

Λ : J_R matrisinin köşegen özdeğer matrisi

η : J_R matrisinin sol özvektör matrisi

$$\xi \cdot \eta = I$$

ve

$$J_R^{-1} = \xi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \eta \quad (4.3)$$

(4.1) ve (4.3) no' lu denklemlerden;

$$\Delta V = \xi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q \quad (4.4)$$

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \cdot \eta_i}{\lambda_i} \cdot \Delta Q \quad \text{olarak ifade edilebilir.} \quad (4.5)$$

Burada ξ_i , J_R ' nin i' nci sütun sağ özvektörü ve η_i ise J_R ' nin i' nci satır sol özvektörüdür.

Buna karşılık düşen i' nci durumda gerilimde meydana gelen değişim;

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \cdot \Delta Q_{mi} \quad \text{olmaktadır.} \quad (4.6)$$

Yukarıda yapılan hesaplamalardan, özellikle 4.5 ve 4.6 kullanılarak, λ_i 'nin daha küçük özdeğerlerinin hesaplanması oldukça kolaydır. Bu duruma karşılık olarak daha düşük gerilim değerlerinin gelmesi de tahmin edilen bir sonuçtur. Eğer özdeğerlerden bir tanesi sıfır ise, bu duruma karşılık düşen durum, gerilim kararsızlığı olacaktır çünkü bu durumda, reaktif güçte meydana gelecek herhangi bir değişim, durum geriliminde sonsuz bir değişim meydana getirecektir. Bundan dolayı bu metod, indirgenmiş jakobien matrisi özdeğerlerine bağlıdır.

J_R matrisinin tüm özdeğerleri pozitif ise sistem gerilim kararlıdır. Özdeğerleri temel alan bu yöntemin en büyük dezavantajı, özdeğerlerin hesaplanması için gerekli uzun zaman ihtiyacıdır. Ancak bilgisayarların kapasitelerinin her geçen gün artması, bu işlem süresini azaltmaktadır.

4.2.2. L İndisi

Literatürde işaret edilen indisler, gerilim kararsızlık sınırına olan yakınlık ve sistemin gerilim kararlılığı konusunda genel bir tablo çizmektedir. Ancak L-indisi sayesinde sistemdeki her bir bara için skaler bir sonuç çıkarılabilmektedir. Bu indis değeri 0 ile 1 aralığında değişmektedir. Bu aralığın uç değerlerinden 0, yüksüz sistem durumunu, 1 ise gerilim çöküşünü işaret etmektedir. Sistemdeki maksimum L-indis değerine sahip bara, o sistemin en kritik barası olmaktadır. Böylece sistemin gerilim kararlılığının iyileştirilmesi için hangi baralara reaktif güç yardımı yapılabileceği de belirlenmiş olur. Bu yöntem ile oldukça tutarlı sonuçlar elde edilebilmektedir [23,24]. Bu yöntemin avantajı, L-indisi hesaplamalarının kolaylığı ve elde edilen skaler sonuçların kolay yorumlanabilir bir anlam ifade etmesidir. Bansılal [23] ve D.Thukaram [24] , gerilim kararlılığının iyileştirilmesinde L-indisinin hedef fonksiyon olarak alınmasının uygunluğunu göstermişlerdir. Sistemdeki en yüksek L-indisi değerine sahip bara sistemin en kritik barası olarak ifade edilebileceği gibi $\sum L^2$, sistemdeki baralara ait L-indis değerlerinin karelerinin toplamı da sistemin genel gerilim kararlılığı hakkında bilgi verir. Gerilim kararlılığı konusunda geliştirilen algoritmalar da bu kareler toplamının minimize edilmesini hedef alır.

4.2.2.1. L-İndislerinin Hesaplanması

Toplam bara sayısının n olduğu bir sistem düşünelim. Bu baraların; 1,2,3.....,g tanesi generatör barası, g+1,g+2.....g+s tanesi SVC barası, g+s+1,.....,n tanesi geri kalan baralar ve t OLTC transformatör sayısını göstermektedir.

L-indislerinin hesabı, yük akış sonuçları kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{i=g} F_{ji} (V_i / V_j) \right| \quad (4.7)$$

$$j = g+1, \dots, n$$

F_{ji} ' nin değerleri Y bara matrisinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

I_G, I_L, V_G, V_L generatör ve yük düğümlerindeki akım ve gerilimleri ifade etmektedir.

2 no' lu denklemi yeniden düzenlersek;

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Burada, $F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1} \cdot [Y_{LG}]$ gerekli olan değerlerdir. Belirli bir yük durumu için, her bir yük barasına ait L-indisleri hesaplanır.

j ' nci duruma ait L-indisi denklemini ifade edersek,

$$L_j = \left| 1.0 - \sum_{i=1}^{i=g} F_{ji} \cdot \frac{V_i}{V_j} \cdot \angle \theta_{ji} + \delta_i - \delta_j \right|$$

$$L_j = \left| 1.0 - \sum_{i=1}^{i=g} \frac{V_i}{V_j} \cdot (F_{ji}^r + jF_{ji}^m) \right| \quad (4.10)$$

Kararlılık için, L_j indisi hiçbir durum için bozulmamalıdır. L_j indisi, gerilim çöküşünün gerçekleşebileceği bu durumların belirlenmesine olanak vermektedir. Türetilen teori iki durum gerçekleştiğinde kesinlik kazanmaktadır, örneğin $L=1$

kararlılık sınırına ulaşıldığında. Birincisi, genlik ve faz gibi, tüm generatör gerilimlerinin değişmeden sabit kalmasını gerektirmektedir. İkincisi düğüm akımlarıyla ilgilidir ve doğrudan I_j akımına karşılık gelmektedir. Bu durumdaki kararlılık sınırı L' nin birim değerden olan uzaklığı şeklinde ifade edilebilir ve $(1-L)$ olarak gösterilebilir. Yük baraları için hesaplanan L -indis değerlerinde, $1'$ den uzak $0'$ a yakın bir değer, gerilim kararlılığı sınırındaki bir gelişmeyi gösterir. L indislerinin $1'$ e yakın değerleri ise, sistemdeki kritik baraları işaret etmektedir. Ayrıca $\sum L^2$ değeri, sistemin genel gerilim kararlılığı hakkında bilgi vermektedir.

BÖLÜM 5. FACTS CİHAZLARI VE YÜK AKIŞI KONTROLÜ

5.1. Giriş

Facts cihazları AC iletim komponentlerindendir ve yük akışının kontrolünde esneklik sağlarlar. Buradaki esneklik terimi; iletim ağının ve çeşitli işletme durumlarında meydana gelen değişimlere karşı enerji sisteminin uyum sağlamasıdır. Enerji sistemindeki esneklik, enerji transfer kapasitesinin artırılması, sistemin güvenilirlik ve kararlılığının artırılmasıdır. Genel olarak iletim sisteminin performansının artırılmasıdır.

Facts cihazları güç elektroniği tabanlı elemanlar olup AC iletim sisteminde yük akışını etkileyen üç önemli parametreden bir veya daha fazlasına etki ederler. Bu üç parametre; bara gerilimi, hat empedansı ve faz açısıdır. Bu bölümde, bahsedilen parametrelerin yük akışını nasıl etkiledikleri ve kontrol teknikleri açıklanmaktadır. En geniş kullanım alanına sahip facts cihazı olan SVC' nin yapısı, yer ve boyutunun seçimi gibi konular incelenip, şönt kompanzasyona da değinilmiştir.

5.2. Yük Akışı Kontrolü

Şekil 5.1, AC iletim sistemindeki temel ilişkilerin türetilmesi için kullanılacak, sadeleştirilmiş bir enerji iletim sistemini göstermektedir. Bu sistem, facts cihazlarının yük akış kontrolündeki etkilerinin incelenmesinde kullanılacaktır. Bu sistemde iki uç nokta, seri reaktansı X ve şönt kapasitesi olan kısa bir iletim hattıyla birleştirilmiştir.

Sistemin daha basit ve anlaşılır olması için, hat başı gerilimi V_S ve hat sonu gerilimi V_R birbirine eşit alınmıştır.

$$|V_S| = |V_R| = V$$

$$V_s = V.e^{j\frac{\delta}{2}} = V.(Cos\frac{\delta}{2} + jSin\frac{\delta}{2}) \quad (5.1)$$

$$V_R = V.e^{-j\frac{\delta}{2}} = V.(Cos\frac{\delta}{2} - jSin\frac{\delta}{2}) \quad (5.2)$$

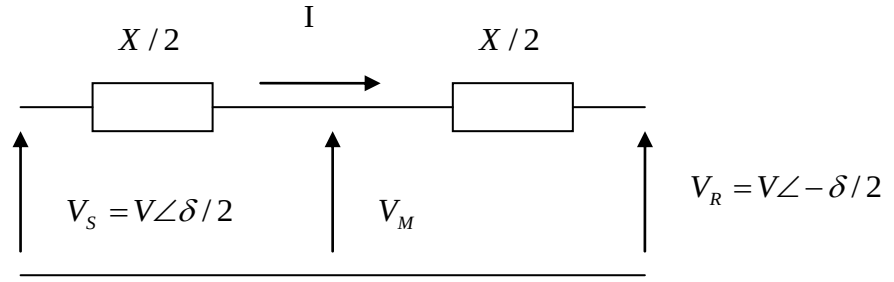
Hat boyunca akan akımın ifadesi;

$$I = \frac{V_s - V_R}{jX} = \frac{2V}{X}.Sin\frac{\delta}{2} \quad (5.3)$$

Hat ortası geriliminin ifadesi;

$$V_M = V_s - j.\frac{X}{2}.I = V.Cos\frac{\delta}{2} \quad (5.4)$$

Hattın kayıpsız olduğu varsayıldığında, başlangıç ve bitiş noktalarındaki elektriksel güç değerleri ile orta noktadaki elektriksel güç değerleri birbirine eşittir.



Şekil 5.1 Örnek enerji iletim sistemi

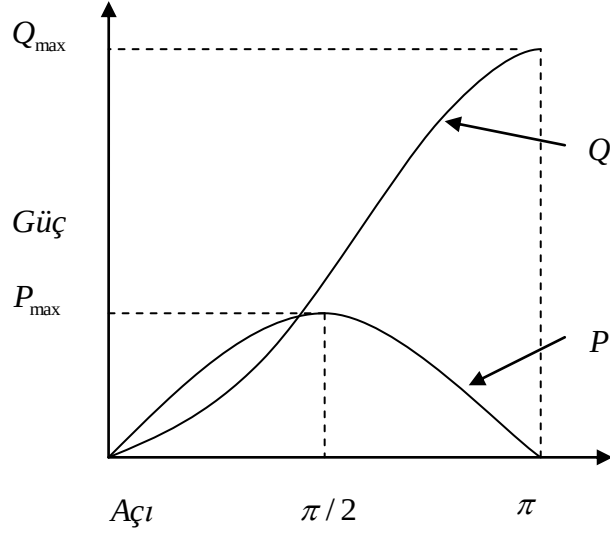
$$P = V_M \cdot I = \frac{V^2}{X} \cdot \sin \delta \quad (5.5)$$

Hattın her iki ucunda sağlanan reaktif güç;

$$Q_s = -Q_r = I \cdot V \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{2V^2}{X} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (5.6)$$

Şekil 5.2, reel güç (P), reaktif güç (Q) ve açı (δ) büyüklüklerin birbirleriyle olan ilişkilerini göstermektedir.

Başlangıç ve bitiş noktalarındaki bara gerilim büyüklükleri ve açıları ile, iletim hattı elektriksel uzunluğunun, enerji iletiminin yönlendirilmesindeki etkisi 5.5 no' lu denklemden görülmektedir. Bu parametrelerin kontrolü için kullanılan 3 yöntem: Şönt Var kompanzasyonu, seri kompanzasyon ve faz aç kontrolüdür. Bunlardan şönt kompanzasyon aşağıda incelenmiştir.



Şekil 5.2 P, Q ve δ arasındaki ilişki

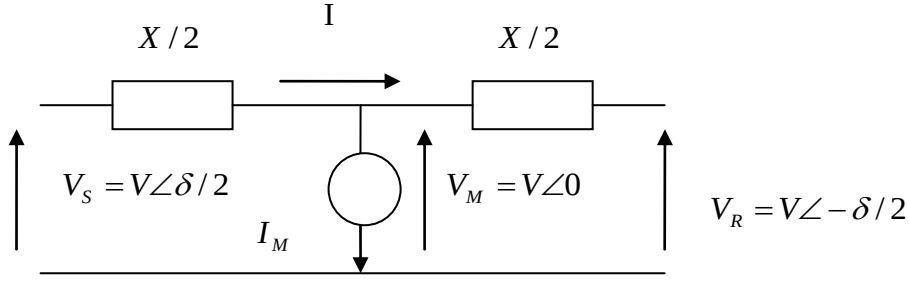
5.2.1. Şönt Kompanzasyon

Şekil 5.1’ deki, kompanzasyon yapılmış iletim hattının orta nokta geriliminin (V_M) büyüklüğü $V \cdot \cos \delta / 2$ ’ ye eşittir. Bu değer hat sonu gerilim değerinden daha düşüktür. Düzgün bir gerilim profilinin ($|V_S| = |V_R| = |V_M| = V$) elde edilip bunun muhafaza edilmesi için, Şekil 5.3’ te gösterildiği gibi, (I_M) kapasitif akımının hattın orta noktasından sürülmesi gerekmektedir.

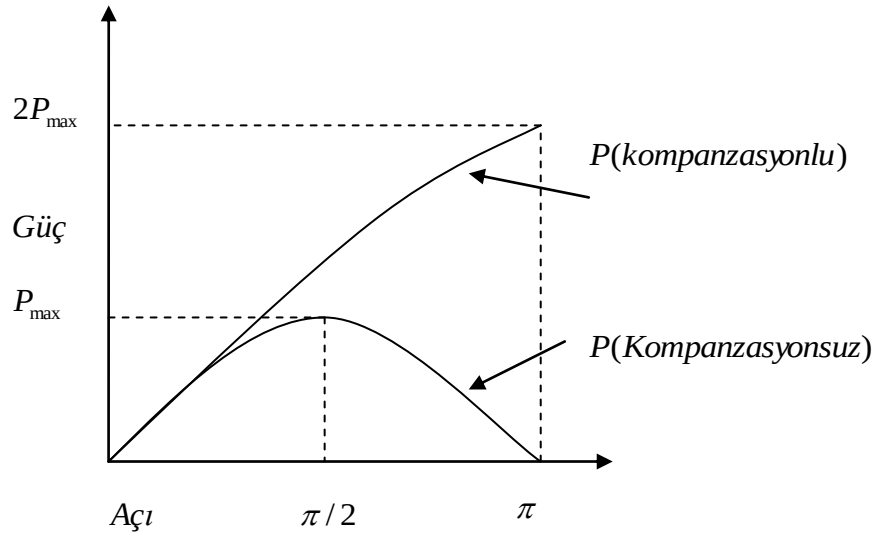
Hattın orta noktasından kapasitif bir akımın sürülmesi, bu noktaya bir şönt kondansatör uygulanmasıyla aynı anlamdadır. Kondansatör gerilimi (V_M) ve akımı (I_M) karesel olduğu sürece, kondansatör reel güç tüketmez. Bu sebeple, hattın başlangıç noktasından orta noktasına iletilen güç ile orta noktasından bitiş noktasına iletilen güç birbirine eşittir. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$P = \frac{V^2}{X/2} \cdot \sin \frac{\delta}{2} = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (5.7)$$

Şekil 5.4, transfer edilen güç (P) ile açının (δ) değişimini göstermektedir.



Şekil 5.3 Örnek iletim sistemi için yük akışı



Şekil 5.4 Transfer edilen güç (P) ile açının (δ) değişimi

5.3. Facts Cihazları

Bu bölümde, enerji iletiminde rol oynayan üç önemli parametreye etki eden, FACTS cihazlarından en çok kullanım alanına sahip olan SVC (Statik Var Kompanzatörü) incelenecektir.

5.3.1. Statik Var Kompanzatörleri (SVC) Ve Sistemleri

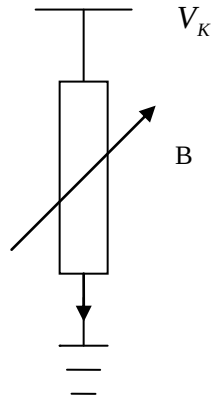
Temel olarak bir SVC, sabit kapasitör veya reaktörlerin bir kombinasyonudur. Statik var kompanzatörleri, mekanik anahtarlama şönt kapasitör ve reaktörlerin sahip olduğu bazı kısıtlamaları ortadan kaldırabilen cihazlardır. Bu cihazların avantajları; hızlı, gerilimin kusursuz ayarlanabilmesi ve sınırlandırılmamış olmalarıdır.

CIGRE, statik var kompensatörleri ile statik var sistemlerini birbirinden ayırmıştır. Statik var sistemi, şönt kapasitör bankaları veya reaktörlerinin mekaniksel anahtarlanmalarını da kontrol eden bir kompensatör sistemidir.

Facts cihazlarının kullanımı ilk olarak tristör kontrollü statik Var kompensatörleri ile başlamıştır. Bu cihazın ismindeki statik ifadesi, herhangi bir hareket eden parçasının bulunmamasından ileri gelmektedir.

Statik Var kompensatörleri, şönt kapasitör ve reaktörlerin mekanik olarak anahtarlanmasındaki sınırlamaları ortadan kaldırmaktadır. Hızlı ve düzgün gerilim ayarlamasının yapılmasını sağlar. Gerilim, eğim karakteristiğine göre ayarlanır. Bu eğim, kararlı hal kazancı ile ilgilidir ve artış limitine ulaşıldığında, SVC şönt kapasitör bankası olmaktadır.

İşletme noktasından bir bakış açısıyla SVC, ayarlanabilir bir şönt süseptans olarak görülebilir. SVC' nin modellenmesinde bu cihazın, belirli sınırlar içinde ayarlanabilir bir süseptans olduğu kabul edilmektedir. Kabul edilen bu model Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Gerilim kararlılığının iyileştirilmesinde kullanılacak SVC' ler için bu model kullanılacaktır.



Şekil 5.5 SVC Süseptans Modeli

Enerji sistemlerinde SVC' ler ile genellikle, yüklerin bulunduğu alanlarda ilgilenilmektedir. Özellikle geçici gerilim kararsızlığına karşı korumada SVC' ler, kesici anahtarlamalı kapasitörlere göre daha etkilidirler.

Gerilim kararsızlığının daha yavaş gerçekleştiği durumlarda, SVC' nin hızlı cevap verme süresi, kesintilere sebep olan aşırı gerilimlerin kontrolü haricinde çok önemli

değildir. Sistemde meydana gelen aşırı gerilim, yük veya gerilim düşümü sırasında gerçekleştirilen kapasitör bankasının enerjilendirilmesine bağlı olabilir.

SVC, sistem geriliminin belirlenen bir alt sınırın altına düşmemesini sağlaması açısından ayrı bir öneme sahiptir. Düşük gerilimle anlatılmak istenen, hattın yüklenmesinin düşmesi ve reaktif güç kayıplarının artmasıdır.

Normal koşullar sırasında SVC' ler, endüktif çıkış ile işletilmelidirler ki arıza meydana geldiğinde, hızlı bir kapasitif artış sağlanabilsin. Kapasitif rezervin sağlanabilmesi için SVC, yakınındaki şönt kapasitör bankalarının ve şönt reaktörlerin mekaniksel anahtarlanmalarını ayarlayabilir.

Kararlı hal koşullarında, istenilen çıkışın elde edilip korunabilmesi için, bir reaktif güç veya süseptans regülatörü kullanılabilir. Sistemde bir arıza oluştuğunda SVC' ler diğer gerilim ayarlayıcı kontrolörlere göre daha hızlı müdahalede bulunacaklardır.

Yüklerin bulunduğu alanlarda statik kompensatörlerin gerekliliği, bölgesel üretim miktarı ile ilgilidir. Yük arttıkça, generatörlerin reaktif güç rezervleri o kadar küçük olabilir ki, hızlı çalışan başka reaktif rezervlere ihtiyaç duyulabilir. Generatör ve statik kompensatörler, gerilim çöküşünü haber veren önemli göstergelerdir.

Enerji sisteminde SVC' lerin kullanılmasının avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- SVC' ler, direkt gerilim kontrolü sağlarlar; bu durum, yükün bulunduğu bölgelerde az miktarda üretimin olduğu zamanlarda ayrı bir önem kazanmaktadır.
- SVC' nin geri kalan kapasitif kapasitesi, gerilim kararsızlığının tahmininde iyi bir göstergedir.
- Geçici aşırı gerilimlere karşı hızlı kontrol sağlarlar.

SVC' lerin yukarıda belirtilen avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır.

- SVC' lerin sınırlı bir yük aşım kapasitesi bulunmaktadır; Artış limitine ulaştığında, SVC bir kapasitör bankası olmaktadır.
- Kararsızlık genellikle, SVC artış limitine ulaştığında oluşmaktadır.
- SVC' ler pahalı elemanlardır.

5.4. Statik Var Kompanzatörlerinin Yeri Ve Boyutunun Seçimi

Facts cihazları, iletim sisteminde enerji transferini iyileştirdiği gibi, reaktif güç kontrolü ve gerilim kararlılığı problemleriyle de yakından ilişkilidir. Gerilimin büyüklük değerlerine bakılarak, iyi bir gerilim kararlılığı sınır tahmini yapılması mümkün değildir. Günümüz sistemlerinde, gerilim kararsızlığının önlenmesi için daha etkili olan, kapasitör ilavesi ve SVC gibi facts cihazlarının sisteme eklenmesi gerekmektedir. Bu tip elemanların enerji sistemine eklenmesiyle, generatörlerdeki reaktif güç rezervleri korunabilmektedir. Ayrıca sistemdeki herhangi bir arıza durumunda gerilim kararlılığı korunabilmektedir. Literatürde adı geçen, gerilim kararlılığının analizinde ve gerilim çöküşü sınırının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri de L-indeksi yöntemidir [23,24].

Normal yük akışı çözümüne dayanan L-indeksi yönteminde, her bir yük barasına skaler bir sayı verilir (L-indeksi). Bu indeks değeri 0 ile 1 aralığında değişmektedir. İndeksin 0'a eşit olması durumu, sistemin yüksüz olduğunu ifade eder. İndeksin 1'e eşit olması durumu ise, gerilim çöküşünü ifade etmektedir. Sistemdeki en yüksek L-indeksi değerine sahip bara, o sistemin en kritik barası olmaktadır. Bu bilgi ışığında, kritik bölgeler belirlenebilmekte ve bu bölgeler için gerekli olan reaktif güç ihtiyacı belirlenebilmektedir.

Statik Var kompanzatörlerin yerleşimi için aday baraların belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise, bir duyarlılık analizini temel alan, enerji sistemine ait indirgenmiş jakobien matrisi (J_R^{-1}) tersinin köşegen elemanlarının incelenmesidir. Bu yöntemde, J_R^{-1} matrisinin köşegen elemanları büyükten küçüğe doğru sıralandığında, yük baralarını reaktif güç bakımından kararsızlığa yakınlıklarına göre sıralamış oluruz. Bölüm 6' da gerçekleştirilen örnek sistem incelemelerinde, reaktif güç kompanzasyon cihazlarının yerleşiminde bu yöntem kullanılacaktır. Bu yöntemin ayrıntıları Bölüm 3.4' te verilmiştir.

Kuruluşlar tarafından SVC, hem iletim hem de dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadır. Birincil amaç gerilimin, şebekenin zayıf noktalarında hızlı bir şekilde kontrolüdür. SVC' ler enerji sistemlerinde 2 önemli fonksiyonu yerine getirmektedir. Bunlardan birincisi, yük kompanzasyonudur. Çelik tesisler ve ark fırınları gibi, gerilimde dalgalanma yaratan yüklerin kompanzasyonu önemli bir konudur.

Dalgalanma yaratan yüklerin kompanzasyonunun iki önemli sebebi bulunmaktadır:

- AC sisteminin, kabul edilebilir sınırlar dahilinde, terminal gerilimini muhafaza etmekte çok zayıf kalması
- Reaktif güç ihtiyacının AC sisteminden karşılanmasının ekonomik ve pratik olmamasıdır.

SVC' lerin bu tip yük baralarına yerleştirilmesi, yüke ait güç faktörünün iyileşmesini ve bununla birlikte gerilim profilinin de iyileşmesini sağlamaktadır. SVC' lerin büyüklüğü genellikle yerel yük miktarına bağlıdır.

SVC' lerin ikinci önemli uygulama alanı EHV şebekeleridir. SVC' lerin EHV şebekelerine uygulanmasındaki amaç, bara geriliminin nominal değerinde tutulmasının sağlanması için gerekli olan dinamik rezerv gücün (VAR enjeksiyonu) sağlanmasıdır. Ayrıca arıza durumlarında, bara gerilimlerinin kontrolü için, hızlı bir şekilde cevap verebilmektedirler. SVC' nin boyutu ve yeri, sistemin kararlı hal ve dinamik analizi temel alınarak belirlenir.

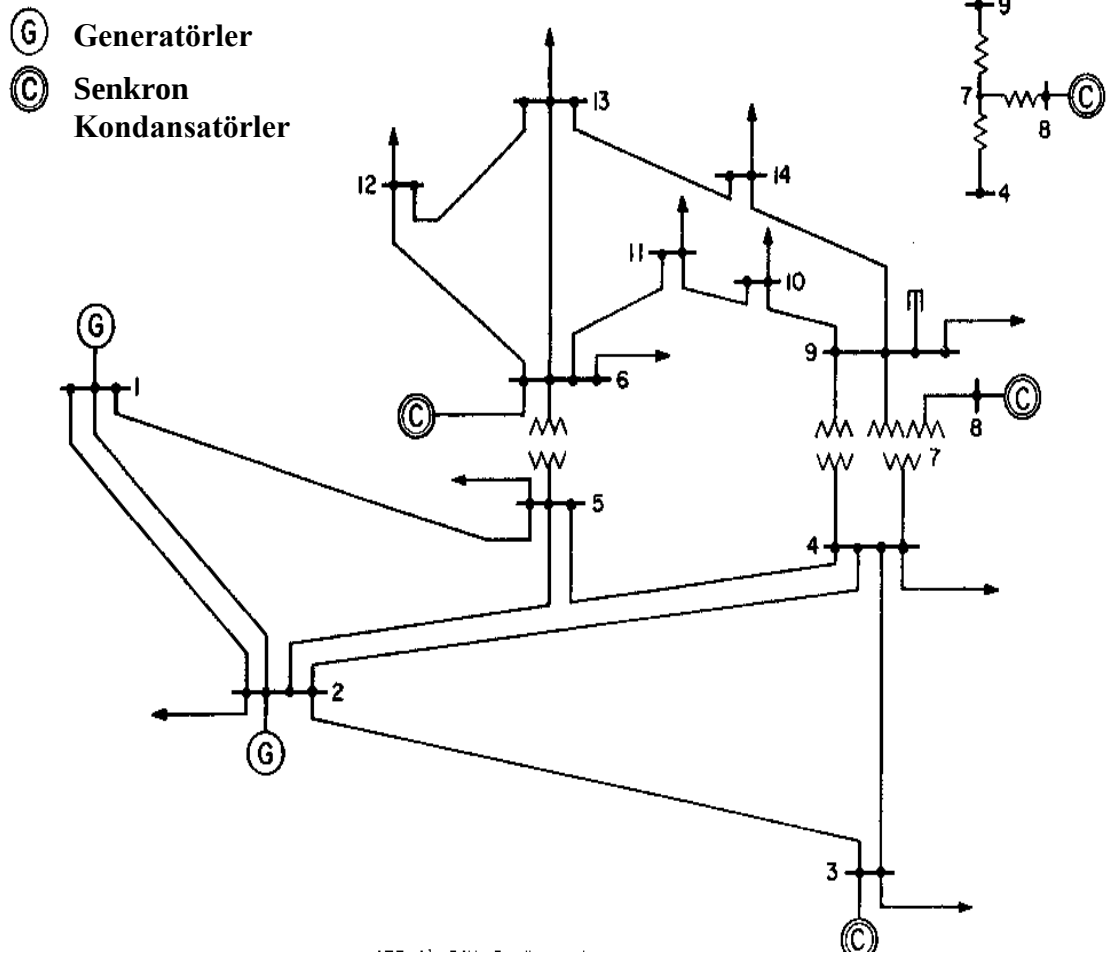
5.4.1. Yük Akışı İçin SVC Modeli

Birçok popüler yük akışı programı belirli bir SVC modeli içermemektedir. Genellikle SVC' ler, reaktif güç limitleri olan geleneksel bir PV generatörü olarak modellenir. Bu durumun en büyük sakıncası, SVC' nin limitlerinde bir kapasitör veya reaktör olarak çalışması durumunda, elde edilen sonuçlarda büyük hataların meydana gelmesidir. Düşük gerilimin temel amaç olması durumunda SVC, TCR-FC tipi bir SVC olarak modellenebilir. Örneğin düşük gerilim problemleri için $a+200\text{ MVar}$ ' lık bir SVC, 200 MVar' lık bir kapasitör olarak modellenebilir. Geleneksel bir yük akış programı ile süseptans regülatörlü bir SVC, gerilim kısıtlamalı bir PQ (yük) barası olarak modellenebilir.

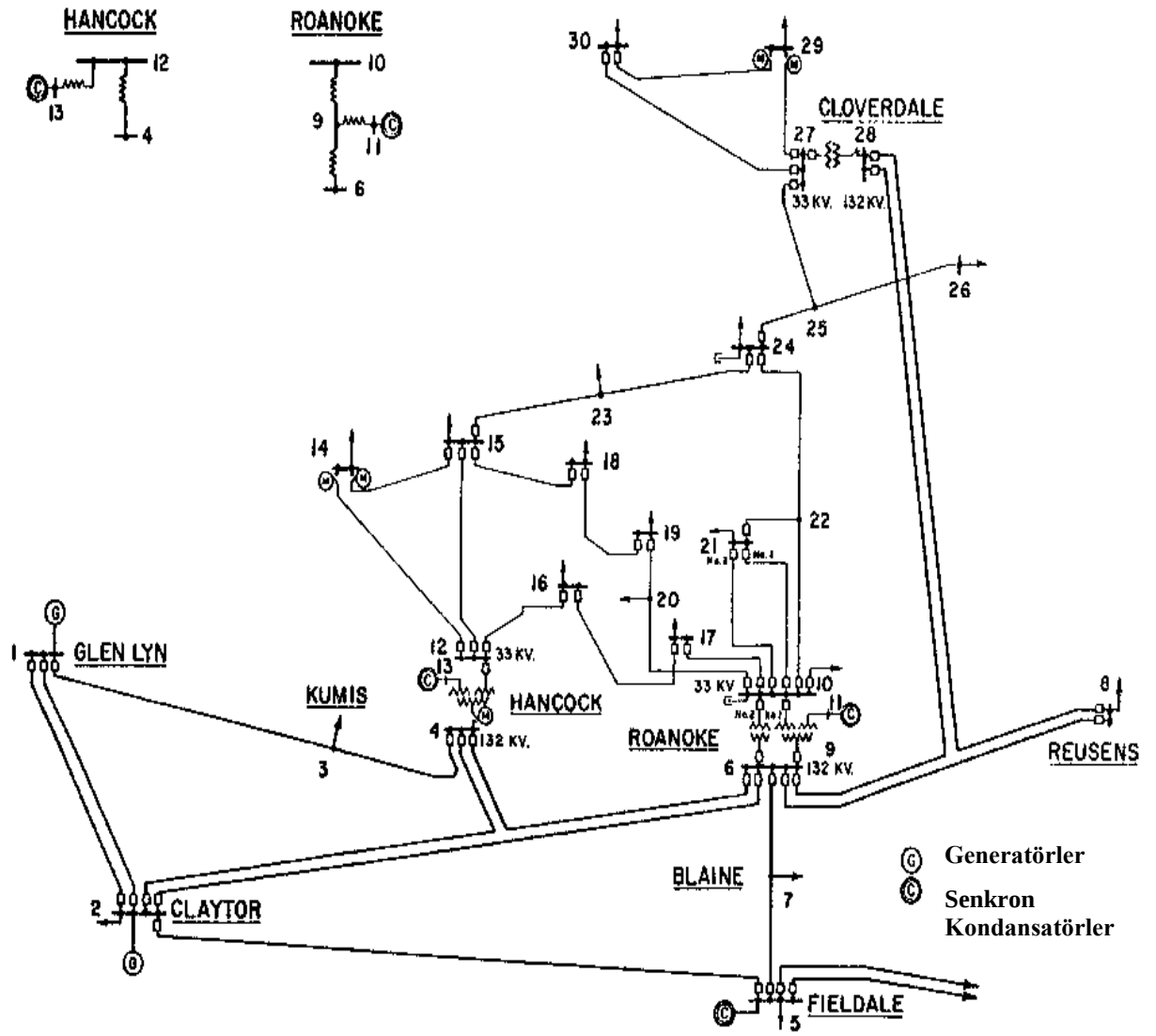
6. ÖRNEK SİSTEM ÇALIŞMALARI

6.1. Giriş

Bölüm 4’ te göz önüne alınan gerilim kararlılığı indislerinin, şekil 6.1 ve 6.2’ de gösterilen IEEE 14 ve 30 baralı örnek sistemleri için hesaplanması ve gerilim kararlılığının belirlenmesinde kullanılan bu indislerin, Bölüm 3’ te göz önüne alınan sürekli yük akış yöntemi kullanılarak karşılaştırmalarına ait çalışmalara ilave olarak son bölümde, örnek sistemlere ait gerilim kararlılığı indislerinin iyileştirilmesine yönelik uygulamalar yapılmıştır.



Şekil 6.1 IEEE 14 baralı örnek sistem [28]



Şekil 6.2 IEEE 30 baralı örnek sistem [28]

Bölüm 4’ te belirtilen gerilim kararlılığı indisleri, 14 ve 30 baralı örnek sistemler için sırasıyla Tablo 6.1 ve 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.1 14 baralı örnek sistem gerilim kararlılık indisleri

Bara No	L-indis Değerleri	[J] Özdeğerleri (λ_i)
4	0,1247	65,4286
5	0,1267	39,7394
7	0,0934	21,8948
9	0,1048	18,9211
10	0,1031	16,4289
11	0,0896	2,7065
12	0,0898	5,5697
13	0,0901	7,6631
14	0,1153	11,3367

Tablo 6.2. 30 baralı örnek sistem gerilim kararlılık indisleri

Bara No	L-indis Değerleri	[J] Özdeğerleri (λ_i)
7	0,0219	110,9491
8	0,0160	96,6347
9	0,0518	66,2421
10	0,1009	57,6746
11	0,0185	36,5872
12	0,0604	34,5521
3	0,0152	22,7297
14	0,0892	21,3473
15	0,0995	19,2568
16	0,0858	18,4837
17	0,1031	17,5198
18	0,1193	15,1141
19	0,1259	13,2088
20	0,1210	12,6084
21	0,1240	0,9670
4	0,1258	5,3301
5	0,1354	2,3062
24	0,1745	10,7395
25	0,2754	7,9474
26	0,3173	8,5127
6	0,3225	3,5417
28	0,0117	3,9348
29	0,3735	5,4859
30	0,4075	0,1860

Tablo 6.3 14 baralı sistem yük baraları L-indislerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması

Sıra No.	Bara No.	L-İndis Değeri
1	5	0,1267
2	4	0,1247
3	14	0,1153
4	9	0,1048
5	10	0,1031
6	7	0,0934
7	13	0,0901
8	12	0.0898
9	11	0,0896

Tablo 6.4 30 baralı sistem yük baraları L-indislerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.

Sıra No.	Bara No.	L-İndis Değeri
1	30	0,4075
2	29	0,3735
3	6	0,3225
4	26	0,3173
5	25	0,2754
6	24	0,1745
7	5	0,1354
8	19	0,1259
9	4	0,1258
10	21	0,1240
11	20	0,1210
12	18	0,1193
13	17	0,1031
14	10	0,1009
15	15	0,0995
16	14	0,0892
17	16	0,0858
18	12	0,0604
19	9	0,0518
20	7	0,0219
21	11	0,0185
22	8	0,0160
23	3	0,0152
24	28	0,0117

Tablo 6.3 ve 6.4’ te görüldüğü gibi, örnek sistem yük baraları için hesaplanan L-indislerinin büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla, kararsızlığa en yakın yük baralarının sıralaması elde edilmiştir. L-indislerine göre yapılan bu sıralamalarda; 14 baralı sistemde 5 no’ lu yük barası ve 30 baralı sistemde 30 no’ lu yük barası en kararsız baralar olarak gözükmemektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, L-indisinin 0’ a eşit olması sistemin yüksüz olması durumunu ve 1’ e eşit olması gerilim çöküşünü işaret etmektedir.

Örnek sistemlerin yük baralarına ait L-indis değerleri elde edildikten sonra, bu sistemlerin genel sistem kararlılığı derecelerinin tesbitinde kullanılan L-indislerinin karelerinin toplamı, Tablo 6.5’ te verilmiştir.

Tablo 6.5 Örnek sistemlere ait $\sum L^2$ değerleri

	$\sum L^2$
IEEE 14 Baralı Örnek Sistem	0.0994
IEEE 30 Baralı Örnek Sistem	0.7646

Tablo 6.5’ ten de görüldüğü gibi, 30 baralı örnek sistem 14 baralı örnek sisteme göre genel sistem kararlılığı açısından daha kararsızdır.

Bir diğer gerilim kararlılık indisi olan, sisteme ait jakobien matrisinin özdeğerlerine göre yapılan sıralama Tablo 6.6 ve 6.7’ de verilmiştir. Bu sıralamada da, sistemlerdeki yük baralarının gerilim kararsızlığına olan yakınlıkları göz önüne alınmıştır.

Tablo 6.6 14 baralı örnek sistem yük baralarının J_R matrisi özdeğerlerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.

Sıra No.	Bara No.	J_R (Özdeğerler)
1	11	2,7065
2	12	5,5697
3	13	7,6631
4	14	11,3367
5	10	16,4348
6	9	18,9211
7	7	21,9905
8	5	39,9683
9	4	65,3865

Tablo 6.7 30 baralı örnek sistem yük baralarının J_R matrisi özdeğerlerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.

Sıra No.	Bara No.	J_R (Özdeğerler)
1	30	0,1860
2	21	0,9670
3	5	2,3062
4	6	3,5400
5	28	3,9300
6	4	5,3300
7	29	5,4800
8	25	7,9400
9	26	8,5100
10	24	10,7300
11	20	12,6084
12	19	13,2088
13	18	15,1100
14	17	17,5100
15	16	18,4800
16	15	19,2500
17	14	21,3400
18	3	22,7200
19	12	34,5500
20	11	36,5872
21	10	57,6746
22	9	66,2421
23	8	96,6347
24	7	110,9491

Yukarıdaki tablolardan da görüleceği gibi, 14 baralı örnek sistem için 11, 12, 13, 14 ve 30 baralı sistem için ise 30,21 ve 5 no' lu yük baraları gerilim kararlılığı açısından en kritik baralardır.

Şimdi, gerilim kararsızlığının iyileştirilmesinde kullanılacak SVC' lerin yerleşimi için, aday baraların belirlenmesinde kullanılan, indirgenmiş jakobien matrisi tersinin (J_R^{-1}) köşegen elemanlarının verildiği Tablo 6.8 ve 6.9' u inceleyelim.

Sıra No.	Bara No.	J_R^{-1} (Köşegen)
60		

1	14	0,2086
2	10	0,1400
3	12	0,1372
4	11	0,1290
5	9	0,1070
6	13	0,0863
7	7	0,0775
8	5	0,0412
9	4	0,0403

Tablo 6.8 14 baralı örnek sistem yük baralarının J_R^{-1} matrisinin köşegen elemanlarına göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.

Tablo 6.9 30 baralı örnek sistem yük baralarının J_R^{-1} matrisine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralaması.

Sıra No.	Bara No.	J_R^{-1} (Köşegen)
1	30	1,5407
2	29	1,4287
3	26	1,0788
4	6	1,0070
5	25	0,7496
6	24	0,2893
7	5	0,2673
8	19	0,2544
9	18	0,2492
10	20	0,2380
11	14	0,2112
12	16	0,1799
13	4	0,1710
14	21	0,1671
15	17	0,1637
16	15	0,1469
17	10	0,1176
18	9	0,0834
19	12	0,0774
20	28	0,0570
21	7	0,0551
22	8	0,0550
23	11	0,0353
24	3	0,0199

Tablo 6.8 ve 6.9’ da her bir yük barasına ait değerler büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Bu şekilde tüm yük baraları, en kararsız baradan en kararlı baraya doğru sıralanmış olur. 30 baralı sistem için en kararsız baralar 30,29,26,6,25,24 numaralı baralar SVC yerleşimi için en uygun baralar olarak göze çarpmaktadır. 14 baralı sistem için ise; 14 ve 10 no’ lu baralar en uygun baralar olarak gözükmektedir.

Gerilim kararsızlığının analizi ve iyileştirilmesinde kullanılacak olan indisler arasında en performanslı olanının bulunabilmesi için, aktif (P_D) ve reaktif (Q_D) talep yüklerinin arttırılması sonucu bu indislerden, L-indislerinin bu değişime verdiği tepkiler, her iki örnek sistem için 6.10 ve 6.11 no'lu tablolarda verilmiştir.

Tablo 6.10 14 baralı örnek sistem için yük artımının L-indislerine etkisi

P_{D14} (MW)	Q_{D14} (MVar)	L-indisleri (L_i)
14,9	5	L_{14} : 0,1153 L_{13} : 0,0901 L_9 : 0,1048
24,9	8,355	L_{14} : 0,1429 L_{13} : 0,1024 L_9 : 0,1173
41,6079	13,961	L_{14} : 0,1948 L_{13} : 0,1242 L_9 : 0,1393
69,526	23,328	L_{14} : 0,3008 L_{13} : 0,1652 L_9 : 0,1802
116,177	38,981	L_{14} : 0,5991 L_{13} : 0,2564 L_9 : 0,2721
134,881	45,256	L_{14} : 0,9858 L_{13} : 0,3316 L_9 : 0,3518

Tablo 6.11 30 baralı örnek sistem için yük artımının L-indislerine etkisi

P_{D 30} (MW)	Q_{D 30} (MVar)	L-indisleri (L_i)
10,6	1,9	L ₃₀ : 0,4075 L ₂₉ : 0,3735 L ₂₈ : 0,0117
11,66	2,09	L ₃₀ : 0,4410 L ₂₉ : 0,4008 L ₂₈ : 0,0118
12,826	2,299	L ₃₀ : 0,4819 L ₂₉ : 0,4340 L ₂₈ : 0,0120
14,10	2,529	L ₃₀ : 0,5333 L ₂₉ : 0,4755 L ₂₈ : 0,0122
15,51	2,782	L ₃₀ : 0,6014 L ₂₉ : 0,5300 L ₂₈ : 0,0124
17,061	3,06	L ₃₀ : 0,6990 L ₂₉ : 0,6071 L ₂₈ : 0,0127
18,7671	3,366	L ₃₀ : 0,8695 L ₂₉ : 0,7394 L ₂₈ : 0,0132
19,33	3,4669	L ₃₀ : 0,9683 L ₂₉ : 0,8147 L ₂₈ : 0,0134
21,263	3,8135	L ₃₀ : 1,3218 L ₂₉ : 1,1701 L ₂₈ : 2,4665
23,389	4,191	L ₃₀ : 0,8895 L ₂₉ : 0,7574 L ₂₈ : 0,0134
25,728	4,61	L ₃₀ : 20,8783 L ₂₉ : 6,1826 L ₂₈ : 0,0213

6.10 ve 6.11 no' lu tablolarda yük artımları sırasıyla; 14 baralı sistem için, gerilim kararlılığı açısından en kararsız yük barası olarak daha önceden belirlediğimiz 14 no'lu barada, 30 baralı sistem için ise 30 no' lu yük barasında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.10' da yük artımı gerçekleştirilen 14 no' lu baranın en yakınında bulunan 13 ve 9 no' lu baralardaki değişimler de verilmiştir. Benzer şekilde Tablo 6.11' de, 30 baralı sistem için, 30 no' lu baranın en yakınındaki 29 ve 38 no' lu baraların değişimleri de verilmiştir.

Tablo 6.12 14 baralı sistem için yük artımının jakobien matrisi özdeğerlerine etkisi.

$P_{D\ 14}$ (MW)	$Q_{D\ 14}$ (MVar)	[J] Özdeğerleri (λ_{14})
14,9	5	11,3367
24,9	8,355	11,2950
41,6079	13,961	11,2182
69,526	23,328	11,0648
116,177	38,981	10,6713
139,410	46,770	10,2166
143,590	48,173	10,0017
153,699	51,555	-9,67138
156,068	56,710	-10,5934

Tablo 6.13 30 baralı sistem için yük artımının jakobien matrisi özdeğerlerine etkisi

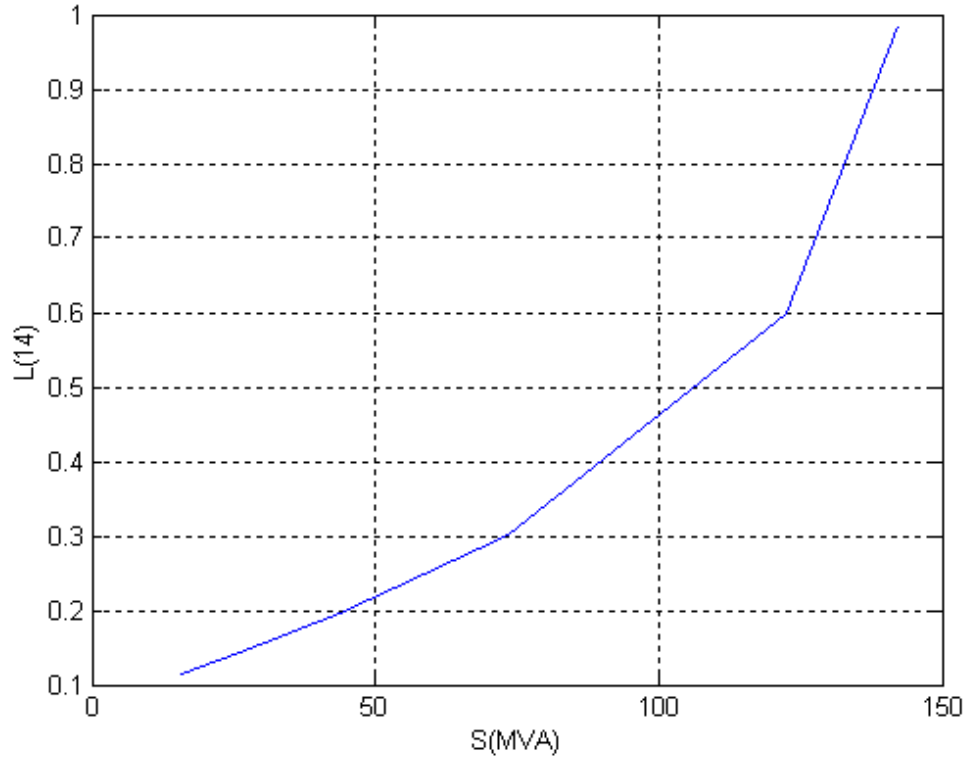
$P_{D\ 30}$ (MW)	$Q_{D\ 30}$ (MVar)	[J] Özdeğerleri (λ_i)
10,6	1,9	$\lambda_{30} : 5,338$ $\lambda_{29} : 5,486$ $\lambda_{28} : 3,935$
11,66	2,09	$\lambda_{30} : 5,242$ $\lambda_{29} : 5,469$ $\lambda_{28} : 3,929$
12,826	2,299	$\lambda_{30} : 5,127$ $\lambda_{29} : 5,448$ $\lambda_{28} : 3,922$
14,10	2,529	$\lambda_{30} : 4,989$ $\lambda_{29} : 5,423$ $\lambda_{28} : 3,914$
15,51	2,782	$\lambda_{30} : 4,813$ $\lambda_{29} : 5,389$ $\lambda_{28} : 3,903$
17,0610	3,0600	$\lambda_{30} : 4,578$ $\lambda_{29} : 5,341$ $\lambda_{28} : 3,887$
18,7671	3,3660	$\lambda_{30} : 4,206$ $\lambda_{29} : 5,259$ $\lambda_{28} : 3,864$
19,3300	3,4669	$\lambda_{30} : 4,013$ $\lambda_{29} : 5,213$ $\lambda_{28} : 3,851$
19,7166	3,5362	$\lambda_{30} : 3,794$ $\lambda_{29} : 5,156$ $\lambda_{28} : 3,837$
20,3080	3,6422	$\lambda_{30} : -5,069 - j0,126$ $\lambda_{29} : -5,445 + j0,188$ $\lambda_{28} : -4,589 - j1,239$

6.12 ve 6.13 no' lu tablolarda, 14 ve 30 baralı sistemler için sırasıyla 14 ve 30 no' lu yük baralarındaki aktif (P_D) ve reaktif (Q_D) yüklerin, $\cos \theta$ güç faktörü değişmeyecek şekilde kademeli olarak arttırılmasıyla, sürekli yük akışı koşturulmuş ve jakobien matrisi özdeğerlerinin değişimi elde edilmiştir. Sürekli yük akışı iki örnek sisteme ait önceden belirlenmiş, gerilim kararsızlığına en yakın yük baraları için koşturulup, indislerin değişimleri elde edilmiştir.

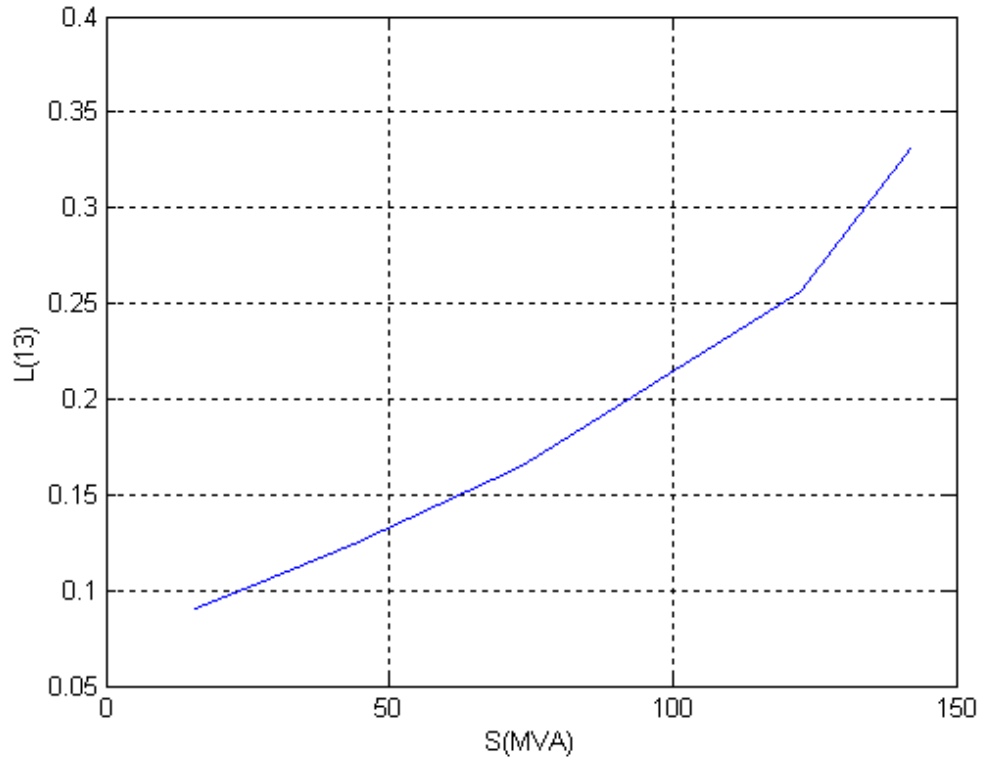
Tablo 6.10' dan görüleceği üzere, 14 no' lu baradaki yük artımı sonucu bu baraya ait L-indis değeri 134,881 MW aktif ve 45,256 MVar' lık reaktif güç sınırına kadar sonuç verebilmektedir. Ancak bu güç sınırı aşıldıktan sonra L-indis değerinde ani sapmalar oluşmaktadır. Tablo 6.12' de ise, 14 no' lu baraya ait jakobien matrisi özdeğerinin 143,59 MW' lık aktif ve 48,173 MVar' lık reaktif güç sınırına kadar gerilim kararsızlığının derecesi hakkında bilgi verebilmektedir.

Benzer şekilde, 30 baralı sistem için; L-indisi 19.638 MVA' lik görünen güce kadar sağlıklı sonuçlar verirken, jakobien matrisi özdeğeri 20.031 MVA' lik görünen güce kadar sağlıklı sonuçlar verebilmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, jakobien matrisi özdeğerinin performansı diğer indislere oranla daha yüksektir.

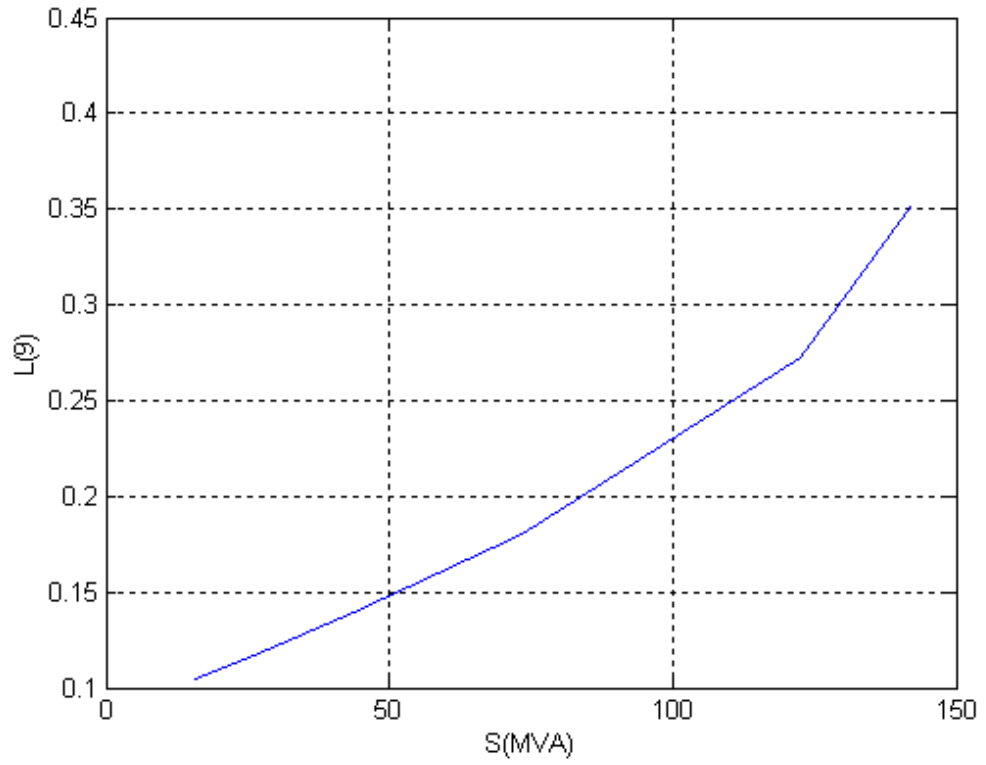
Elde edilen bu sonuçların grafiksel gösterimleri aşağıda verilmiştir.



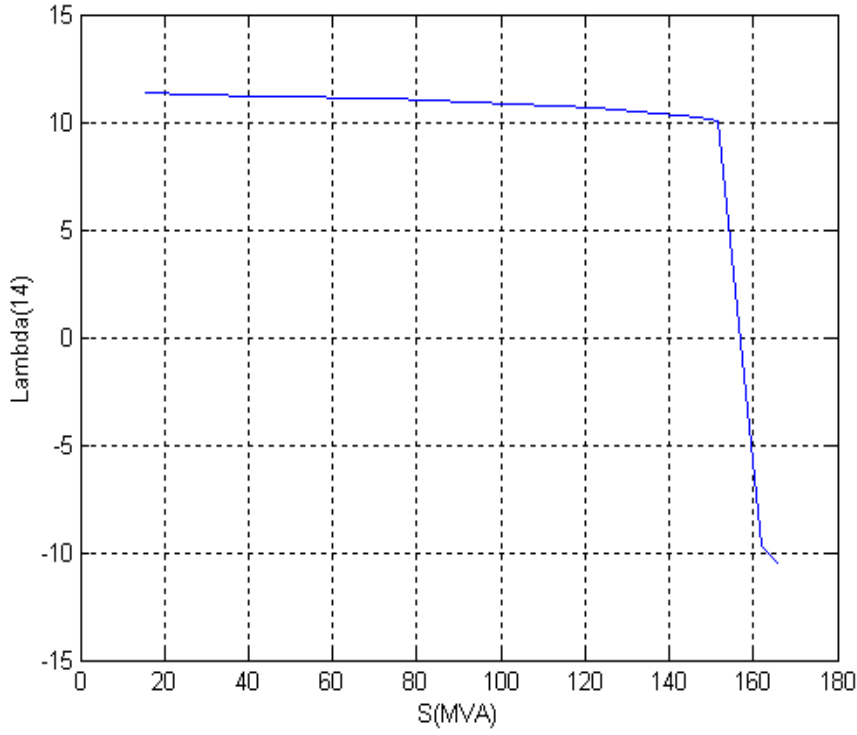
Şekil 6.3 14 baralı sistemde 14 no' lu bara L-indisi değişimi



Şekil 6.4 14 baralı sistemde 13 no' lu bara L-indisi değişimi



Şekil 6.5 14 baralı sistemde 9 no' lu bara L-indisi değişimi



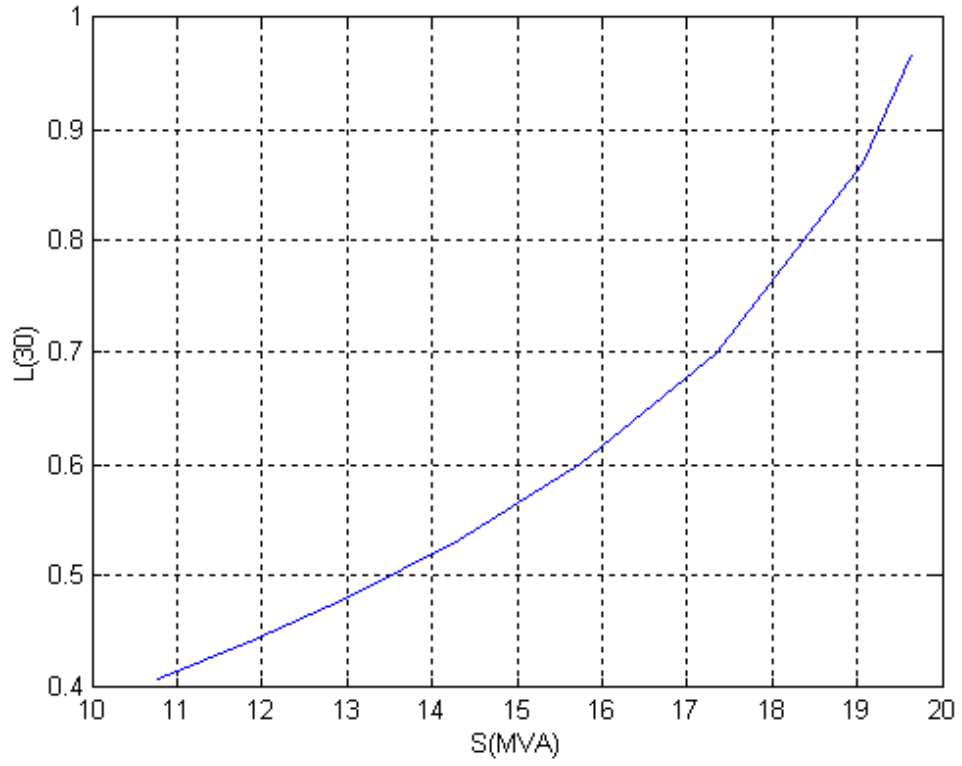
Şekil 6.6 14 baralı sistemde λ_{14} ' ün değişimi

6.3, 6.4 ve 6.5 no' lu şekillerde, 14 baralı örnek sistem yük baralarından üç tanesi için L-indislerinin değişimleri verilmiştir. Yük artımı yapılan 14 no' lu bara dışında, bu baraya en yakın 13 ve 9 no' lu baralardaki değişimler de verilmiştir. Aktif ve reaktif güç, $\cos \theta$ güç faktörü sabit kalacak şekilde artırılmıştır. Yükteki bu artış neticesinde, yük baralarındaki L-indis değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir ve 134,881 MW ve 45,256MVar' lık yük miktarına kadar sağlıklı sonuçlar vermiştir. Bu yük sınırından sonra her bir yük barası L-indislerinde sapmalar meydana gelmiştir.

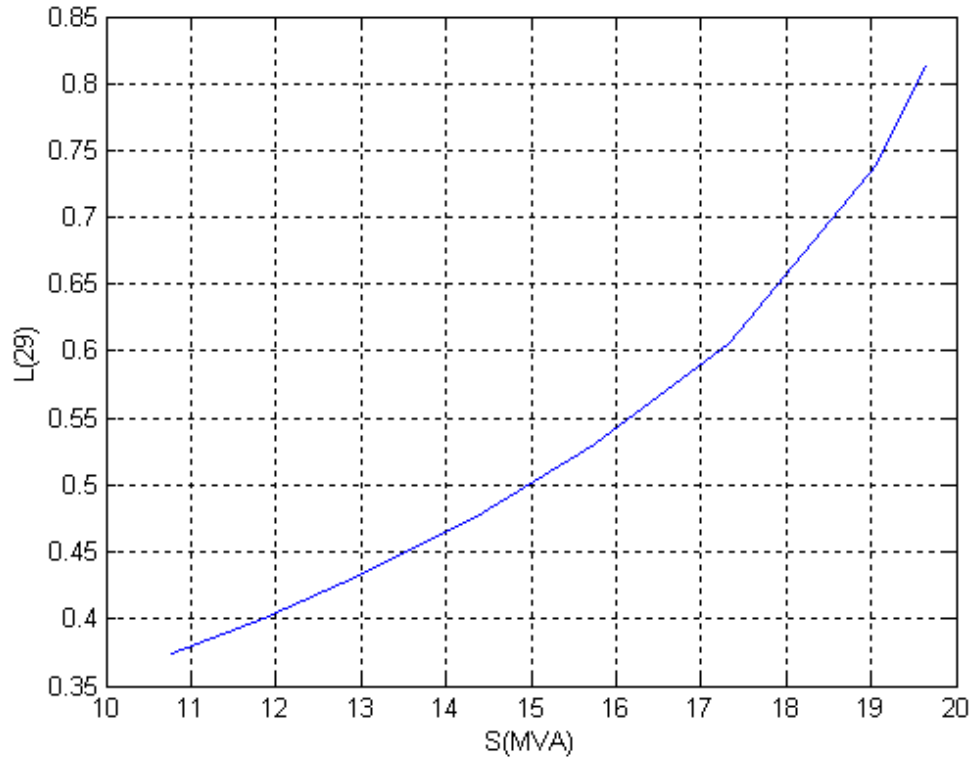
6.6 no' lu şekilde, 14 no' lu yük barası Jakobien matrisi özdeğerinin, aynı yük artımı karşısındaki değişimi verilmiştir. λ_{14} ' ün 143,59 MW ve 48,173 MVar' lık yük miktarına kadar sağlıklı sonuçlar verdiği gözükmemektedir. Ayrıca bu yüklenme değerine kadar, sistemdeki tüm yük baralarının özdeğerleri pozitif olduğu için sistem genel olarak gerilim kararlıdır.

14 baralı örnek sistem için, indirgenmiş jakobien matrisi özdeğerinin L-indislerine oranla % 6.45' lik daha fazla güce kadar sağlıklı sonuçlar vermektedir.

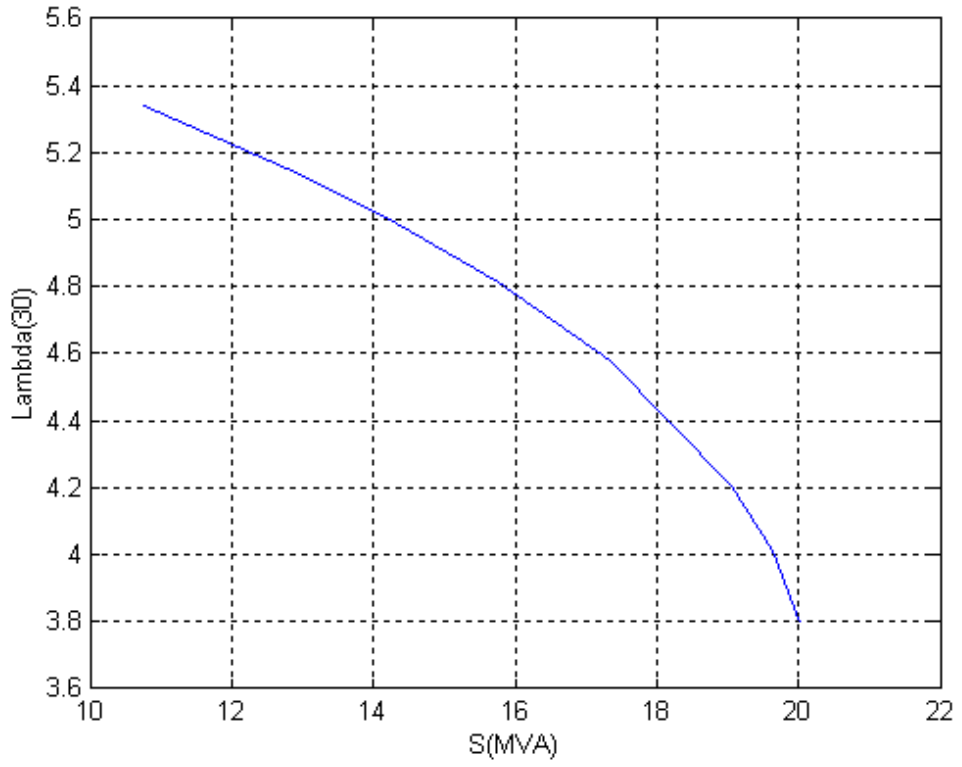
30 baralı diğer örnek sistem için de aynı uygulamayı yapacak olursak, Tablo 6.11’deki veriler ışığında, aşağıdaki grafiksel ifadeler elde edilmektedir.



Şekil 6.7 30 baralı sistemde 30 no’ lu bara L-indisi değişimi



Şekil 6.8 30 baralı sistemde 29 no' lu bara L-indisi değişimi

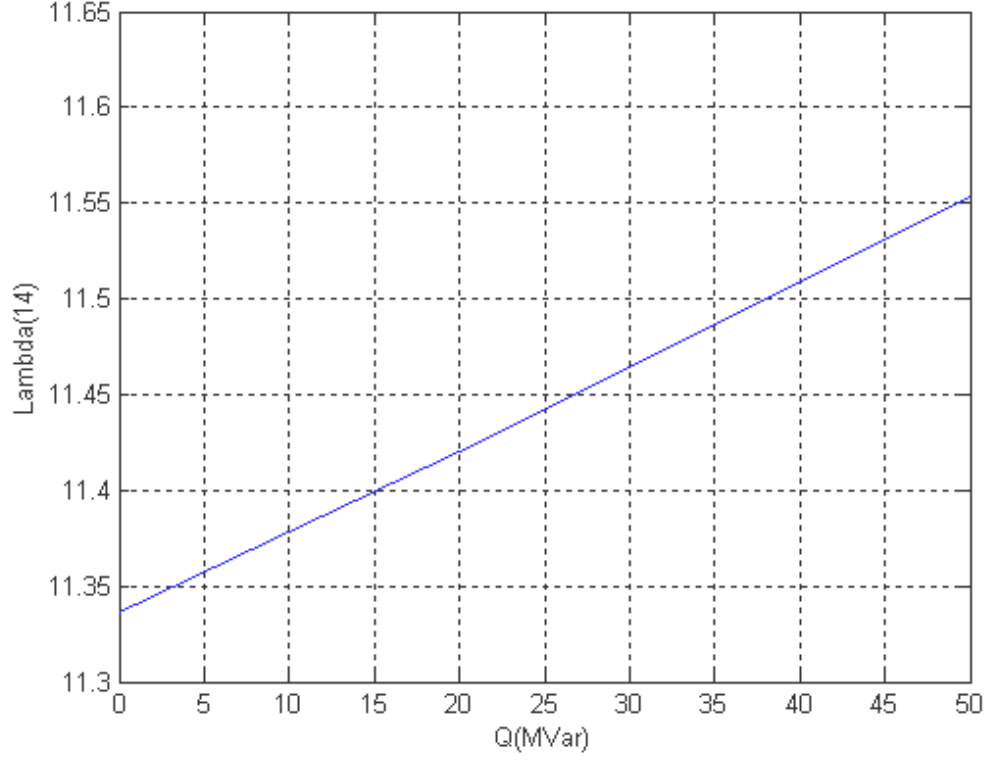


Şekil 6.9 30 baralı sistemde λ_{30} ' un değişimi

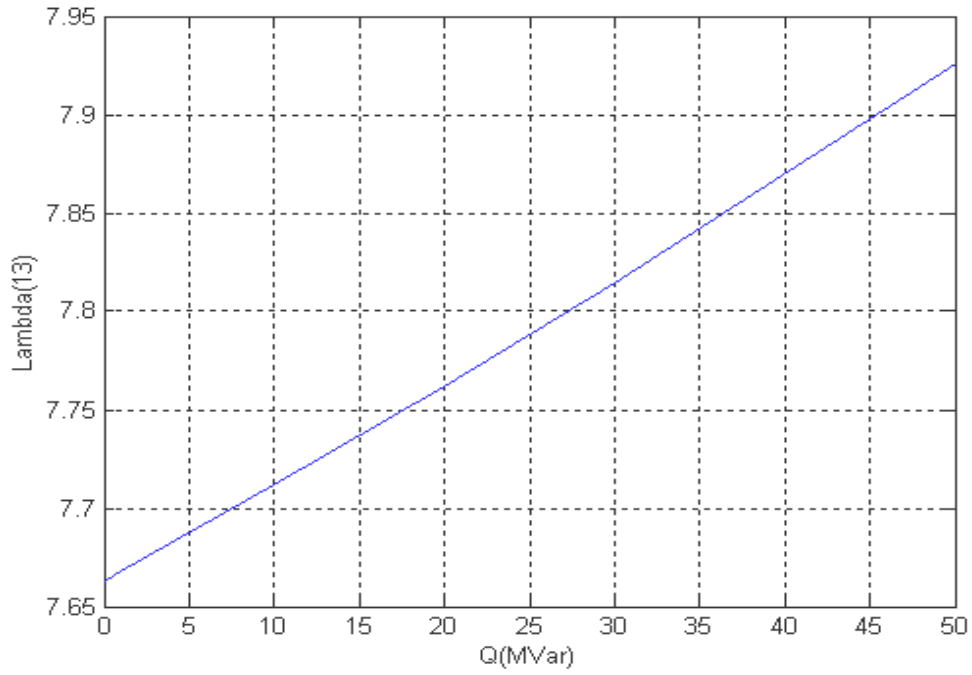
6.7, 6.8 ve 6.9 no' lu şekillerden de görüldüğü gibi, L-indisleri 19,638 MVA' lik bir değere kadar sağlıklı sonuçlar verirken, jakobien matrisi özdeğeri 20,030 MVA' lik görünen güç değerine kadar sağlıklı sonuç vermektedir. İndirgenmiş jakobien matrisi özdeğerleri, 30 baralı örnek sistem için, L-indislerine göre yaklaşık % 2' lik daha fazla yüke kadar sağlıklı sonuçlar vermektedir. Ayrıca 30 no' lu bara yakınında bulunan 29 no' lu baranın da L-indis değerinde artış meydana gelmektedir. Yük artışının olduğu baraya yakın baraların daha uzak baralara oranla, gerilim kararsızlıklarında daha fazla düşüş meydana gelmektedir.

Her iki örnek sistem için de yapılan incelemeler sonucunda, seçilen yük baralarına ait indirgenmiş jakobien matrisi özdeğerlerinin, bu baralara ait L-indislerine göre daha sağlıklı sonuçlar verdiği gözükmemektedir.

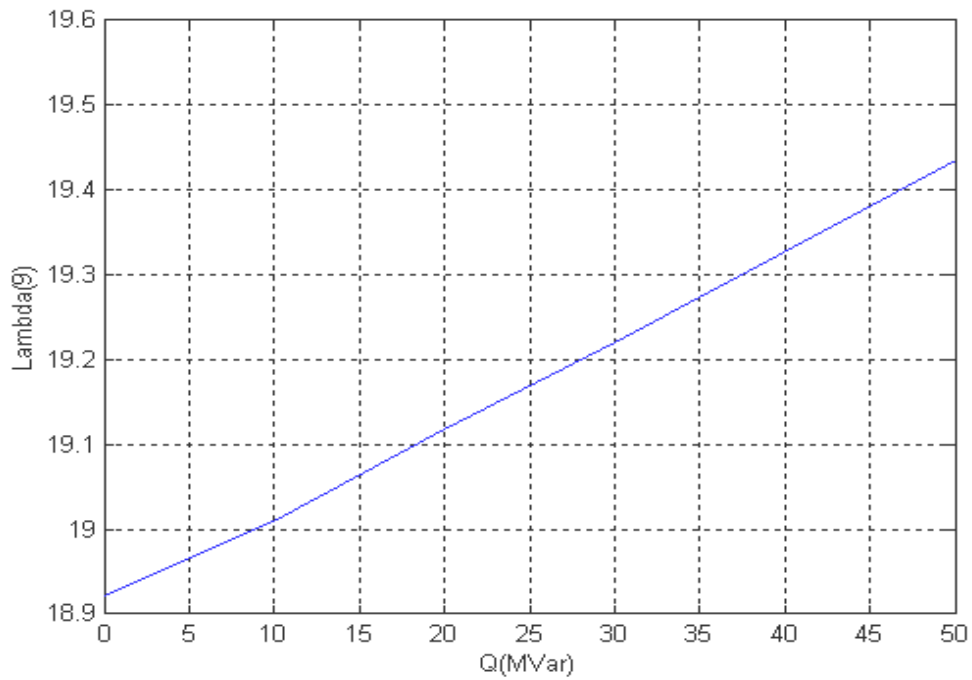
Şimdi, gerilim kararlılığının iyileştirilmesine yönelik olarak, uygun baralara SVC yerleşiminin yapılması ve SVC' nin gerilim kararlılığına ve yerleştirildikleri ve yakında bulunan yük baralarındaki gerilim profiline yaptıkları etkileri inceleyelim.



Şekil 6.10 14 baralı sistemde 14 no'lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{14} ' ün değişimi



Şekil 6.11 14 baralı sistemde 14 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{13} ' ün değişimi

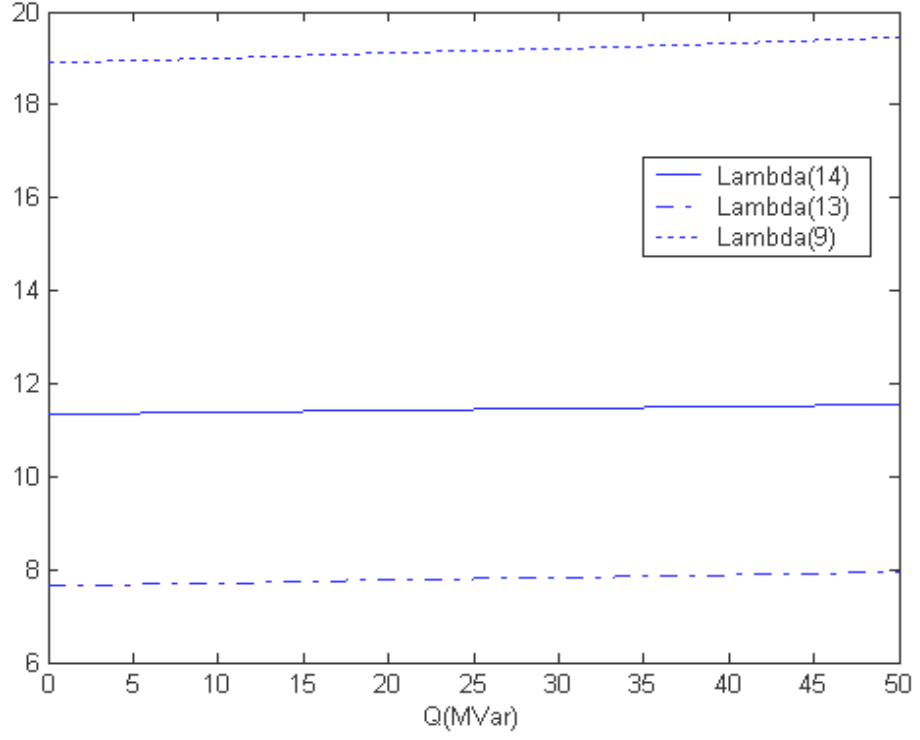


Şekil 6.12 14 baralı sistemde 14 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_9 ' ün değişimi

14 baralı örnek sistemde, SVC yerleşimi için en uygun bara olarak belirlenen 14 no' lu baraya yerleştirilen SVC' nin değişik değerleri için, 14, 13 ve 9 no' lu baralara ait özdeğerlerin değişimleri 6.10, 6.11 ve 6.12 no' lu şekillerde verilmiştir.

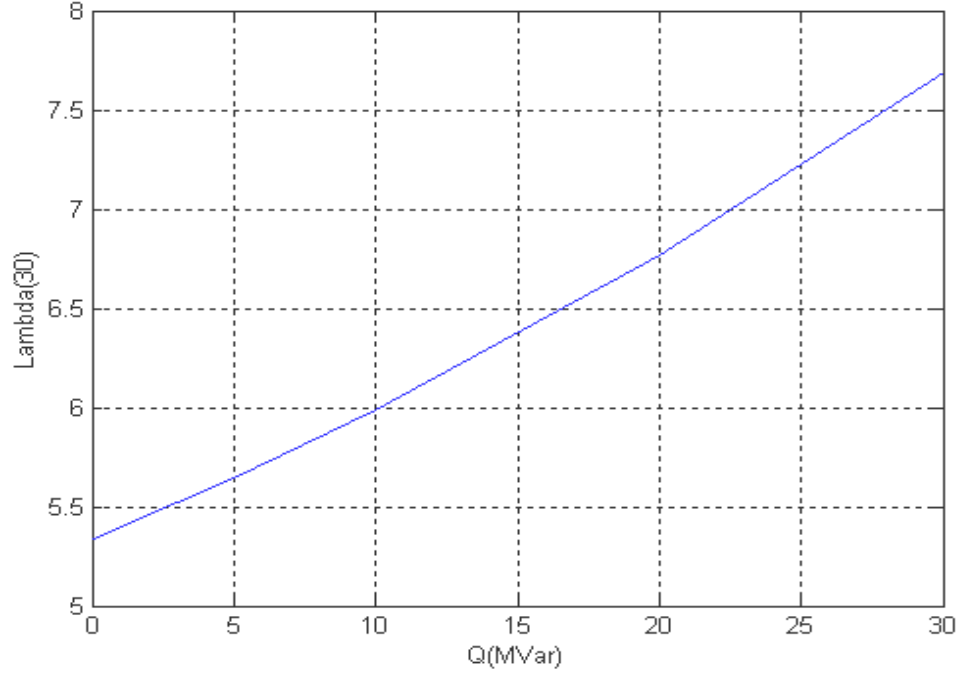
Yukarıdaki grafiklerden 14 baralı sistemde, 50 MVar' lık SVC yerleşimi ile, yük baralarının gerilim kararlılıklarında önemli gelişmeler elde edilmiştir.

6.13 no' lu şekilde 14 baralı örnek sistemde, SVC büyüklüğünün λ_{14} , λ_{13} ve λ_9 üzerindeki etkileri karşılaştırma kolaylığı açısından toplu halde verilmiştir.

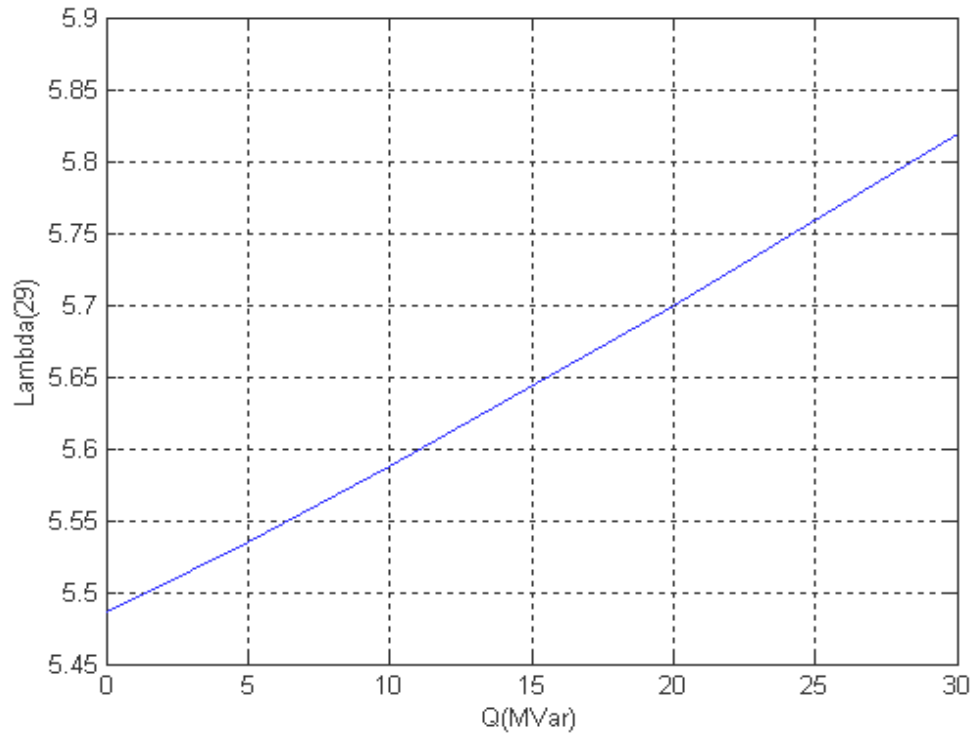


Şekil 6.13 14 baralı sistemde SVC büyüklüğü ile λ_{14} , λ_{13} , λ_9 değişimi

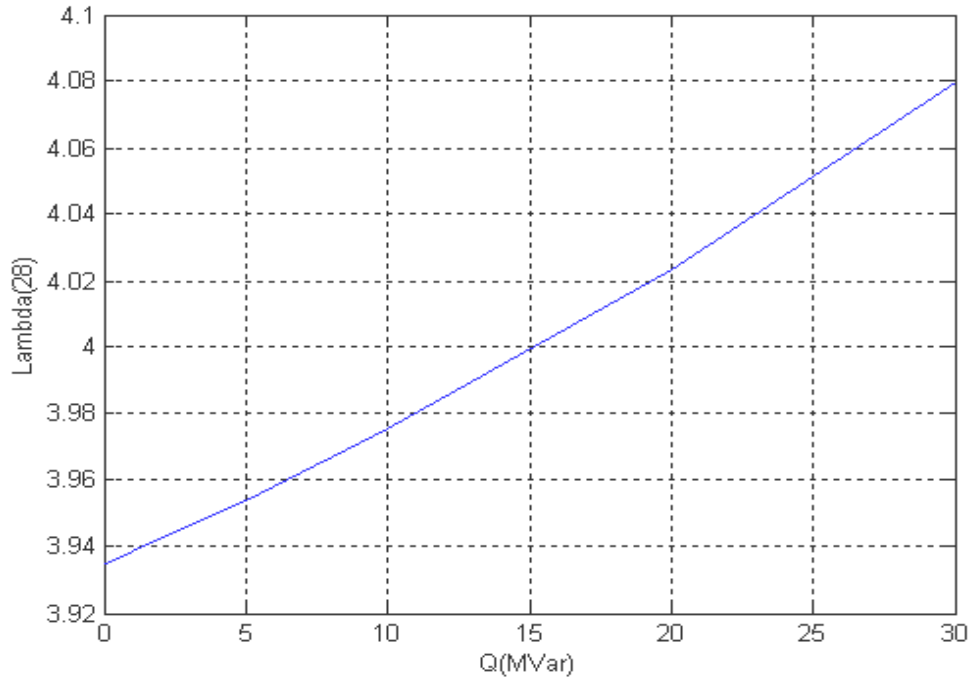
30 baralı örnek sistem için ise, 30 no' lu yük barasına yerleştirilen SVC' nin, yerleştirildiği baraya ve bu baraya en yakın yük baralarının gerilim kararlılıklarına yaptığı etkiler 6.14, 6.15 ve 6.16 no' lu şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 6.14 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{30} ' un değişimi

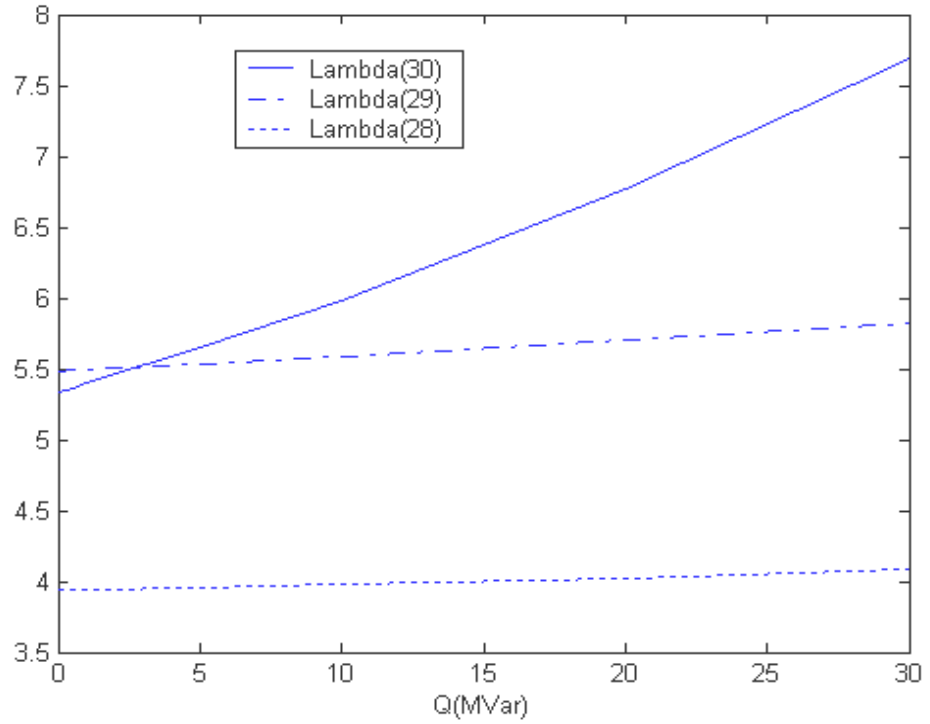


Şekil 6.15 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{29} ' un değişimi



Şekil 6.16 30 baralı sistemde 30 no' lu baraya SVC yerleşimi ile λ_{28} ' in değişimi

6.17 no' lu şekilde 30 baralı örnek sistemde, SVC büyüklüğünün λ_{30} , λ_{29} ve λ_{28} üzerindeki etkileri toplu halde verilmiştir.

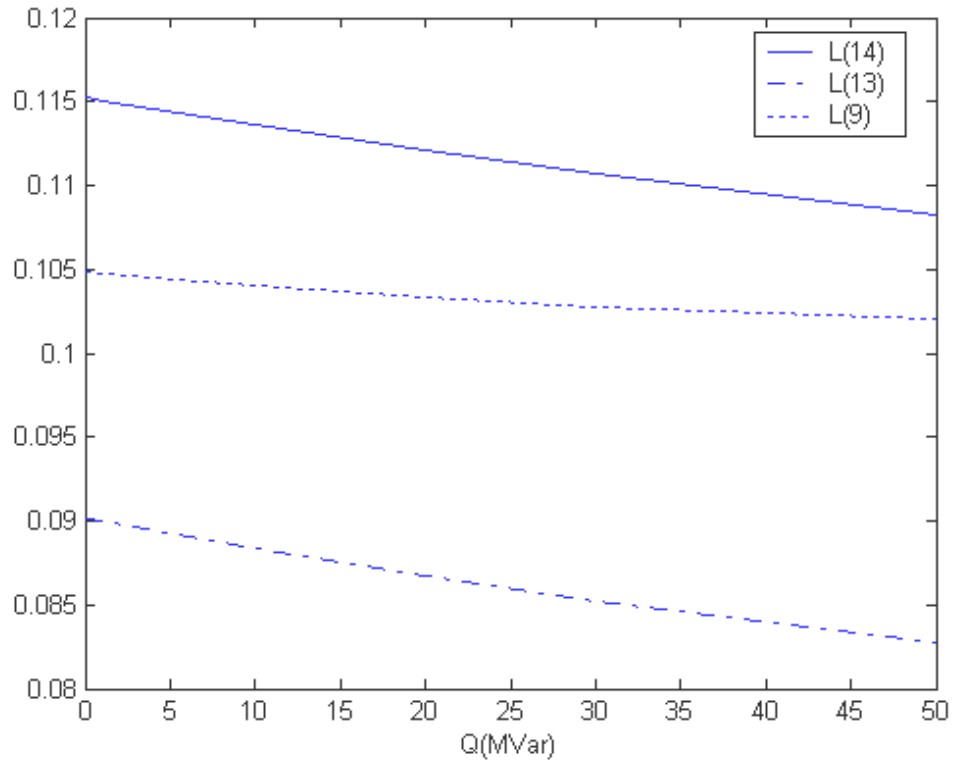


Şekil 6.17 30 baralı sistemde SVC büyüklüğü ile λ_{30} , λ_{29} , λ_{28} değişimi

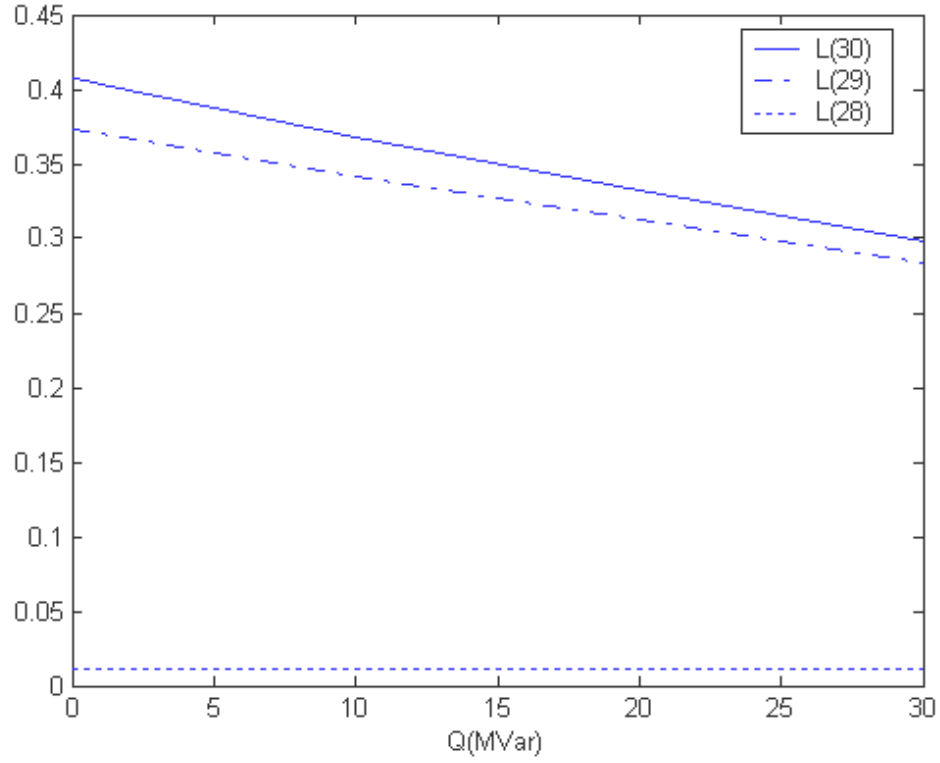
Her iki sistem için özdeğerlerin, SVC büyüklüğü ile değişimi ve uygulandıkları baraların gerilim kararlılıklarında meydana getirdikleri gelişmeler 6.13 ve 6.17 no' lu tablolardan gözükmemektedir.

30 MVar' lık SVC yerleşimi ile, 30, 29 ve 28 no' lu baraların gerilim kararlılıklarında önemli gelişmeler meydana gelmiştir.

Her iki sistem için, L-indislerinin SVC boyutu ile değişimini gösteren grafikler 6.18 ve 6.19 no' lu şekillerde verilmiştir.



Şekil 6.18 14 baralı sistem için SVC ile L-indisleri değişimi

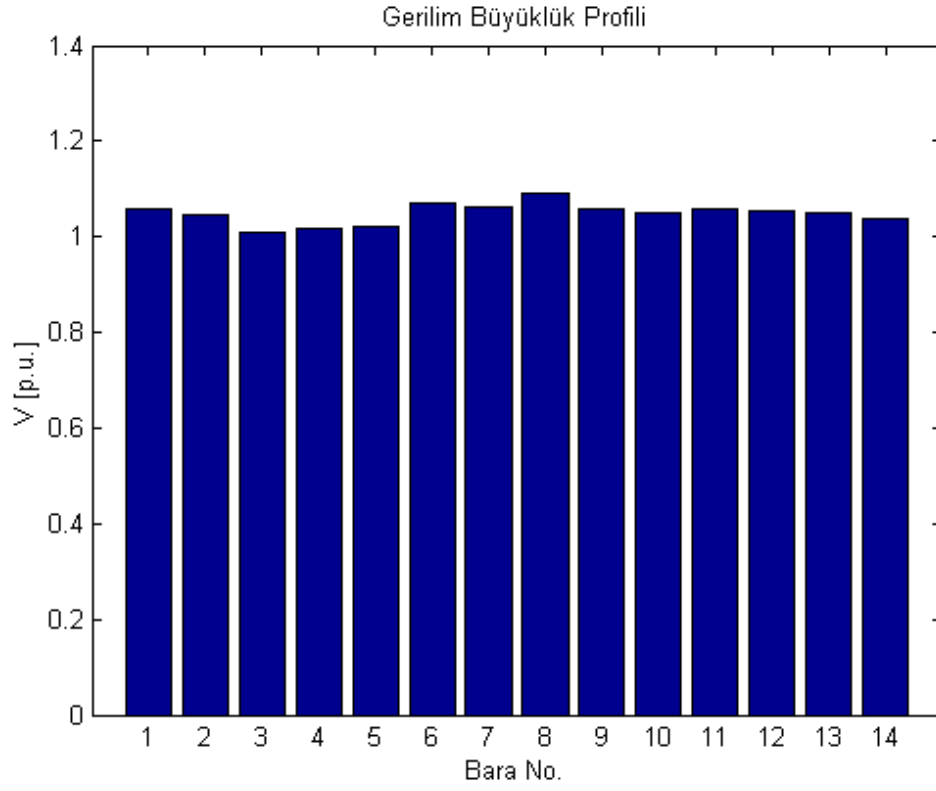


Şekil 6.19 30 baralı sistem için SVC ile L- indisleri değişimi

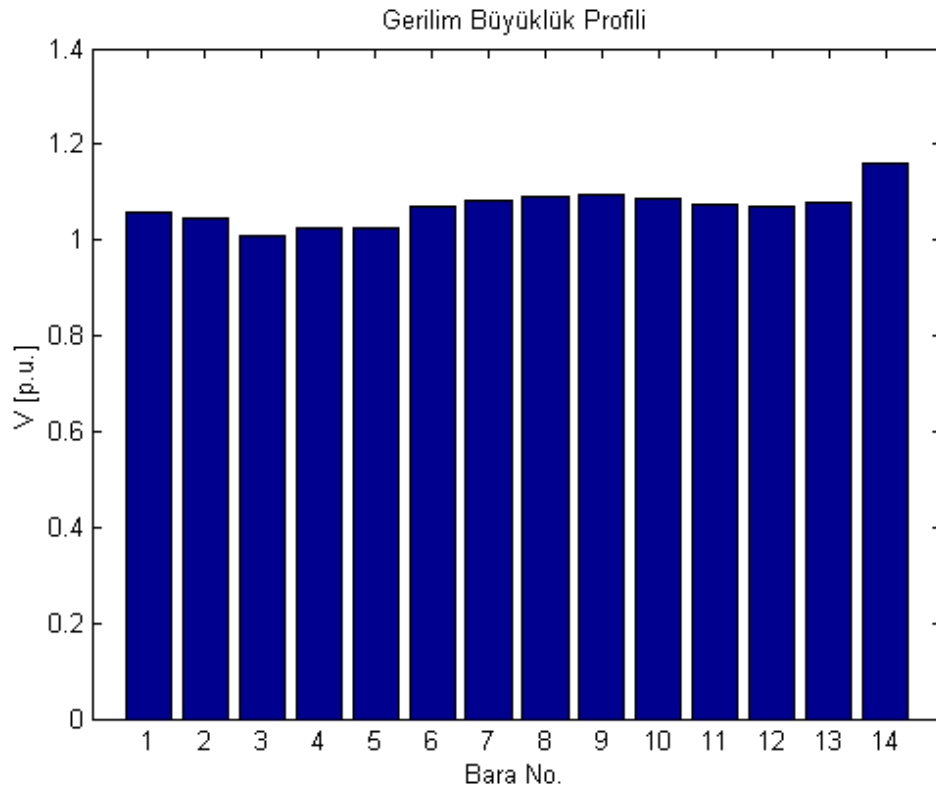
14 baralı sistemde, 50 MVar' lık SVC' nin yerleştirildiği 14 no' lu baranın ve bu bara etrafındaki diğer iki baranın L-indisleri değişimi, 6.18 no' lu şekilde verilmiştir. Bu baraların gerilim kararlılıklarındaki gelişmeler; 14 no' lu barada % 6.1, 13 no' lu barada % 8.1 ve 9 no' lu barada %2.67 olmaktadır.

30 baralı örnek sistemde, 30 MVar' lık SVC' nin yerleştirildiği 30 no' lu baranın ve bu baraya yakın diğer iki baranın L-indisleri değişimi, 6.19 no' lu şekilde verilmiştir. SVC ile L-indislerinin değişimini veren bu grafiklerden, gerilim kararlılıklarındaki gelişmeler; 30 no' lu barada % 27 ve 29 no' lu barada %24 olmaktadır.

14 baralı sisteme 50 MVar' lık SVC yerleşimi ile sistemin genel gerilim kararlılığı L-indislerine göre yapılan hesaplamalarda %7.746, 30 baralı sistemde ise 30 MVar' lık SVC yerleşimi ile % 32.6 artmıştır.

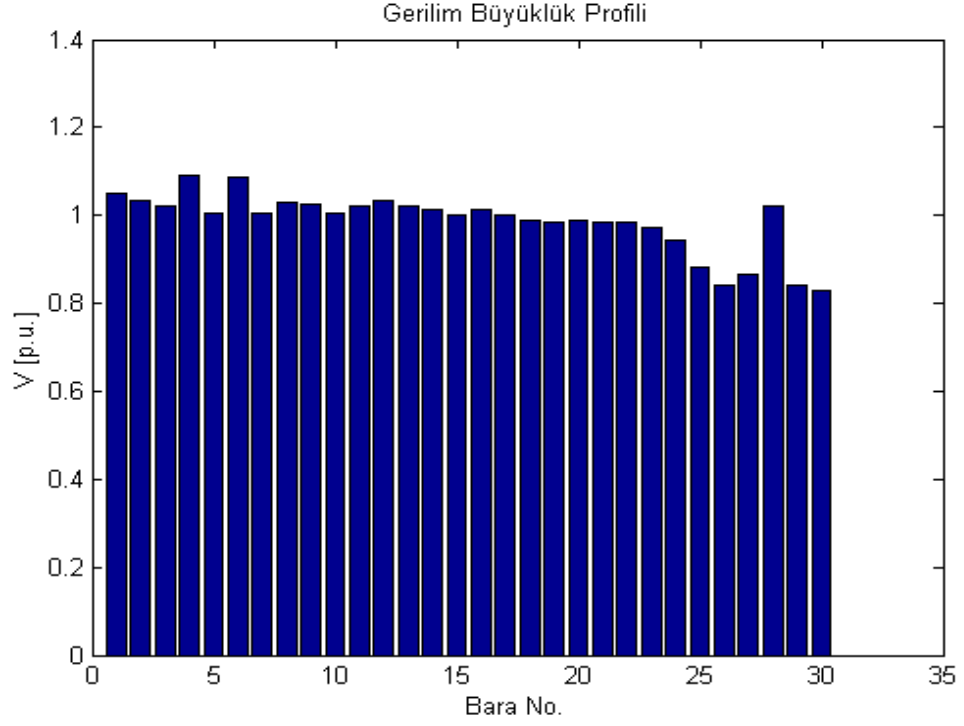


Şekil 6.20 14 baralı sistemin SVC' siz gerilim profili

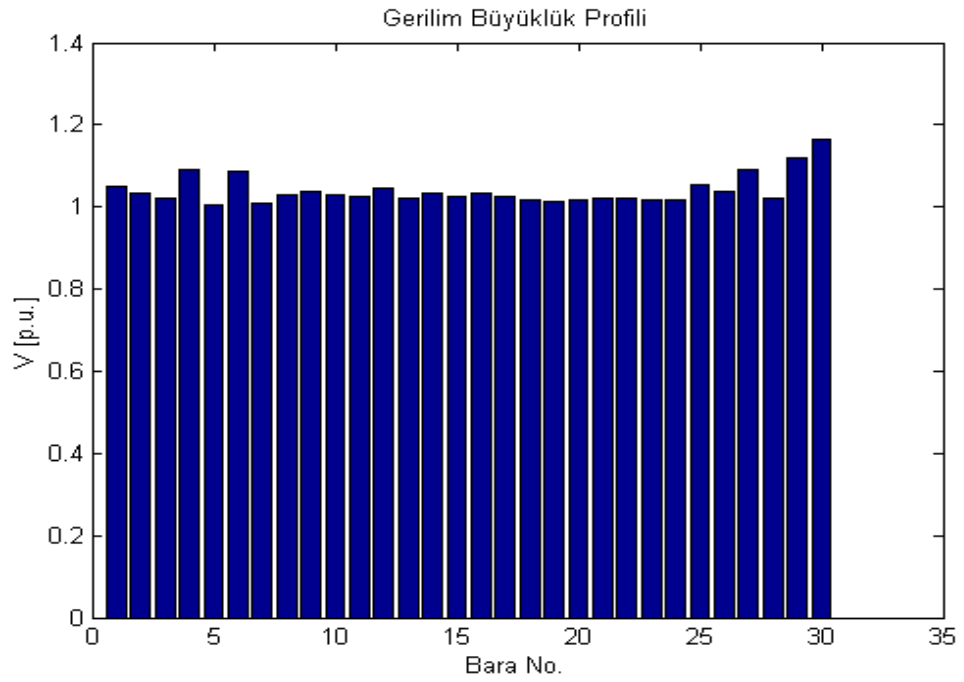


Şekil 6.21 14 baralı sistemin 50 MVar' lık SVC ile gerilim profili

6.20 ve 6.21 no' lu şekillerde, 14 baralı sisteme ait baraların, SVC' siz ve SVC uygulandıktan sonraki gerilim büyüklüklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi bara gerilimleri; 14 no' lu barada % 11.94, 13 no' lu barada %2.66 ve 9 no' lu barada %3.85 artmıştır.



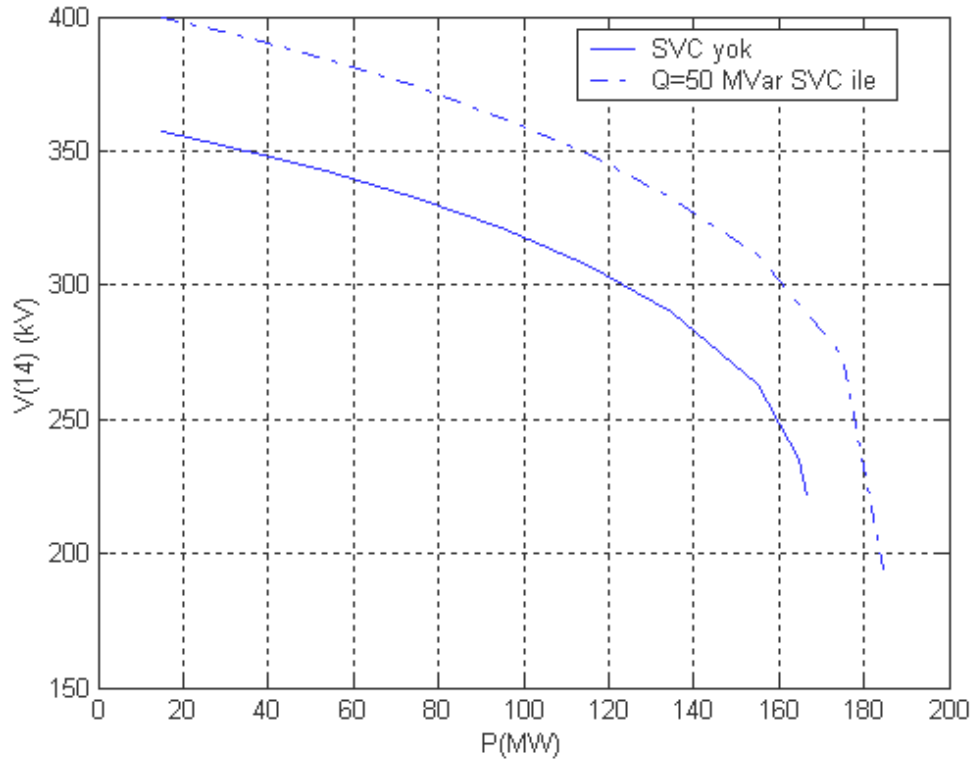
Şekil 6.22 30 baralı sistemin SVC' siz gerilim profili



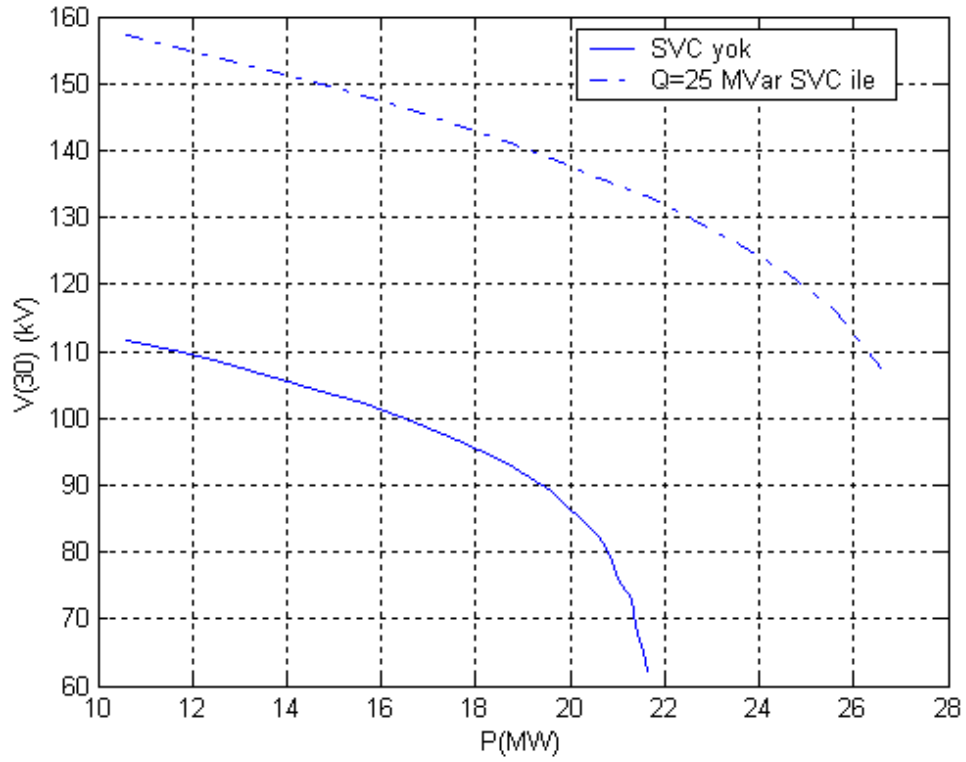
Şekil 6.23 30 baralı sistemin 25 MVar' lık SVC ile gerilim profili

30 baralı sisteme SVC uygulandıktan sonraki gerilim profilindeki değişim, 6.23 no' lu şekilde verilmiştir. Bara gerilimleri; 30 no' lu barada % 40.8 ve 29 no' lu barada %33.3 oranında artmıştır.

Sonuçlardan da görölmektedir ki, SVC uygulaması ile hem gerilim profili, hem de gerilim kararlılığında ciddi gelişmeler meydana gelmektedir.



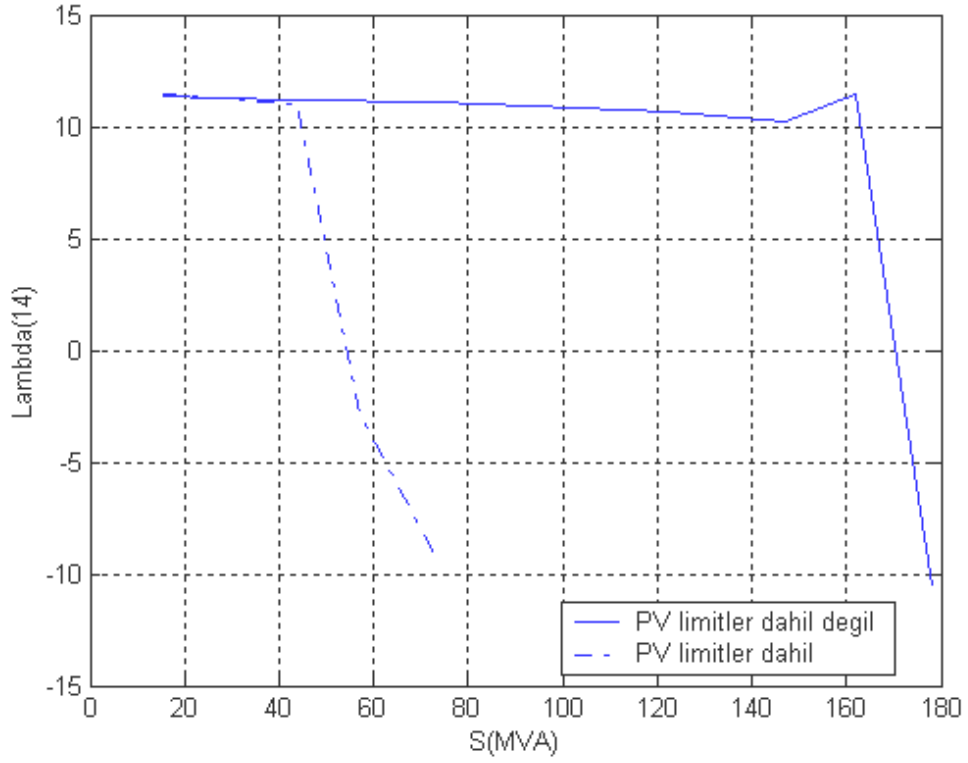
Şekil 6.24 14 baralı sistemde SVC' nin gerilim profiline etkisi



Şekil 6.25 30 baralı sistemde SVC' nin gerilim profiline etkisi

6.24 ve 6.25 no' lu şekillerde, 14 ve 30 baralı sistemler için sırasıyla 14 ve 30 no' lu yük baralarının, SVC uygulandıktan sonraki ve önceki gerilim profilleri verilmiştir. Grafiklerden de açıkça görülmektedir ki, svc uygulandıktan sonra, gerilim çöküşü daha ileri yük seviyelerinde gerçekleşmektedir.

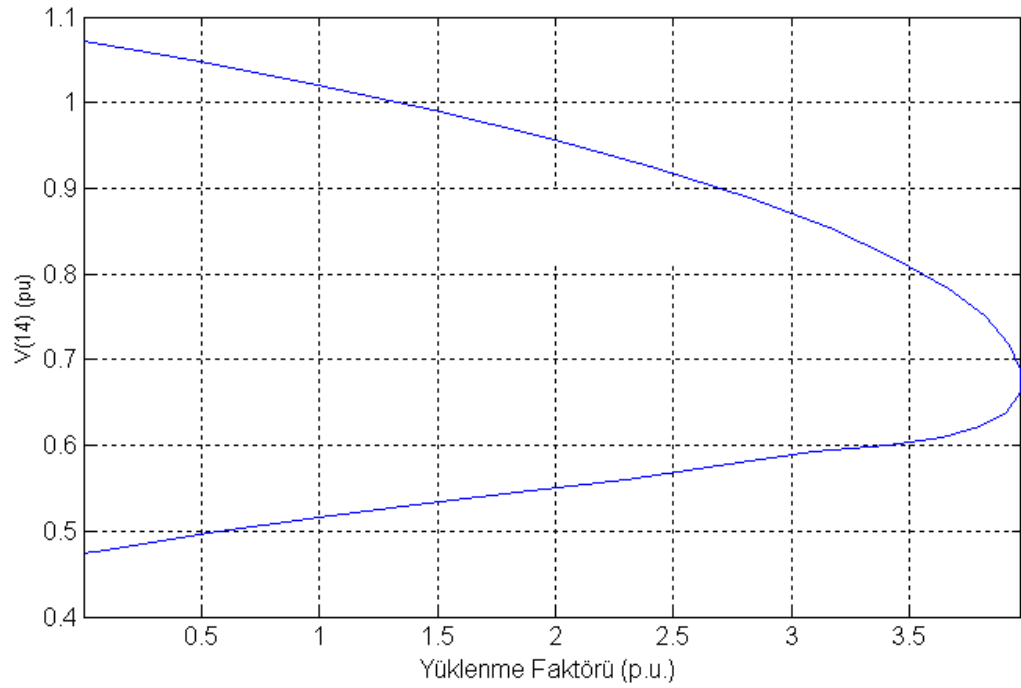
Üreteç reaktif güç limitlerinin göz önüne alınması halinde, gerilim kararlılığı indislerinden λ 'nın, görünen güç ile değişimi aşağıda verilmiştir.



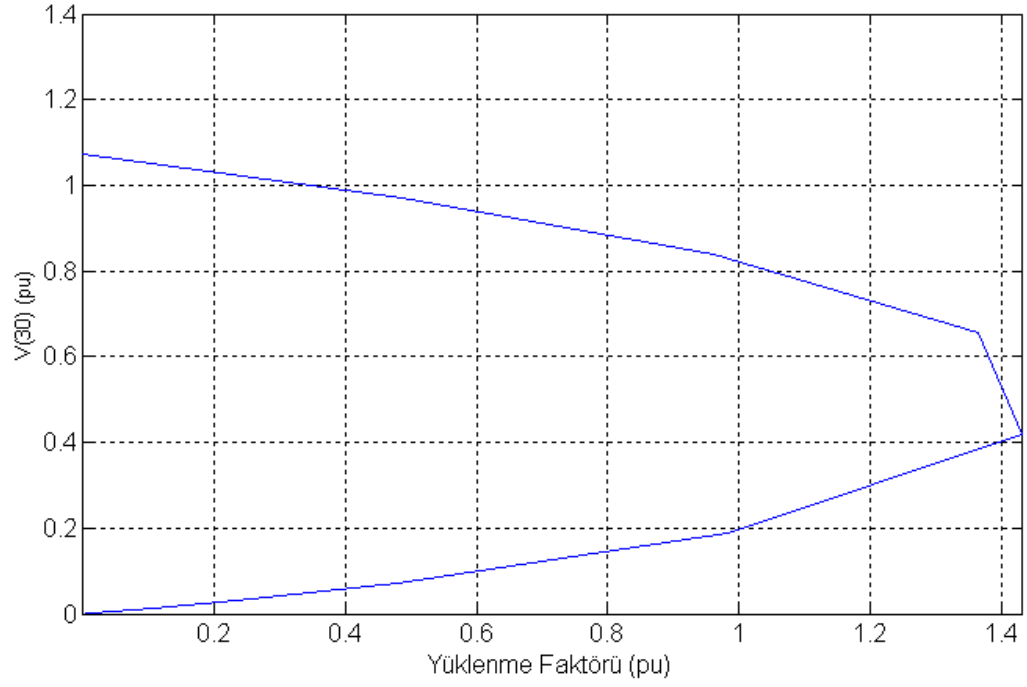
Şekil 6.26 14 baralı sistemde PV reaktif limitlerinin dahil olup olmaması halinde $S-\lambda_{14}$ değişimi

6.26 no' lu şekilde, 14 baralı sistemde, üreteç reaktif limitlerinin göz önüne alındığı ve alınmadığı durumlar için gerçekleştirilen yük artımı ile, λ (Jakobien matrisi özdeğeri)'nin değişimi verilmiştir. Bu grafikten, λ_{14} 'ün üreteç reaktif limitlerinin dahil edilmesi halinde, 43.887 MVA'lık görünür güç değerine kadar sağlıklı sonuçlar verebildiği gözükmemektedir. λ_{14} 'ün, üreteç reaktif limitleri ihmal edildiği durumda, 147.046 MVA'lık güce kadar sağlıklı sonuçlar verebildiği daha önceden verilmiştir. Üreteç reaktif limitlerinin göz önüne alınmasıyla birlikte, bu sınır güç değeri önemli şekilde azalmaktadır.

Toplam sistem yükünün kritik bara gerilimine göre değişimi şeklinde çizilen P-V eğrileri, kararlı hal yüklenebilirlik limitlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Ancak bu eğrilerde, kritik nokta (eğrinin burun noktası) yakınındaki bölgede, jakobien matrisinin tekil olma eğilimi göstermesi sebebiyle sürekli yük akışından yararlanılmıştır. 14 ve 30 baralı sistemler için sırasıyla, 14 ve 30 no' lu yük baralarının (kritik baralar) gerilimleri ile toplam sistem yükünün değişimi 6.27 ve 6.28 no' lu şekillerde verilmiştir.



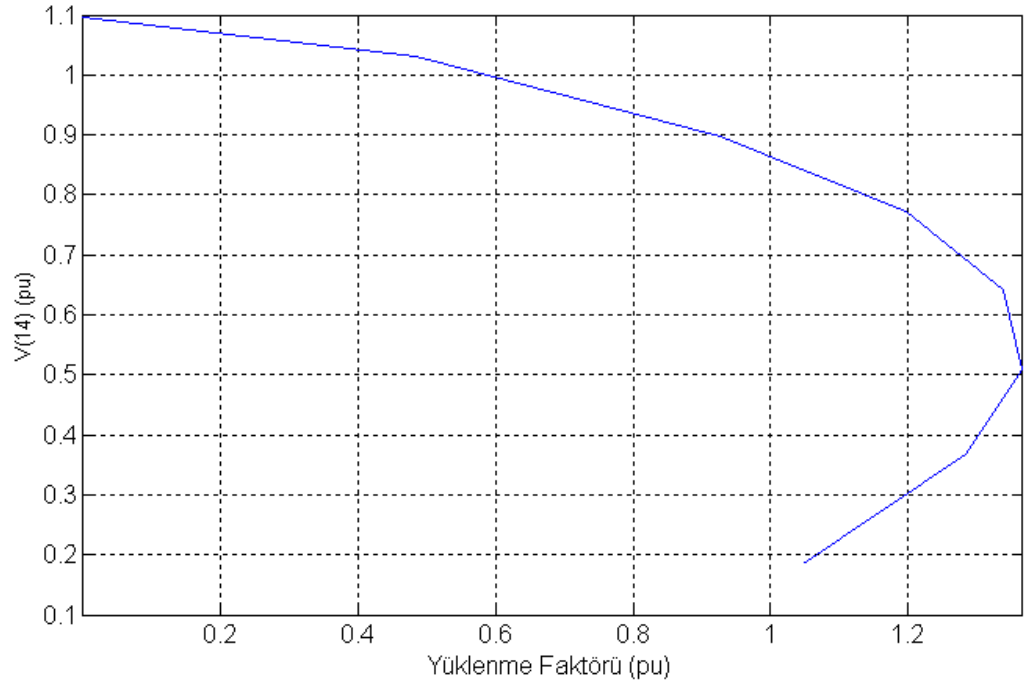
Şekil 6.27 14 no' lu baraya ait P-V eğrisi



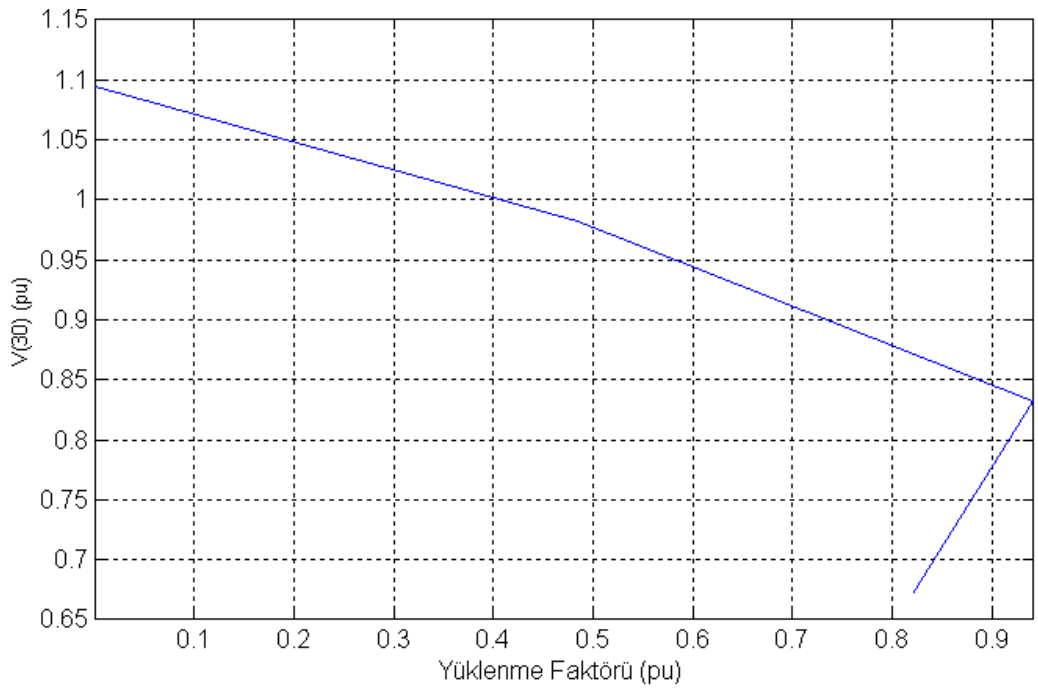
Şekil 6.28 30 no' lu baraya ait P-V eğrisi

Yukarıdaki şekillerden; 14 ve 30 baralı sistemler için kritik baralar olan 14 ve 30 no' lu yük baralarının kritik gerilim değerleri sırasıyla, 0.65 pu (224.25 kV) ve 0.43 pu (58.05 kV)' dur. Her iki bara için eğrilerin dönüm noktaları sırasıyla, 4.0 ve 1.43 pu' luk yüklenme faktörlerinde oluşmuştur.

Üreteçlerin reaktif güç limitlerinin de göz önüne alınması halinde, P-V eğrilerinde meydana gelen değişimler 6.29 ve 6.30 no' lu şekillerde verilmiştir.



Şekil 6.29 Üreteç reaktif güç limitleri dahil olduğunda 14 no' lu bara P-V eğrisi



Şekil 6.30 Üreteç reaktif güç limitleri dahil olduğunda 30 no' lu bara P-V eğrisi

Üreteçlerin reaktif güç limitlerinin dahil edildiği durumda, 14 ve 30 no' lu kritik yük baralarına ait P-V eğrilerinde meydana gelen değişimler 6.29 ve 6.30 no' lu şekillerde verilmiştir. Bu şekillerden, 14 ve 30 no' lu baraların kritik gerilim değerlerine sırasıyla, 1.385 pu ve 0.96 pu' luk yüklenme faktörlerinde geldiği gözükmektedir. 6.27, 6.28 ile 6.29 ve 6.30 no' lu şekilleri karşılaştırdığımızda, üreteç

reaktif güç limitlerinin göz önüne alınmasıyla, baraların kritik gerilim değerlerine çok daha çabuk ulaştığı ve gerilim çöküşünün, daha düşük yüklenme koşullarında, yani daha çabuk gerçekleştiği gözükmemektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bir elektrik güç sisteminin güvenli ve arzu edilir şekilde çalışmasını sağlamak için, sistemin tasarım ve işletim aşamasında, enerji sisteminin kararlılığının da göz önüne alınması gerekir. Elektriksel güç, ekonomik ve çevresel nedenler yüzünden uzun mesafelere iletildiği için, son yıllarda ilgi kazanan gerilim kararsızlığının başlıca sebebi olarak, sisteme yeterli reaktif gücün verilememesi gösterilebilir.

Elektrik enerji sistemlerinde reaktif güç kompanzasyon sistemleri; genellikle güç faktörünü düzeltmek, gerilim kararlılığı limitlerini iyileştirmek, sistem aktif güç kayıplarını azaltmak, sistem bara gerilimlerini iyileştirmek için sisteme yerleştirilirler. Bir elektrik enerji sisteminde en iyi reaktif güç kompanzasyonu, tüm yüklerin sisteme bağlı oldukları baralarda kompanse edilmesi ile yapılabilir. Bu işlem doğal olarak çok pahalı bir çözümdür ve dolayısı ile pratikte gerçekleştirilmesi zordur. Bu nedenle, elektrik enerji sisteminde bir reaktif güç kompanzasyonu düşünülüyorsa, sistemde her noktada kompanzasyon yapmak yerine, uygun yerler belirlenerek yalnızca bu noktalarda reaktif güç kompanzasyonu yapılmalıdır.

Bu çalışmada 14 ve 30 baralı iki örnek sistem üzerinde gerilim kararlılığının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. İlk önce, Bölüm 4' te incelenen gerilim kararlılık indisleri her iki örnek sistemin bütün yük baraları için hesaplanmıştır. Her iki sistem yük baraları için elde edilen indis değerlerine göre gerilim kararsızlığına yakınlık sıralamaları yapılmıştır. 14 ve 30 baralı sistemler için L-indislerine göre yapılan sıralamada sırasıyla; (5, 4, 14, 9) ve (30, 29, 6, 26) no' lu baralar, gerilim kararsızlığına en yakın baralar olmaktadır. Benzer şekilde 14 ve 30 baralı sistemler için indirgenmiş jakobien matrisi özdeğerlerine göre yapılan sıralamada sırasıyla; (11, 12, 13, 14) ve (30, 21, 5, 6) no' lu baralar gerilim kararsızlığına en yakın baralar olarak gözükmektedir.

Daha sonra, gerilim kararsızlığının iyileştirilmesinde yapılacak reaktif güç takviyesinin hangi baralara uygulanacağını belirlemek için, jakoben matrisi tersinin köşegen elemanları kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar 14 ve 30 baralı sistemler için sırasıyla (14, 10, 12, 11) ve (30, 29, 26, 6) no' lu baralar olmaktadır. Bu sonuçlardan da görülmektedir ki 14 ve 30 baralı sistemler için sırasıyla, 14 ve 30 no' lu baralar gerilim kararsızlığı açısından en kritik baralar olmaktadır.

Gerilim kararlılık indislerinin performanslarının karşılaştırılması amacıyla, belirlenen kritik baralarda, yükün arttırılmasına gidilmiş ve indislerin hangi güç değerlerine kadar dayanıp, sağlıklı sonuçlar verdiği incelenmiştir. Sonuçlardan, her iki sistem için de, jakoben matrisi özdeğerlerinin, L-indislerine oranla daha yüksek yüklenme derecelerine kadar dayanabildiği ve sağlıklı sonuçlar verebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yük artırımının gerçekleştirildiği baraların yakınında bulunan diğer baraların da gerilim kararsızlığına, uzak olan baralara oranla daha fazla yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Reaktif güç takviyesi yapılacak olan baraların ve bu baralara yakın diğer baraların, reaktif güç takviyesinin yapılmasının ardından, baralara ait gerilim kararlılık indislerinde önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Reaktif güç takviyesi yapılan baralara yakın baraların gerilim kararlılık indislerinde de gelişmeler meydana gelmiştir. Gerilim kararlılık indislerindeki bu gelişme beklenen bir sonuçtur.

Reaktif güç takviyesinin, sistemdeki yük baralarının gerilim profilleri üzerindeki etkisi her iki sistem üzerinde incelenmiş ve reaktif güç ilavesi yapılan baraların gerilim profillerindeki artış oranları en fazla olmuştur. Bu baralara yakın diğer yük baralarının gerilim profilleri, uzak olan baralara oranla daha fazla gelişmiştir.

Tez çalışmasındaki tüm sonuçlar, örnek sistemlerdeki üretç baralarının PV reaktif güç limitleri ihmal edilerek gerçekleştirilmiştir. Enerji sistemlerindeki üretç reaktif limitlerinin dahil edilmesi durumunda, baraların gerilim kararsızlığına çok daha çabuk sürüklendiği, indisler bazında görülmüştür. Üretç reaktif limitlerinin dahil edildiği ve edilmediği durumlarda, önceden belirlenen baralar için gerçekleştirilen sürekli yük akışı ile, limitlerin dahil edildiği durumda, baraların gerilim kararsızlığına çok daha düşük yüklenme koşullarında ulaştığı görülmüştür.

Tez çalışmasındaki tüm sonuçlar, sistemlerdeki üret   baralarının PV reaktif g   limitleri ihmal edilerek gerçekleştirildiği için, üreteçlerden bazıları limitlerine ulaştığında, incelenen gerilim kararlılığı indislerinin nasıl tepki vereceği tahmin edilememektedir. Üreteçlerin limitlerinin dahil edilmediği durum için elde edilen indis performansları ile limitlerin dahil edildiği durumdaki performansları arasında farklılıklar oluşacağı düşünülebilir.

Ayrıca   rete   limitlerinin dahil edildiği durumda, sistemlerdeki y  k baralarının gerilim kararsızlığına yakınlık sıralamaları da değişebilir.   rete   limitlerinin de göz önünde bulundurulduğu bir yaklaşım ile, indislerin performanslarının tekrar karşılaştırılması bir başka araştırma konusu olabilir.

ÖZGEÇMİŞ

Burak EĞRİDERELİ, 05.04.1979 tarihinde İstanbul’ da doğmuştur. İlk, orta, lise öğrenimini Tarhan Kolejinde 1997 yılında tamamlamıştır.

1998 yılında kazandığı Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü eğitimini 2002 yılında tamamlamıştır. 2002 yılında, İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Tesisleri Bölümü Yüksek Lisans programını kazanmıştır. 2002 yılında ders almaya başlamıştır.