

T.C
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİLİM KARARLILIĞI İÇİN DÜĞÜM
NOKTASI TEMELLİ YAKLAŞIM

Ahmet Turan HOCAOĞLU
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2003

T.C
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİLİM KARARLILIĞI İÇİN DÜĞÜM
NOKTASI TEMELLİ YAKLAŞIM

Ahmet Turan HOCAOĞLU
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç.Dr. E. Murat ESİN

GEBZE
2003

ÖZET

Son yıllarda artarak yaşanmakta olan gerilim çökmesi olayları bu arızanın mekanizmalarını ortaya koymayı amaçlayan çok sayıdaki çalışmaya temel sebep oluşturmaktadır. Bilinmektedir ki; yeni sistemler kurma konusunda yaşanan ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerinin çökmeye taşıyabilecek derecede yüklenmesine sebep olmaktadır.

Dolayısıyla güç sistem işleticilerinin günümüzdeki eğilimi çalıştırdıkları sistemin durumunu sürekli gözleyerek mevcut sistemi sınırlarına yakın değerlerde yüklemek yolundadır. Bunun için sistemin zaafiyetini gözlemek ve belirlemek için bir çok metot geliştirilmiştir. Bu metotlar genellikle sistemin gerilim çökmesi noktasına yakınlığı hakkında bilgi sunduğu gibi muhtemel bir arıza sonrası sistemin kararlı çalışma noktasına taşınması için alınması gereken tedbirler hakkında da fikir vermektedir. Bunların gerilim çökmesine yakınlık konusunda bilgi vermek konusunda başarıları bilinmekle beraber sistemin geneli hakkında çok ve detaylı verilere ihtiyaç duymaları yerel cihaz olarak kullanılmalarını engellemektedir.

Bu tezde güç sisteminin durumunu yerel olarak ölçülebilen verilerle belirlemeyi amaçlayan yeni bir sistem önerilmektedir. Bu metot gerilim ve güç gibi iki temel büyüklükteki değişimin incelenmesi esasına dayalıdır. Bu metodun uygulanabileceği bir cihaz geliştirilmiş ve jenerik bir güç sisteminde denenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki bu yeni araç şebekenin üst tarafına ait bir bilgiye ihtiyaç hissetmeden sistem durumunu belirleyebilmektedir.

SUMMARY

In recent years, accumulating number of the voltage collapse incidents, in electrical power systems, scattering all over the world, have been a major motivation for the studies to establish mechanisms of such system failures. It is a known fact that environmental and economical constrains force the existing systems to work in its limits by which, some instances, this led the system to the voltage collapse.

Therefore current trend in the industry is based on constantly monitoring the state of the system for utilisation on its operational edges. Consequently a number of techniques have been proposed to determine the susceptibility of the system. These techniques, mainly, provide information regarding the closeness of the voltage collapse and provide guidance for remedial actions to maintain or restore a stable operation after a contingency. These techniques proved to be useful to asses the proximity of the voltage collapse, however, necessity of detailed and continuous system information is the main hindrance of these techniques on implementation for local devices in the absence of such data.

In this thesis, in order to determine the state of the system from locally measurable data, a new technique has been proposed, which is based on the change of the system variables namely; voltage and power. Accordingly a novel device has been developed and tested in a generic power system. Results have shown that the new device is successfully determines the health of the system.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmama başladığım dönemde danışmanlığımı yürüten değerli hocam Doç. Dr. Ertuğrul KARAÇUHA'ya, ve Ertuğrul Bey'in Üniversiteden ayrılmasından sonra danışmanlık görevimi yürüten kıymetli hocam Doç. Dr. Murat ESİN'e, yine tezimle alakalı olarak bir müddet ikinci danışmanlık görevini yürüten ve çalışmalarda benden desteğini esirgemeyen hocam Prof. Dr. M.Ali YALÇIN'a, tez çalışmalarında her zaman yanımda olan ağabeyim Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na, bana her zaman destek olan eşim Feyza HOCAOĞLU'na ve bu çalışmam sırasında ilgilenemediğim çocuklarıma bana yardımcı olan bölümümüz araştırma görevlisi Özgür KARACASU'ya Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne doktora çalışmamaimkan sağlayan iş yerim Türk Standardları Enstitüsü'ne ve diğer tüm yardımcı olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 KONUSUN ÖNEMİ	1
1.2 KONUSU HAKKINDA	2
1.3 TEZİN AMACI VE KAPSAMI	5
1.4 TEZİN DÜZENİ	6
1.5 TEZİN BÖLÜMLERİ	6
2. GERİLİM KARARLILIĞI	8
2.1 GİRİŞ	8
2.2 GERİLİM KARARLILIĞI, GERİLİM ÇÖKÜŞÜ VE GERİLİM EMNİYETİ	9
2.2.1 Tanımlamalar	10
2.3 GERİLİM KARARSIZLIĞI İÇİN ZAMAN ARALIĞI VE MEKANİZMALAR	12
2.3.1 Mekanizmalar-senaryolar	12
2.3.2 Senaryo 1: Transient (geçici) gerilim kararlılığı	12
2.3.3 Senaryo 2: Uzun süreli gerilim kararlılığı	14
2.3.4 Senaryo 3: Uzun süreli gerilim kararsızlığı	15
2.3.5 Yük dinamiği	16
2.4 ROTOR AÇISI KARARLILIĞI İLE GERİLİM KARARLILIĞININ İLİŞKİSİ	17
2.5 GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: LİAPUNOV FONKSİYONLARI	19
2.5.1 Analiz 1: Jeneratör Rotor Açısı $\delta_m=0.8$ rad., Sistemin Frekansı $w=1$ p.u	20
2.5.2 Analiz 2: Jeneratör Rotor Açısı $\delta_m=1.6$ rad., Sistemin Frekansı $w=1$ p.u	22
2.6 GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: P-V EĞRİLERİ	23
2.7 GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: V-Q EĞRİLERİ	25
2.8 UZUN DÖNEM GERİLİM KARARLILIĞININ GRAFİKSEL AÇIKLAMASI	28
2.8.1 Aircondition yükler $\alpha=0.50$ ve $\beta=2.5$ durumu	31
2.8.2 Ocak Fanları $\alpha=0.08$ ve $\beta=1.6$ durumu	33
2.8.3 Batarya Şarj Aletleri $\alpha=2.59$ ve $\beta=4.06$ durumu;	33
2.8.4 Elektronik Florasanlar $\alpha=0.95$ ve $\beta=0.31$ durumu;	34
2.8.5 Normal Florasanlar $\alpha=2.07$ ve $\beta=3.21$ durumu;	35
2.8.6 MSC ve OLTC'lerin devreye eklenmesi ve çıkarılmasının etkisi	36
2.9 SONUÇ	38
3. P-V VE Q-V EĞRİLER	40
3.1 GİRİŞ	40
3.2 FARKLI GERİLİM HASSASİYETLİ YÜKLER İÇİN P-V VE Q-V EĞRİLERİ	46
3.3 ÇEŞİTLİ CİHAZLARIN ETKİLERİNİ GÖSTERMEK İÇİN EĞRİLERİN KULLANILMASI	51
3.4 SONUÇ	65
4. SİSTEM DURUMUNUN YEREL ÖLÇÜMLER İLE TAHMİNİ İÇİN METOTLAR	66
4.1 GİRİŞ	66
4.2 $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRÜ	68
4.3 $\Delta V/\Delta Q$ İNDEKSİNE FARKLI BİR YAKLAŞIM	72
4.4 $\Delta V/\Delta P$ VE $\Delta V/\Delta Q$ İNDEKSLERİ	74
4.5 SONUÇ	81
5. UYGULAMA	82

5.1	GİRİŞ	82
5.2	SONUÇ	90
6.	SONUÇ	92
6.1	SOUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA	92
6.2	İLERİ ÇALIŞMA ÖNERİLERİ	93
	KAYNAKLAR	95
	ÖZGEÇMİŞ	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2-1: GÜNEY FLORİDADAKİ GENEL GERİLİM ÇÖKMEŞİ İÇİN GERİLİM VE FREKANS EGRİSİ (17 MAYIS 1985)	
□	14
2-2: GERİLİM HASSASİYETLİ YÜKLERİN RESTORASYONU İÇİN 3 MEKANİZMA [40]	17
2-3: UÇ DURUMLARI GÖSTEREN BASİT ÖRNEKLER.	18
2-4: TEK MAKİNA VE SONSUZ BARA SİSTEMİ	20
2-5: GÜÇ SİSTEMİNİN İKİ BOYUTLU ENERJİ GÖSTERİLİMİ: $\delta_m=0.8$ RAD. VE $w=1$ P.U.	22
2-6: GÜÇ SİSTEMİNİN ENERJİSİNİN İKİ BOYUTLU GÖSTERİLİMİ: $\delta_m=1.6$ RAD. VE $w=1$ P.U.	23
2-7: DİRENÇ YÜKLER VE REAKTANS ŞEBEKELER İÇİN GERİLİM, AKIM VE GÜCÜN İLİŞKİLERİ. $I_{KD}=E/X$ KISA DEVRE AKIMI. $P_{MAX}=0.5$, $V_{KRİT}=0.707$	24
2-8: SABİT KAYNAK (SONSUZ BARA) VE REAKTANS ŞEBEKELERİ İÇİN P-V EĞRİLERİ.	25
2-9: SABİT KAYNAK (SONSUZ BARA) VE REAKTANS ŞEBEKELERİ İÇİN NORMALİZE EDİLMİŞ V-Q EĞRİLERİ □. YÜKLER SABİT GÜÇTÜR.	26
2-10: REAKTİF GÜÇ MİKTARI.	27
2-11: REAKTİF GÜÇ MİKTARI.	28
2-12: ÖRNEK MODEL.	29
2-13: $A=0.50$ VE $B=2.5$ YÜK DURUMU İÇİN SİSTEM VE YÜK KARAKTERİSTİKLERİ. YÜK KARAKTERİSTİĞİ: $P_{YÜK}=NP_1V^{0.50}$ BAŞLANGIÇ KOŞULLARI GERİLİM İÇİN 1.05P.U. VE GÜÇ İÇİN 0.6 P.U. ALINMIŞTIR. YÜK EĞRİSİ “A” $N=1$ İÇİN, “B” $N=1.4$ İÇİN.	32
2-14: $A=0.08$ VE $B=1.6$ YÜKÜ İÇİN SİSTEM VE YÜK KARAKTERİSTİKLERİ. YÜK KARAKTERİSTİĞİ: $P_{YÜK}=NP_1V^{0.08}$. YÜK EĞRİSİ “A” $N=1$ İÇİN, “B” $N=1.4$ İÇİN.	33
2-15: $A=2.59$ VE $B=4.06$ YÜKÜ İÇİN SİSTEM VE YÜK KARAKTERİSTİKLERİ. YÜK KARAKTERİSTİĞİ: $P_{YÜK}=NP_1V^{2.59}$. YÜK EĞRİSİ “A” $N=1$ İÇİN, “B” $N=1.4$ İÇİN.	34
2-16: $A=0.95$ VE $B=0.31$ YÜKÜ İÇİN SİSTEM VE YÜK KARAKTERİSTİKLERİ. YÜK KARAKTERİSTİĞİ: $P_{YÜK}=NP_1V^{0.95}$. YÜK EĞRİSİ “A” $N=1$ İÇİN, “B” $N=1.4$ İÇİN.	35
2-17: $A=2.07$ VE $B=3.21$ YÜKÜ İÇİN SİSTEM VE YÜK KARAKTERİSTİKLERİ. YÜK KARAKTERİSTİĞİ: $P_{YÜK}=NP_1V^{2.07}$. YÜK EĞRİSİ “A” $N=1$ İÇİN, “B” $N=1.4$ İÇİN.	36
2-18: YÜKSEK GERİLİM HASSASİYETLİ YÜKLER İLE P-V EGRİSİNİN ALT KISMINDA KAPASİTÖR GRUBUNUN EKLENMESİNİN ETKİSİ.	37
2-19: SİSTEME OLTC EKLENMESİNİN ETKİSİNİ GÖSTERİR SİSTEM EĞRİLERİ.	37
2-20: FARKLI HAT REAKTANSLARI İÇİN P-V EĞRİLER.	38
3-1: RADYAL ŞEBEKE	40
3-2: FARKLI YÜK GÜÇ FAKTÖRLERİ İÇİN P-V EĞRİLERE ÖRNEKLER	42
3-3: FARKLI YÜK GÜÇ FAKTÖRLERİ İÇİN Q-V EĞRİLERE ÖRNEKLER	43
3-4: HAT REAKTANSININ FARKLI DEĞERLERİ VE YÜK GÜÇ FAKTÖRÜ=0.9 İÇİN P-V EĞRİLERİ A, B; FARKLI EMPEDANS DEĞERLERİ İÇİN YÜK KARAKTERİSTİKLERİ	45
3-5: HAT REAKTANSININ FARKLI DEĞERLERİ VE YÜK GÜÇ FAKTÖRÜ=0.9 İÇİN Q-V EĞRİLERİ A, B; FARKLI EMPEDANS DEĞERLERİ İÇİN YÜK KARAKTERİSTİKLERİ	45
3-6: FARKLI GERİLİM VE GÜÇ HASSASİYETLERİ İÇİN P-V EĞRİLER $A=1.2$.	48
3-7: FARKLI GERİLİM VE GÜÇ HASSASİYETLERİ İÇİN Q-V EĞRİLER $B=3$ İÇİN.	49
3-8: FARKLI GERİLİM-YÜK HASSASİYETLİ A VE B YÜKLER İÇİN P-V VE Q-V EĞRİLERİ ELDE ETMEKTE KULLANILAN RUTİNİN AKIŞ DİYAGRAMI.	50
3-9: BÖLGESEL GERİLİM REGÜLATÖRLÜ BİR RADYAL GÜÇ SİSTEMİNE VE YÜK DÜĞÜMÜ L'DEN GÖRÜLEN THEVENİN EŞDEĞERİNE ÖRNEK.	51
3-10: SABİT EMPEDANS YÜKLER İÇİN P-V EĞRİLER; MSC VE OLTC ADIMLARI İLE BİRLİKTE GÖSTERİMİ.	53
3-11: SABİT EMPEDANS YÜKLER İÇİN Q-V EĞRİLER; MSC VE OLTC ADIMLARI İLE BİRLİKTE GÖSTERİMİ.	54
3-12: ŞEKİL 3-10'DA VERİLEN EĞRİDEKİ MSC VE OLTC ADIMLARININ DETAYLI GÖSTERİMİ	55
3-13: ŞEKİL 3-11'DE VERİLEN EĞRİDEKİ MSC VE OLTC ADIMLARININ DETAYLI GÖSTERİMİ	56
3-16: YÜK A İÇİN P-V DÜZLEMDE DİNAMİK YOL.	60
3-17: YÜK A İÇİN Q-V DÜZLEMDE DİNAMİK YOL.	61
3-18: YÜK B İÇİN P-V DÜZLEMDE DİNAMİK YOL.	61
3-19: YÜK B İÇİN Q-V DÜZLEMDE DİNAMİK YOL.	62

3-20: JENERATÖR REAKTİF GÜCÜ EKLENMİŞ FARKLI YÜK GERİLİMİ-GÜÇ HASSASİYETLİ VE YÜK B İÇİN EĞRİLER.	64
3-21: JENERATÖR REAKTİF GÜCÜ EKLENMİŞ FARKLI YÜK GERİLİMİ-GÜÇ HASSASİYETLİ VE YÜK B İÇİN EĞRİLER.	64
4-1: YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$. SABİT EMPEDANS YÜK İÇİN.	69
4-2: YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$. FARKLI GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLİ YÜK İÇİN.	70
4-3: ŞEKİL 4-1'DE GÖRÜLEN GRAFİĞİN İNDEKSLERİ ARASINDAKİ FARKI GÖSTERİR.	71
4-4: YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$. SABİT EMPEDANS YÜK İÇİN.	72
4-5: YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$. FARKLI GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLİ YÜK İÇİN.	73
4-6: YÜK UCUNA KAPASİTANS EKLEMENİN ETKİSİ.	74
4-7: YÜKTEN ÇEKİLEN GÜÇLERDEKİ KAPASİTİF TESTER EKLENMESİNİN ETKİSİ. P-V DÜZLEM.	75
4-8: YÜKTEN ÇEKİLEN GÜÇLERDEKİ KAPASİTİF TESTER EKLENMESİNİN ETKİSİ. Q-V DÜZLEM.	76
4-9: SABİT EMPEDANS YÜK İÇİN VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta P$ İNDİKATÖRLERİ (A=2, B=2).	77
4-10: SABİT EMPEDANS YÜK İÇİN VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=2, B=2).	78
4-11: FARKLI GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta P$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	79
4-12: FARKLI GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	79
4-13: SİSTEM VE YÜKÜN KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNDE TESTER EKLEMENİN ETKİLERİ P-V DÜZLEM.	80
4-14: SİSTEM VE YÜKÜN KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNDE TESTER EKLEMENİN ETKİLERİ Q-V DÜZLEM.	80
5-1: TESTER KONFIGURASYONU.	82
5-2: TESTER REAKTANS MODÜLASYONU	83
5-3: SABİT EMPEDANS YÜKLER İÇİN P-V EĞRİLER; MSC VE OLTC ADIMLARI İLE BİRLİKTE GÖSTERİMİ.	84
5-4: SABİT EMPEDANS YÜKLER İÇİN Q-V EĞRİLER; MSC VE OLTC ADIMLARI İLE BİRLİKTE GÖSTERİMİ.	84
5-5: SABİT EMPEDANS YÜK VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta P$ İNDİKATÖRLERİ (A=2, B=2).	85
5-6: SABİT EMPEDANS YÜK VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=2, B=2).	86
5-7: FARKLI YÜK GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK A İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	87
5-8: FARKLI YÜK GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	87
5-9: FARKLI YÜK GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK A VE B İÇİN $\Delta V/\Delta P$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	88
5-10: JENERATÖR REAKTANSI GÖZ ÖNÜNE ALINARAK FARKLI YÜK GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK B İÇİN $\Delta V/\Delta P$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	89
5-11: JENERATÖR REAKTANSI GÖZ ÖNÜNE ALINARAK FARKLI YÜK GÜÇ-GERİLİM HASSASİYETLERİ VE YÜK B İÇİN $\Delta V/\Delta Q$ İNDİKATÖRLERİ (A=1.2, B=3).	89

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2-1: GERİLİM KARARLILIĞI OLAYLARI VE ZAMAN CEVAPLARI.	12
2-2: FARKLI YÜK KARAKTERİSTİKLERİ İÇİN A VE B KATSAYILARININ ALMIŞ OLDUĞU DEĞERLER [30].	31

1. GİRİŞ

1.1 Konunun Önemi

İnsanoğlu'nun araştırmacılığı ve daha iyiye ulaşma isteğinden dolayı teknolojiye çok hızlı gelişmeler elde edilmektedir. Bu gelişmeler ortaya daha fazla iş çıkarmakta ve daha fazla iş daha fazla enerjiye gereksinim duymaktadır. Böylece çağımızın en pratik ve en çok kullanılan enerjisi olan elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç da her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple, mevcut olan elektrik enerjisi üretimi ve ihtiyaç noktalarına iletimi için gerekli olan iletim hatlarının her geçen gün geliştirilip büyütülmesi gerekmektedir.

Elektrik enerjisine olan talebin doğru bir aralıkta hassas bir şekilde önceden belirlenebilmesi sadece üretimin planlanması için değil mevcut iletim ve dağıtım sistemlerinin genişletilmesi ve büyütülmesi için de elzemdir [1]. Yine benzer şekilde mevcut yüklerin günlük, haftalık, aylık ve mevsimlik değişimlerinin önceden belirlenmesi sistemlerin işletilmesi için önem taşımakla beraber, bu talebin karakteristiğinin belirlenmesi de gereklidir [2, 3]. Güç sistemlerinin talebini karşılamak için büyümesi, beraberinde bir çok problemi de gündeme getirmektedir. Sistemin başarılı bir şekilde işletilmesi için sadece planlama değil olağan üstü durumlarda nasıl davranacağı da incelenmelidir [4]. Bu çalışmaların, sistemin ucuz olarak büyütülmesi ve aynı zamanda gerekli emniyet kriterlerini tatmin etmesi şarttır. Dolayısıyla yapılacak çalışmalar elden geldiğince iyi ve doğru modellere dayanmalı ve sistemin tüm önemli unsurlarını benzetebilmelidir. Doğru ve hassas modeller ekonomik ve emniyetli işleyen sistemler oluşturulması için fırsat sağlasa da getirdiği hesaplama yükü ve data ihtiyacı bu modellerin mühendislik uygulamaları için uygunluğunu tartışılır kılmaktadır. Özellikle son yıllarda sistemlerin özelleştirilmesi ve özerkleştirilmesi sistem simülasyonu için ihtiyaç duyulan bu dataların önemli bir kısmının “ticari sır” kapsamına girmesine neden olmuştur. Bu durum sistem planlaması ve işletilmesi ile uğraşan birimleri yeni hesaplama araçları ve sistem durumu belirleme cihazları geliştirilmesi yolunda çalışmalara yöneltmektedir. Bu çalışmada büyük bir sistemde yer alan bir düğüm noktasının gerilim kararlılığı analizleri için yeteri kadar hassas ve az dataya ihtiyaç duyan bir metot geliştirilmiştir.

İleride de bahsedileceği gibi geleneksel olarak bu analizleri yapmak için sistem karakteristiklerine ve sistemin yeterince detaylı bir şekilde modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada büyük bir güç sisteminde, belirlenen bir düğüm noktası için sistem karakteristiklerine ihtiyaç duyulmadan sistem çalışma noktasının kritik noktaya yakınlığının belirlenmesi konusu incelenmiştir.

1.2 Konu Hakkında

Son yirmi yılda, elektrik güç sistemlerindeki gerilim kararlılığı problemine çokça ilgi duyulmuştur. Bu zaman aralığında tüm dünyada meydana gelen gerilim çökmelerinin arkasındaki mekanizmanın anlaşılması için ilk olarak gerilim kararlılığı problemi tarif edilmiş ve incelenmiştir [5]. Kritik şartlara yakın olan iletim hatlarındaki kapasitenin daha fazla kullanılmasını sağlayabilmek için bu alana çokça ilgi gösterilmiş, bundan dolayı daha da iyi bir monitörleme sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçların karşılanması için üniversitedeki araştırmacılar gibi sanayideki mühendisler de, gerilim çökmesinin sınır değerlerinin belirlenmesi ve sistemin dayanıklılığını belirleyen tekniklerin geliştirilmesi için çok efor sarf etmişlerdir [6, 7, 8, 9, 10]. Arıza sonrasında, kararlı çalışma şartlarının tekrar sağlanması için bazı teknikler faydalı olmuştur. Bunlar genellikle nümerik tekniklerdir ve yük akışının sonuçlarıyla ilgili bazı analizler ile ilgilenmişlerdir [11, 12]. Aslında bazı olumlu sonuçlara rağmen, bu metotların uygulanmasındaki zorluklar ve hesaplama tekniklerinin ortaya koyduğu sınırlamalar, en önemlisi sistem operatörlerinin hızlı karar verebilen bir araca olan ihtiyaçları bu yük akışı temelli tekniklerin bir uzantısı olan Jacobian matris sistemiyle gerilim çökmesinin nasıl hesaplanabileceğinin belirlenmesi çalışmalarını ortaya koymuştur [13, 14]. Hızlı karar vermeyi sağlayan gerilim kararlılığı belirleme yöntemlerinden en önemlileri; iki elektriksel miktarın oranı olan gerilim çökmesine yakınlık indikatörü ile hassasiyet sabitleri üzerinde olmuştur [15, 16]. Gerilim Çökmesine yakınlık indikatörü jeneratör ve yük reaktif gücündeki değişmelerle ilgilidir ve sistemin azami güç transfer noktasına yaklaştığında çok yüksek olur.

Konu ile ilgili olarak geliştirilen yeni tekniklerden önemli bir kısmı da yapay zeka uygulamaları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda bir çok mühendislik alanında yaygın bir kullanım alanı bulan yapay zeka uygulamaları gerilim kararlılığı

sahasına da uygulanmıştır. Daha ziyade karar verme ihtiyacı duyulan uygulamalarda bilhassa yapay sinir ağları tekniğinin yaygın bir kullanım sahası bulunduğu görülmektedir. Ancak eğitim ve test için çok geniş örnek ve veriye ihtiyaç duyan bu metodun en önemli dezavantajı ihtiyaç duyduğu geniş bellek ve hesaplama yoğunluğudur. Akıllı röle ve monitoring sistemlerinin yaygınlaşması ile kendine daha geniş bir kullanım alanı sağlaması beklenmektedir [17, 18]. Bir başka çalışmada da uzman sistemler kullanılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Görüntü tanıma tekniklerinin kullanıldığı bu çalışma daha ziyade yük tevzi merkezlerinde kullanılmaya müsait bir karakter arz etmektedir. Her muhtemel durum ve senaryo için sistemin gerilim kararsızlığına olan mesafesi klasik teknikler kullanılarak belirleme ve çözüm için tevzi merkezi çalışanlarına mesaj verme esasına dayanmaktadır [19]. Neuro-Fuzzy ağlar kullanılarak kararlılık değerlendirmesi yapılan bir çalışma [20]'de incelenmiştir. Gerilim kararlılığına bu tür yapay zeka teknikleri ile çözüm getirme yaklaşımlarının toplu halde incelendiği yakın tarihli özet niteliğinde bir çalışma da [21]'de verilmiştir.

Yukarıda sıralanan metotlar genellikle sistemin izlenmesi ile ilgilidir. Fakat, sadece kontrol merkezlerinde mümkün olan şebeke bilgilerine ve çok geniş hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duyduğu için bu sistemlerin sadece merkezi uygulamalar için uygun olduğu görülmektedir.

Yine sistemin kararlılık analizleri için geliştirilen bir başka metot ise sistemin depolanan enerjisi üzerine yapılan yaklaşımlardır. Bu metotlar ile sistemde bulunan transformatörler, kondansatörler ve diğer devre elemanlarının sistemin kararlılığına yaptığı etkinin incelenmesi ile gerçekleşmektedir. Özellikle son yıllarda Liapunov fonksiyonları kullanılarak sistemin depolanan enerjisi üzerine kararlılık analizi çalışmaları da yapılmaktadır. Bu konu ikinci bölümde daha ayrıntılı olarak incelenmiştir [22, 23].

Sistemin kritik şartlara yakın çalışıp çalışmadığını anlamak için diğer bir yaklaşım ise, bölgesel hassasiyet değerlerini belirlemektir (bölgeselin buradaki anlamı sistemin küçük bir kısmında ölçülen değerlerdir). Bölgesel değerlerin elde edilmesinde kullanılan daha önceden bahis edilen metodu burada hatırlatmak faydalıdır fakat bu durumda tüm sistemin analizinden başlanmalıdır. Bu çalışmada önerilen teknik ile büyük bir sistemin parçası olan belirli bir düğüm noktasında büyük sistemin bilgilerine sahip olmadan sistemin durumu hakkında bilgi edinmeyi

sağlayan bir metot geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu özellik, yabancı bir sistemden enerji alındığı ve dolayısı ile bu sistem hakkında yeterli bilgiye sahip olunmadığı zaman faydalı olacaktır. Özellikle son zamanlarda ülkemizde de enerji üretim, iletim ve dağıtımının özelleştirilmeye başlanması ile farklı dağıtım ve üretim şirket sahipleri ile karşılaşılacaktır, bu durumda böyle bir metot ile yetersiz sistem bilgisi ile sistemin gerilim kararlılığı noktasına yakınlığını bilmek daha fazla önem kazanmaya başlayacaktır. Bu tür bir çalışmayı içeren ve sistemin sürekli monitör edilmesi ile sistemin görülen empedansı ile Thevenin empedansını oranlayarak gerilim kararlılığı hakkında bilgi elde etmeyi sağlayan bir çalışma [24]'de verilmiştir. Yine benzer şekilde çalışan ve Amerikan ve Avrupa patent bürolarından patenti alınan çalışmalarda bulunmaktadır [25, 26, 27].

Bu ihtiyaç sebebi ile geliştirilen ve klasik alçak gerilim rölelerinin yerine ikame edilme hedefi taşıyan bu röleler, sistemi sürekli izlemeye ve elde edilen istatistiksel verinin analizine dayanan bu çalışma, sistemin kritik noktaya yakınlığı hakkında karar vermekte gerekli verileri elde etmek için zamana ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Amaç, sistemdeki yük ve bölgesel gerilim regülatörlerinin adım eklemelerinden kaynaklanan değişikliklerin yerel değerler üzerindeki etkilerini yorumlamaktır ki bunların başlıcaları gerilim ve güçtür. Dolayısıyla konunun güncelliğini göstermek bakımından önem arz etmektedir.

Bahsi geçen çalışmalar bu tezde sunumu yapılan metodun anlaşılması için özel bir önem taşımaktadır. ABB firması tarafından gerçekleştirilen ve patentlenen bu çalışma, gerilim çökmesine karşı yaygın bir tedbir olarak kullanılan klasik alçak gerilim rölelerinin kifayetsizliğini göstermesi bakımından önemlidir. Bilinmektedir ki klasik alçak gerilim röleleri set değerinden daha alçak bir değere ulaştığında önce tap-changerları ve MSC leri harekete geçirmekte, şayet sistem kendini toparlayamaz ise yük karartma işlemlerine başlamaktadır. Ancak saha tecrübeleri göstermektedir ki; şayet sistem kritik bölgede çalışıyor ise yük karartma da dahil olmak üzere bir çok çözüm yetersiz kalmakta hatta sistemi çökmeye götürebilmektedir. Özellikle karmaşıklaşan yük tabiatı yük karartmadan sonra sistem restorasyonunu çok güç kılmaktadır.

Pratikte bir çok sistemdeki buna ülkemizin şebekesi de kısmen dahildir, özellikle OLTC'ler zaman bloke edilmektedir. Bu işlem sistemin çökmeden korunması için saha mühendislerinin tecrübe ile bulduğu faydalı bir yöntem olmakla

beraber çok büyük maliyetler getiren bu cihazların verimli kullanılmamasına yol açmaktadır.

Eğer bir sistemde mevcut olan MSC veya OLTC gibi sistem elemanlarının devreye girmesi ile sistemin nasıl davranacağı kestirilemez ise bu elemanların devreye girmesi sistemi çöküşe götürebileceği çok iyi bilinmektedir [28]. Transformatörlerin tap- changerlarının etkisi ile statik VAR kompensatörlerin gerilim kararlılığına etkisini inceleyen çalışmalarda bu durum analiz edilmiş ve ölçüsüz kullanımın doğuracağı sıkıntılar vurgulanmıştır [29].

1.3 Tezin Amacı Ve Kapsamı

Bu çalışmada gerilim kararlılığı analizi için farklı bir metot geliştirilmeye çalışılacaktır. Güç sistemlerinin devreye alınmasında ve sürekliliğinin sıhhatli bir şekilde devamını sağlamak için gerilim kararlılığının önemi bilinmekle birlikte her zaman bu analizleri sıhhatli bir şekilde yapmakta güçlük çekilmektedir. Olağanüstü durumlara karşı güç sistemlerinde mevcut bulunan MSC ve OLTC'lerin sistem karakteristiğini nasıl etkilediği bu çalışmada incelenecektir. Özellikle bu devre elemanlarının sistem içerisinde nasıl davranacakları sorusunun cevabı kararlılık açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sebep ile bu elemanların mevcut sistemde nasıl bir tavır sergiledikleri incelenecek ve özellikle hangi durumlarda bu elemanların devreye alınıp alınmayacağı konusuna güç sistem operatörlerine fikir vermesini sağlamak için bazı çalışmalar yapılacaktır.

Güç sistemlerinin kararlılığı hakkında mevcut metotlarla karar verebilmek için gerekli olan verileri toplamak da ayrı bir problem olmaktadır. İşte bu sıkıntılı durumda sistem hakkında yeteri kadar bilgi edinilmeden sistemin kararlılığı hakkında nasıl fikir edinilebileceği araştırılacaktır. Tezin sonunda büyük bir sistemde yer alan bölgesel bir yükün elde edilen sınırlı bilgileri ile çeşitli senaryolar göz önüne alınarak kararlılık analizini yapabilecek bir cihaz geliştirerek örnek bir sistem üzerinde uygulaması yapılacaktır. Gerilim kararlılığı dinamik bir olay olmasına rağmen uzun dönem kararlılığını incelemek için kalıcı hal analizleri yeterlidir. Bu tezde kalıcı hal analizleri kullanılacak ancak yük dinamiği hesaba katılacaktır.

1.4 Tezin Düzeni

Bölümlerde yer alan simge ve kısaltmaların açıklamaları ilgili yerlerde verildiği için simgeler ve kısaltmalar dizini teze ayrıca eklenmemiştir. Kullanılan bazı kısaltmalar aşağıda verilmiştir;

MSC (Mechanically Switched Capacitor) Mekanik anahtarlama kompanzasyon.

OLTC (On Load Tap Changer), Yük altında ayarlı trafolar.

SVC (Statik VAR Compensator) Statik VAR kompanzasyon.

Blackout Tam gerilim çökmesi.

Brownout Kısmi gerilim çökmesi.

1.5 Tezin Bölümleri

Gerilim kararlılığı ile ilgili detaylı bilgilerin verildiği ikinci bölümde; kararlılık çeşitleri, Steady-state (kalıcı) ve transient (geçici) gerilim kararlılıkları incelenmiştir. Yine aynı bölümde rotor açısı kararlılığı ve gerilim kararlılığının arasındaki fark izah edilmiştir. Gerilim kararlılığı analizleri için geliştirilen çeşitli metotlar da bu bölümde incelenen konular arasındadır.

Gerilim kararlılığı analizinde kullanılan metotlardan olan ve geniş olarak arıza ve bölgesel hareketlerin açıklanmasında kullanılan P-V ve Q-V eğrileri bu çalışmanın üçüncü bölümünde incelenmiştir. Bu eğriler statik çalışmalardan elde edilse bile, dinamik olayların analizi için de faydalıdır. Daha ayrıntılı bir çalışma için uygun modellemeli dinamik simülasyonun, sistemin dinamik etkilerinin tam bir örneklenmesi için uygulanması ile mümkün olabilir.

Dördüncü bölümde yapılan çalışmada, bu çalışmanın esasını teşkil eden ve büyük bir sistemin karakteristiklerini bilmeden sistemin kararlılığı hakkında bilgi verecek muhtelif indisler incelenmiş ve çalışmanın temelini teşkil edecek olan bu indislerin nasıl olması gerektiği araştırılmıştır.

Bu çalışmanın beşinci bölümü, tester denen küçük bir kontrol yükünün kullanılması ve kontrol edilen düğümdeki kapasitans test yükünün eklenmesiyle elde

edilen bölgesel indekslerin tanımlanmasıyla ilgilidir. Ayrıca burada gerilimdeki bölgesel OLTC hareketlerinin etkisi de hesaba katılmıştır. Bu çalışmanın amacı bu indekslerden elde edilen bilgilerden sistemin durumunu ve OLTC, MSC gibi bölgesel elemanlar için bir kontrol bilgisi olarak nasıl kullanılabilirliği ve yükün devreden çıkarılması için gerekli bilgiyi elde etmek yolunda yorumlar yapmanın nasıl mümkün olabileceği üzerinedir.

2. GERİLİM KARARLILIĞI

2.1 Giriş

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin tüm baralarda normal şartlarda ve herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra da kabul edilebilir gerilimleri koruyabilme kabiliyetidir [30]. Gerilim kararlılığını değerlendirmek güç sistemlerinin büyümesinden dolayı daha karmaşık hale gelmiştir. Mesela, aşırı yüklü ve aşırı kompanze edilmiş sistemlerde bile sadece gerilimlerin genliği, bir gerilim çökmesi noktasına yakınlığı belli etmezler [31].

Daha önceki yıllarda bütün dünyada, genellikle gerilim çökmeleriyle kendini gösteren güç sistem blackoutlarına mukabil son yıllarda cihaz teknolojisindeki gelişmeler ve daha büyük güç sistemleri dolayısıyla transient açılı kararlılığı enerji naklinde nadiren bir sınırlama sebebi olmaktadır.

Çevresel baskılar iletim ağının genişlemesine sebep olmakta ve yük merkezleri yakınında üretimi sınırlamaktadır. Bu da üreteçten yüke elektriksel mesafenin artması sebebiyle yük sahasında gerilim desteğinin zayıflamasına yol açmaktadır. Bu durum güç sistemi gerilim kararlılığına olumsuz etki etmektedir. Günümüzde üretim, genellikle büyük yüklere uygun mesafelerde az sayıda ve büyük kapasiteli ünitelerle yapılmaktadır. Elektrik enerjisi kullanımının iletim kapasitesinde mukabil artış sağlanmadan artması, birçok güç sistemini gerilim kararlılığının sınırlarına yaklaştırmıştır.

Güç sistemi emniyeti veya kararlılığı sebebiyle enerji naklinde kısıtlamaya nadiren ihtiyaç duyulsa da, iletim ağının bir kısmının yeniden inşasına veya çalışma şeklinin değiştirilmesine ihtiyaç vardır. Geçmiş yıllarda güç sisteminin merkezi olarak planlanıp çalıştırılması, koordineli bir şekilde gelişmesini sağlamıştır. Entegre bir güç sistemi için geliştirilmiş iletim ağı bugünün deregulated ortamı için optimal bir çözüm olmayabilir. Mesela pazar şartlarına göre enerji üretimindeki değişiklikler iletim ağındaki darboğazları değiştirebilir ve bu yolla enerji ticaretini sınırlandırabilir. Bu da iletim ağının esnek planlanmasının önemini ortaya çıkarmaktadır.

Güç sistemlerindeki arızalar neticesinde ortaya çıkan kısmi (Brownout) veya tam (Blackout) gerilim çökmelerinin çok büyük mali yükler getireceği bilinmektedir.

Mesela; Finlandiya'daki blackoutların doğrudan ekonomik neticelerinin birkaç yüz milyon Fin Markına mal olduğu tahmin edilmektedir [32]. 1994'de İsveç güç sistemi üzerinde bir arıza maliyeti çalışması yapılmıştır [32]. Kesintilerin İsveç ekonomisine maliyetinin bir tahmini aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır,

$$10 \text{ SEK/kW} + 24\text{SEK /kWh}.$$

Mesela 10.000 MW 'lık bir yükün 1 saat devre dışı kalmasının maliyeti 340 MSEK¹'dir. Kesintinin doğrudan maliyeti; üretim kaybı, zayi olan hammadde, arızalanan cihazlar, üretimsiz periyotlar için ödenen ücretler ve gelir kayıpları iken, dolaylı kayıplar; ürün teslimindeki gecikme sebebiyle, gelecek siparişlerin kaybı, sigorta maliyetleri ve takviye güç kaynakları maliyetleridir.

Bu kesintilerin maliyetleri ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Kesintilerin maliyeti sektörden sektöre değişmekte olup çalışmalar çok farklı rakamlar vermektedir [33]. Genellikle maliyet söz konusu olduğunda her bir durum ve sektörün birbirinden bağımsız olarak incelenmesi tavsiye edilmektedir [34].

Bu bölümde; kararlılık kavramı (voltage stability) incelenecek, bazı tanımlamalar yapılacak, gerilim kararsızlığının (voltage instability) mekanizmaları ve bunun rotor açısı kararlılığı ile ilişkisi tanımlanacaktır. Daha sonra güç sistemlerinde gerilim kararlılığı probleminin nedenleri tartışılacak ve statik gerilim kararlılığı analizlerinde kullanılan P-V ve Q-V eğrilerinin analizlerine girişten sonra yük modellerinden bahsedilerek bölüm bitirilecektir.

2.2 Gerilim Kararlılığı, Gerilim Çöküşü Ve Gerilim

Emniyeti

Gerilim kararlılığı konusu, bir çok güç sistem olayını içine alır. Çünkü gerilim kararlılığı güç sistemlerinin farklı sahaları için farklı anlamlara sahiptir. Mesela; gerilim kararlılığı asenkron ve senkron motorlar içeren, aircondition yükler veya HVDC (Yüksek gerilim doğru akım) bağlantılar içeren sistemler için incelendiğinde hızlı bir olaydır. Diğer çalışmalar için ise genellikle yavaş bir olay olarak sınıflandırılır (örneğin mekanik ayarlı trafo (tap changer) içeren yüklerde).

¹ 1 Euro=8.33 SEK, SEK; İsveç Kronu

Literatürde gerilim kararlılığını hem statik hem de dinamik bir olay olarak analiz edebilecek farklı metodlar bulunmaktadır. Bu metodların başlıcalarından ileriiki bölümlerde bahsedilecektir.

Bir çok çalışmada gerilim kararsızlığı ve gerilim çöküşü, genellikle aynı manada kullanılmaktadır. Bu çalışmada da her iki kavram birlikte kullanılacaktır. Gerilim çökmesi ile gerilim kararsızlığı arasında sebep sonuç ilişkisi mevcuttur. Gerilim kararsızlığı sebep, gerilim çökmesi ise sonuçtur.

Gerilim kararlılığı veya gerilim çöküşünün, statik (yük akış) analizler için bir steady state (sabit durum) problemi olarak görülmesi uygundur. Sabit çalışma şartları esnasında üretim yerinden tüketim yerine reaktif güç transfer kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Bir CIGRE raporu özellikle planlama aşamasında güç sistemlerindeki gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi hesaplamaları için statik modeller kullanılmasını tavsiye etmektedir [35].

Şebekenin azami güç transfer limiti ile gerilim kararlılığı limiti aynı şeyler değildir. Güç transfer limiti açılı kararlılığı ile ilgili iken gerilim kararlılığı sistemin reaktif gücü ile ilgilidir [36]. Gerilim kararlılığı veya çöküşü bir dinamik prosestir. “kararlılık” kelimesi bir dinamik sistem ifade eder. Güç sistemi bir dinamik sistemdir. Rotor açısı (senkron) kararlılığı ile başlıca dinamiklerin içerdiği yükler ve gerilim kontrol vasıtaları arasında çok büyük farklılıklar olduğunu göreceğiz. Gerilim kararlılığı yük kararlılığı olarak da adlandırılır [37]. Ancak sistem ve gerilim kararlılığı dinamik olmakla beraber statik analiz araçları ile incelenebilir [11].

2.2.1 Tanımlamalar

Gerilim kararlılığı tüm güç sistem kararlılığının bir alt setidir. Bu çalışmada CIGRE [5] tarafından geliştirilen tanımlamalara göre hareket edilecektir. Bu belirlemeler referans [36, 38, 39, ve 40]’ün içeriğinden oluşur. Bu kararlılık belirlemeleri diğer dinamik sistemler için olan kararlılık belirlemeleri ile benzerdir.

Verilen bir çalışma durumundaki bir güç sistemi, eğer yük gerilimlerinin değeri herhangi bir küçük bozucu etki sonrasında, bozucu etki öncesi degerleri ile aynı veya bunlara yakın ise bu güç sistemi “küçük bozucu etkili gerilim kararlıdır” (küçük bozucu etkili gerilim kararlılığı, sistemin linerize edilmiş modeline ait özdeğerler matrisinin gerçek kısmının negatif olması durumunu gösterir).

Verilen bir çalışma noktası ve bozucu etki şartları altındaki bir güç sisteminde, yük gerilimlerinin değeri, bozucu etki sonrası denge değerlerine yakın ise bu güç sistemi gerilim kararlıdır.

Eğer bozucu etki sonrası denge gerilimleri kabul edilebilir limitlerin altında ise sistem kararsız bölgededir ve gerilim çökmesi ortaya çıkabilir. Gerilim çökmesi genel (blackout) veya kısmi (brownout) olabilir.

Gerilim kararsızlığı, gerilim kararlılığının olmaması olarak tanımlanır ve gerilimin dereceli olarak azalmasına (veya artmasına) neden olur. Yeniden kararlı yapmak için, sistemi kontrol limitleri içine getirmek veya diğer kontrol işlemlerini (örneğin yük çıkarmak gibi) devreye sokmak gerekir, böylece global kararlılık kurulabilir.

Gerilim kararlılığı normalde büyük rahatsızlıklar sonrasında ortaya çıkar (yük veya güç transferindeki hızlı artışlar). Ayrıca kararsızlık hemen hemen daima gerilimdeki periyodik olmayan azalmadır. Salınımlı gerilim kararsızlığı ile de zaman zaman karşılaşılabilir [41]. Fakat bu kontrol kararsızlığı olarak isimlendirilen durum bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Kontrol kararsızlığı, örneğin , statik VAR kompanseörde çok yüksek artış durumunda veya gerilim rölesi ile kontrol edilen bir şönt kapasitör grubunda çok küçük bir ölüband olması durumunda ortaya çıkabilir. Aşırı gerilim durumu ve tahrik makinalarının self-uyarımı gibi kararsızlık durumları da bu çalışmanın sınırları dışındadır. Normalde aşırı gerilim bir sistem kararlılık probleminde ziyade bir teçhizat problemidir.

Gerilim emniyeti (Voltage security) terimi yalnızca bir sistemin çalışma kararlılığı değil aynı zamanda olması mümkün ihtimaller veya yük artışları için bir sistemin kararlılığını koruma kabiliyetidir [42]. Genellikle bunun anlamı, olması mümkün arızadan sonra, çalışma noktası ile gerilim kararsızlığı noktası (veya maksimum güç transfer noktası) arasında çok geniş bir bantın var olmasıdır. Bu aralığın dar olması sistemin gerilim emniyeti bakımından daha zayıf olduğunu gösterir.

2.3 Gerilim Kararsızlığı İçin Zaman Aralığı Ve Mekanizmalar

Gerilim kararsızlığı ve çökme dinamikleri saniyelerden dakikalara uzanan bir zaman periyodu içerisinde yer alır. Zaman cevap tablosu dinamik olayların tanımlanmasında kullanılır [43, 44]. Tablo 2-1’de bir çok güç sistem elemanının ve kontrolörünün gerilim kararlılığında oynadığı roller özetlenmiştir. Ancak bunların herbiri farklı bir olay üzerinde etkili olabilmektedir. Sistem karakteristikleri ve bozucu etkiler (arızalar veya çok büyük yüklerin devreye alınması gibi) hangi olayların daha önemli olduğunu belirleyen temel unsurlardır.

Tablo 2-1 gerilim kararlılığının geçici (transient) ve uzun dönem (longer term) zaman aralığı sınıflandırmasını gösterir. Hemen hemen daima iki zaman aralığı arasında ayrılık vardır.

Tablo 2-1: Gerilim kararlılığı olayları ve zaman cevapları.

Geçici Gerilim Kararlılığı		Uzun Dönem Gerilim Kararlılığı	
İndüksiyon motor dinamikleri		Yük/Güç transferi artışı	
Jeneratör/Uyarma dinamikleri		LTC Trafo & Ayarlı gerilim Reg.	
	İlk hareket kontrolü	Yük yoğun./Termostat	
Mek. Anah. Kapasit./Reak..	Uyarma limitleri	Gaz tribün çalış.	
	Düşük gerilim yük paylaşımı	Güç üretim işletimi	
SVC		Üretim değişimleri/AGC	
Jeneratör atalet dinamikleri		Kazan Dinamikleri	Hat/Trf A.yük
DC	DC Çeviriciler LTC	Sistem operatörü	
Aşırı yük korumalarında içeren tekrar yapılan korona			
0.1	1	10	100 1000 10000(sn)

2.3.1 Mekanizmalar-senaryolar

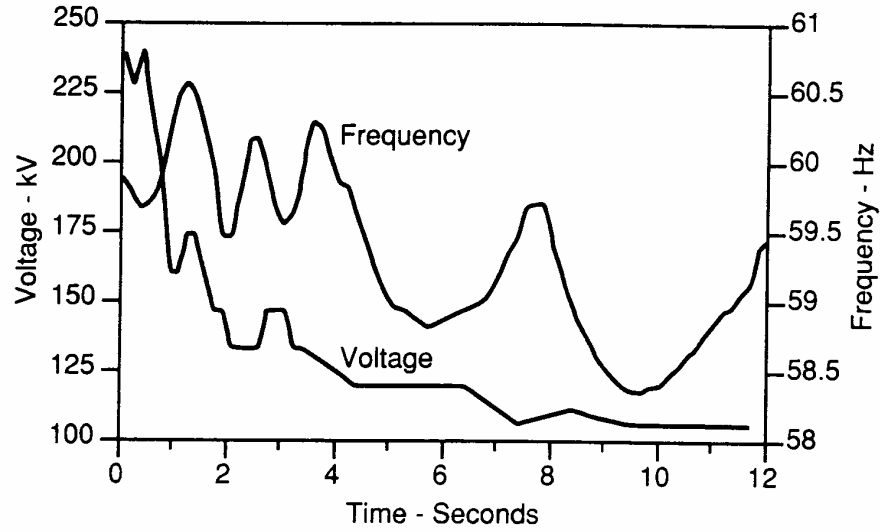
Bölüm girişinde temel fikri anlatılan gerilim kararlılığının iki sınıfını oluşturan transient ve uzun süreli gerilim kararlılığı burada üç ayrı senaryo ile tanımlanacaktır.

2.3.2 Senaryo 1: Transient (geçici) gerilim kararlılığı

Zaman aralığı 0 ile 10 saniye arasındadır, bu aynı zamanda transient rotor açısı kararsızlığının zaman aralığıdır. Gerilim kararsızlığı ile rotor açısı kararsızlığı arasındaki fark her zaman açık değildir ve her iki olay birlikte var olabilir. Genellikle bu tip hızlı olaylarda gerilim çöküşü asenkron motorlar ve DC çeviriciler gibi yük elemanlarının uygun olmayan hareketlerinden dolayı olur.

Şiddetli ve ani gerilim düşmeleri esnasında (yavaş temizlenen kısa devreler esnasında), asenkron motorların reaktif güç talepleri artar, koruma elemanları ve bunlara bağlı kontaktörler motorları devre dışı bırakmazsa reaktif güç talebindeki bu artış gerilim çökmesine neden olur (Bu asenkron motorların kararsızlığı olarak adlandırılır [45]). Arızayı takiben; motorlar yeniden hızlanmada zorlanır, ani durmalara karşı hassas olan motorlar yakınlarında yer alan normal motorların da durmasına sebep olabilir. Bu sebeble simulasyon yapılırken, motorlar dinamik aletler olarak veya dinamik tabiatları uygun biçimde ele alınarak gösterilmelidir. Şönt kapasite gruplarının kompanzasyon karakteristikleri de problemlerin büyümesine yol açar. Bilindiği gibi reaktif güç, geriliminin karesi ile orantılıdır ve gerilimdeki bir düşme kondansatörlerin ürettiği kompanzasyonda karesel oranda düşmeye sebep olur. Dolayısıyla aşırı kompanzasyon sistemi gerilim düşümlerine karşı daha hassas hale getirir. Bu nedenden dolayı Tokyo’da kondansatörler yerine aşırı uyartımlı senkron motorların kullanımını anlatan bir çalışma [46]’da verilmiştir.

Elektrik kapalı devrelerinde (electrical islands) yük paylaşımında dengesizlik eğer %50’den büyük ise gerilim çöküşü olma ihtimali artar. Bu sistemlerde açılabilir kararlılığı genellikle alçak frekans röleleri ile sağlanmaktadır ve herhangi bir arıza anında gerilim düşüşü frekans düşüşünden daha hızlı gerçekleşir. Bu gerilim düşüşü, gerilime hassas yüklerin devre dışı kalmasına ve dolaylı olarak frekans düşüşünün yavaşlamasına ve düşük frekans esasına göre çalışan yük atm rölelerinin devreye girmemesine sebep olur. Ayrıca gerilim düşmesi düşük frekans rölelerinin çalışmamasına da neden olabilir. Şekil 2-1’de Floridadaki küçük bir olay gösteriliyor ve burada gerilim çöküşü düşük frekans yük paylaşımının set noktaları için frekans düşüşünden önce oluyor. Bu olay incelendiğinde anlaşılmaktadır ki asenkron motor yükleri, güç üretimindeki yardımcı motorlar bu olayda önemli bir yere sahiptiler.



Şekil 2-1: Güney Floridadaki genel gerilim çökmesi için gerilim ve frekans eğrisi (17 Mayıs 1985) [47]

Son yıllarda, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) hatlarının gerilim bakımından zayıf güç sistemleriyle bütünleştirilmesi transient gerilim kararlılığı problemine sebep olduğu belirlenmiştir [48]. Örnek olarak, zor şartlar ve büyük rahatsızlıklar için gerçekleştirilen simulasyonlar neticesinde Güney California’da işletmeye alınan iki büyük çevrim istasyonu HVDC link ile beslediği Los Angeles’ta problemlerin çıkmasına sebep olduğu rapor edilmiştir.

2.3.3 Senaryo 2: Uzun süreli gerilim kararlılığı

Zaman aralığı birkaç dakikadır, 2-3 dakika kadar. Sık sık operatör müdahalesi mümkün değildir. Bu tarz olaylar için “mid-term” kararlılığı ve “post transient” veya “post disturbance” kararlılığı tanımları kullanılmaktadır.

Bu senaryo büyük güçler, uzak jeneratörlerden büyük güç transferini ve ani bir büyük bozucu etkiyi konu eder. Bu sistemler genellikle yükün gerilim hassasiyetinden dolayı geçici olarak kararlıdır. Bu bozucu etki (ki bu bozucu etki yük bölgesinde büyük jeneratörlerin kaybı veya başlıca iletim hatlarının kaybı olabilir) yük bölgesinde büyük reaktif güç kayıplarına ve gerilim sarkmalarına (voltage sags) sebep olur. İletim sistemlerindeki OLTC’ler ve dağıtım sistemlerindeki gerilim regülatörleri düşük gerilimi hisseder ve dağıtım sistemi gerilim seviyesini düzeltecek

hareketleri gerçekleştiren işlemleri başlatır. Bu işlemler gücü tekrar eski seviyesine doğru yükseltir.

Yük restorasyonu için gerçekleştirilen hareketler iletilen gerilimlerin daha fazla düşmesine neden olabilir. Yük civarındaki jeneratörler reaktif enerji talebini karşılamak için aşırı uyarılır ve aşırı yüklenirler, fakat aşırı yük taşıma kapasitesinin zamanı (ki genellikle bir-iki dakika) dolarken, aşırı uyarım sınırlayıcıları (veya santral operatörleri) orijinal akım değerlerine geri dönerler. O zaman daha uzaktaki jeneratörler reaktif güç ihtiyacını karşılamalıdır. Ancak bu etkisiz ve genellikle yetersizdir. Güç sistemleri reaktif enerjinin uzun mesafelere nakli esasına göre çalışmak üzere düzenlenmemişlerdir. üretim ve iletim sistemi, yükleri ve reaktif kayıpları daha fazla besleyemez ve böylece gerilim hızlı bir şekilde düşer. Bunu kısmi veya komple gerilim çökmesi takip eder. Bu son adım asenkron motorlarının durması ve koruma elemanlarının çalışmasını da içerebilir. Yükün tipine bağlı olarak (alçak gerilimde devre dışı bırakılmış yüklerde dahil) çökme, kısmi (brownout) veya komple (blackout) olabilir [10].

2.3.4 Senaryo 3: Uzun süreli gerilim kararsızlığı

Bu kararsızlık yine uzun süreli zaman periyodu üzerinde gelişir ve çok büyük yük artışı ile (gündüz ve akşamın yoğun saatlerinde) veya büyük hızlı güç transfer artışı ile olur. Bu güç artışı Megawatt/dakika seviyesinde ölçülür ve çok hızlı olabilir. Operatör faaliyetleri, mesela reaktif güç elemanlarının zamanlı kullanımı veya yük paylaşımları, kararsızlığa engel olmak için gerekli olabilir. İletim hatlarının zaman aşırı yük limitleri (on dakikalarda) ve alçak gerilim için yük eş zamanlılığının katsayısının sağladığı avantajın kaybı (enerjinin sabitliği ve termostatla kontrol edilen yükler sebebiyle) gibi etkiler önemli olabilir. Bu kararsızlığın son adımı senaryo 2’de tanımlanan daha hızlı elemanların hareketlerini içerir.

Çeşitli sistem cihazları (Şekil 2-1) ve zaman limitleri arasında bir çok etkileşim vardır. Örneğin gerilimlerin ayarlı trafo regulasyonu, sabit enerji yüklerinin termostatik regulasyonu ile diversite kaybı önlenir. Diğer bir örnek ise, aşırı uyarım sınırlayıcılarının devreye girmesi jeneratörün normal gerilim regulasyonu yapmasını önler, bu durum, aynı senaryonun farklı bir görünümüdür.

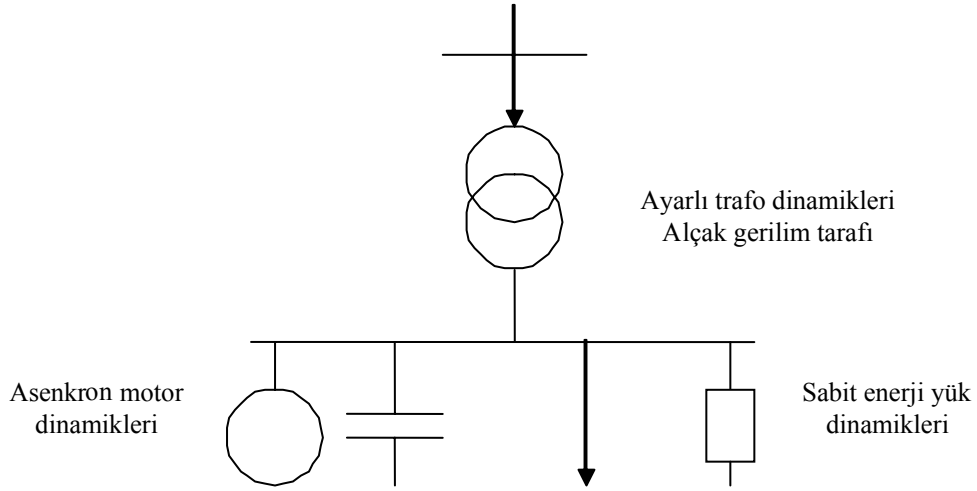
2.3.5 Yük dinamiği

Gerilim kararlılığına yük kararlılığı da denir. Bu “yük”, iletim sistemlerinin yüksek gerilim baralarında görülen yüküdür ve alt iletim ve dağıtım sistemlerinin etkilerini de içerir. Gerilim düşmesinden dolayı geçici olarak azaltılan yüklerin restorasyonu, gerilim kararlılığının önemli unsurlarından biridir.

Genellikle aktif (reel) yük üç mekanizma ile restore edilir:

1. İndüksiyon motorlar gerilimdeki ani değişiklikleri takip eden bir kaç saniye içerisinde mekanik yükleri eşlemek için hızlıca cevap verir. Kaynaktaki bir ani değişikliğin hemen ardından, asenkron motorların hareketleri empedans yükler gibi olacaktır, bu iyi bilinen eşdeğer devrelerden anlaşılabilir. Bilindiği gibi; kayma dolayısıyla kaymaya bağlı olan yük direnci motorun ataletinden dolayı ani olarak değişmez. Yavaş gerilim düşümlerinde, hızlı cevap veren motorlar diğer elemanların yavaş dinamiklerini takip eder ve sabit aktif güç yükler gibi hareket ederler.
2. Güç iletim transformatörlerinin otomatik ayarlı trafoları ve dağıtım sistemi regülatörleri on saniyelerden dakikalara bir zaman skalası içerisinde çalışır. Bu çalışma sonunda gerilim hassasiyetli yükler eski değerlerine ulaşabilir. Reaktif güç yükü ve şönt kapasitörün reaktif güç çıkışı da yeniden düzenlenir.
3. Sabit enerjili direnç yükler termostatik veya manual kontrol ile ayarlanırlar. Bu gruptan yüklerin bir araya geldiği sistemlerde bu belli bir zaman için yük diversitesinin kaybına yolaçar. Bu da sistemi gerilim kararsızlığına doğru taşır

İlk yaklaşım olarak, yük restorasyon mekanizmasının bu üç dinamiği birinci dereceden bir olay olarak ve tek bir zaman sabiti kullanılarak modellenenebilir (Ölü-band, gerilim ve zaman rölesi ve parçalı (discrete) taplar içeren gerilim ayarı sistemleri için bu yaklaşım oldukça kabardır). Her ne kadar zaman sabitleri farklıysa da, eşitlikler aynı formdadır ve yük restorasyon mekanizmalarının analizleri için birleştirilebilir [36, 40]. Bu üç tip yük bir güç dağıtım yük barası gövdesinde Şekil 2-2 de olduğu gibi gösterilebilir.



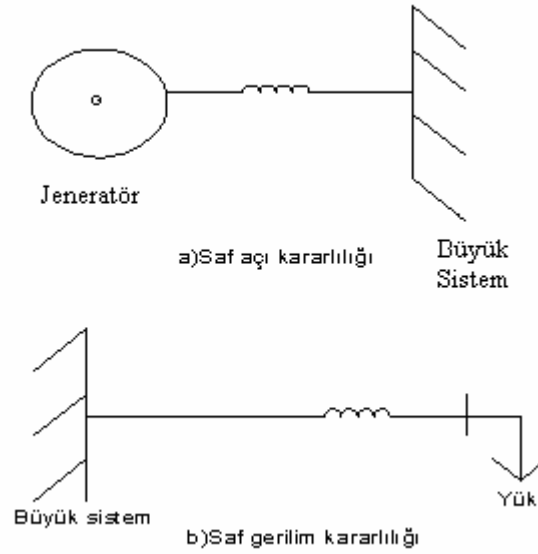
Şekil 2-2: Gerilim hassasiyetli yüklerin restorasyonu için 3 mekanizma [40]

Bu üç yük restorasyon mekanizmasının birinci dereceden durum değişkenleri, sabit yükler için güç faktörü ($\cos\phi$), ayarlı trafo için dönüştürme oranı (m) ve hat reaktansı (x) (kompanzasyon sistemi için reaktans, dinamik yükler için kondüktans) gibi faktörler alınabilir. Her durum değişkeninin sıfırdan artması gibi, yük gücü artar, maksimuma ulaşır ve sonra düşer.

2.4 Rotor Açısı Kararlılığı İle Gerilim Kararlılığının İlişkisi

Gerilim kararlılığı ve rotor açısı (veya senkronizma) kararlılığı birbiri ile ilişkilidir. Transient gerilim kararlılığı genellikle transient rotor açısı kararlılığı ile ve gerilim kararlılığının daha yavaş formları, küçük bozucu etkili rotor açısı kararlılığı ile ilişkilidirler. Genellikle bunların mekanizmalarını birbirinden ayırmak zordur.

Bununla beraber tek tip kararsızlığın hakim olduğu bir çok durum söz konusudur. Bir IEEE raporu [42] uç durumları gösterir: **a)** bir uzak senkron jeneratör, büyük bir sisteme iletim hatları ile bağlanır (tek makina ve bir sonsuz bara problemi için saf açı kararlılığı) ve **b)** bir senkron jeneratör veya bir büyük sistem, iletim hatları ile bir asenkron yüke bağlanır (saf gerilim kararlılığı) Şekil 2-3 bu uç durumları gösterir.



Şekil 2-3: Uç durumları gösteren basit örnekler.

Rotor açısı kararlılığı da, gerilim kararlılığı gibi reaktif güç kontrolundan etkilenir. Özelde, periyodik olmayarak artan açıları içeren küçük-bozucu etki kararsızlığı, sürekli-aktif jeneratör otomatik gerilim regülatörü kullanılmadan önceki dönemlerde başlıca problem idi. Şimdi küçük bozucu etki açı kararlılığı ve uzun süreli gerilim kararlılığı arasındaki ilişki şu şekilde özetlenebilir: Jeneratör akım limitleri (bir aşırı uyartım sınırlayıcısı ile) normal otomatik gerilim regülasyonuna engel olur. Jeneratör akım limitleri kararlılığın her iki şekli için çok zararlıdır. Ancak jeneratörlerin korunması için gereklidir.

Gerilim kararlılığı yük bölgeleri ve yük karakteristikleri ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığı için, ekseriye uzun iletim hatları üzerindeki büyük bir sisteme, sistemin uzak güç üretim merkezleri ile bağlantıları ile ilgilidir. Gerilim kararlılığı genelde yük kararlılığı ve rotor açısı kararlılığı da temelde jeneratör kararlılığıdır.

Bir büyük enterkonnekte sistemde, herhangi bir jeneratörde senkronizma kaybı olmaksızın bir yük bölgesinde gerilim çökmesi mümkündür [31].

Söyleyebiliriz ki eğer gerilim çökmeleri, iletim hattındaki yüklerden uzak bir noktada ise, bu bir açı kararsızlığı problemidir. Eğer gerilim çökmeleri bir yük alanında ise bu başlıca bir gerilim kararsızlığı problemidir.

Gerilim kararsızlığı problemi gelişmekte olan güç sistemlerinde beklenir. Benzer bir şekilde, gerilim kararsızlığı problemlerinin başlıca sistem arızalarını

takibetmesi beklenir. Fakat son yıllarda özellikle eski ve yerleşmiş güç sistemlerinde de gerilim kararlılığı problemi ile karşılaşmaktadır. Bunun temel sebeplerinden biri var olan üretim ve iletimin yoğun bir şekilde kullanılmasıdır. Bu, yük bölgelerinde yeni enerji üretim merkezlerinin inşasındaki zorluğun ve uzak bölgelerdeki enerji üretim merkezlerinden iletim hatlarının inşasının zorluğunun sonucudur.

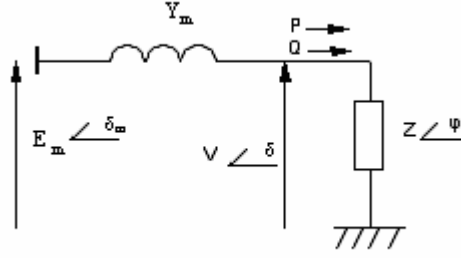
İkinci neden reaktif güç kompanzasyonu için şönt kapasitör kullanımının artmasıdır. Transfer limitleri arttırılır iken şönt kapasitör gruplarının aşırı kullanılması gerilim çökmesine eğilimli şebekelere sebebiyet verir. Şönt kapasitör gruplarının reaktif güç çıkışları bilinen güç bağıntısından dolayı gerilimin karesi ile ilişkilidir. Gerilimdeki küçük bir düşüş üretilen reaktif güçte karesel miktarda düşüşe neden olacaktır.

Hızlı hata temizlenmesi, yüksek performanslı uyarım sistemleri, güç sistem kararlı kılıcılar PSS (Power System Stabilizers) ve diğer kontrol elemanları transient kararlılığın belirlediği transfer limitlerinin yükseltilmesinde etkilidir. Transient kararlılığının belirlediği limitlerin yükseltilmesi ile termal kapasite ve gerilim kararlılığı bu transfer limitlerini belirliyebilir.

2.5 Gerilim Kararlılığı Analizlerine Giriş: Liapunov

Fonksiyonları

Eğer güç sistemleri, iletim hatları, yükler, transformatörler, kapasitörler ve jeneratörlerden oluşursa, bunların herbiri indüktör ve kapasitörlerin şartlarında modellenebilirler. İyi bilinir ki indüktör ve kapasitörler kuruldukları yerde enerji depolayabilirler. Bu arada güç sistemlerinin, iletim hatlarında, yükte, transformatörlerde ve jeneratörlerde enerji depolayabildiklerini göstermek için güç sisteminin bir enerji gösterilimi oluşturulmalıdır. Böylece Liapunov teorisi Şekil 2-4'de ki sistemin tüm depolanan enerjisini gösterir.



Şekil 2-4: Tek makina ve sonsuz bara sistemi

Sistemin enerji fonksiyonu en genel halde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$v(w, \delta_m, \delta, V) = \int_{(w_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(w, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} Mx \\ f(\lambda, y, z) \\ g(\lambda, y, z) \\ h(\lambda, y, z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (1)$$

Denklemden yer alan M jeneratörün atalet sabiti, x , λ , y ve z durum değişkenleridir.

Ancak güç sisteminin bu enerji gösterilimi sistem kararlılığı için de bilgi sağlayabilir. Böylece bu çalışmadan güç sistemindeki tüm kararlılık bilgileri ve depolanan enerji seviyesini elde edebiliriz.

Analiz, jeneratör rotor açısı $\delta_m=0.8$ rad. ve $\delta_m=1.6$ rad ve yük durum değişkenlerine dayanan iki araştırma içerecektir. Klasik yük akışı ile bulunacak sistemin denge noktası için çözüm gerçekleştirilir.

2.5.1 Analiz 1: Jeneratör Rotor Açısı $\delta_m=0.8$ rad., Sistemin Frekansı

$$w=1 \text{ p.u}$$

Bu analizde önemli olan 4 tane durum değişkeni vardır. Bunlar

w = Sistem frekansı (p.u.)

δ_m = m jeneratör rotor açısı (Radyan)

δ = Yük açısı (Radyan)

V = Yük gerilimi (p.u.)

Bu çalışmanın asıl amacı, güç sisteminin tüm enerjisi üzerinde yükün ne çeşit etkilere sahip olabileceğidir. Şekil 2-4'deki enerji değişimlerini incelemek için, enerji fonksiyonu (1), δ ve V gibi yükü belirten durum değişkenlerini içermelidir. Bununla birlikte jeneratör rotor açısı δ_m sistemde depolanan enerji seviyesini etkileyebilir. (1) denklemini denge şartları için jeneratör rotor açısı $\delta_m = 0.8$ rad. Ve sistem frekansı $\omega = 1$ p.u. için çözülecek olur ise;

$$v(\delta, V) = 1.872V^3 + a_2V^2 + a_1V + a \quad (2)$$

elde edilir. Burada

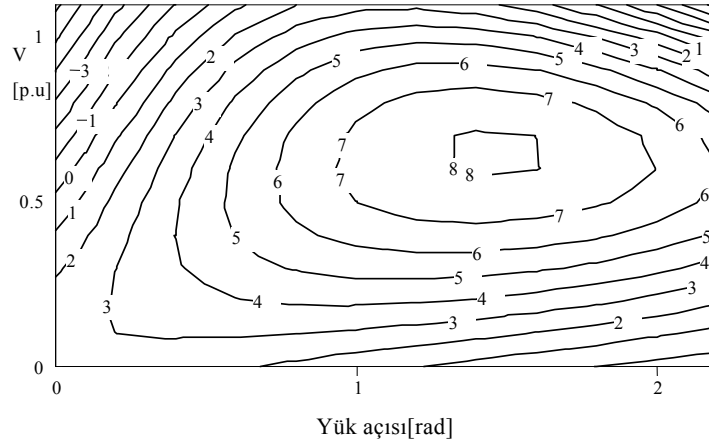
$v(\delta, V)$ = Enerji fonksiyonu

V = Yük gerilimi

δ = Yük açısı

a, a_1, a_2 = Yük açısı δ ya bağlı sabitler

Yukarıdaki sonuçların grafiksel gösterilimi eş yükselti eğrileri olarak Şekil 2-5'de sunulmuştur. İki boyutlu eş yükselti grafiği enerji radyasyonunu veya diğer bir değişle farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu gösterir. Her eş yükselti çizgisinin sabit enerji değerleri vardır. Şekil 2-5 aynı enerji seviyesinde sistemin alçak gerilim ve yüksek gerilimde çalışabileceğini gösterir. Eğer sistemin alçak gerilim çözümünde çalışmadığı kabul edilirse, geriye tek seçenek yüksek gerilim çalışması kalır. Böylece yüksek gerilim seviyesine karar verilir ve o zaman yüksek gerilim seviyesine uyan yük açısı kolayca seçilebilir. Şekil 2-5'de enerji yoğunluğunun $0.6 < V \leq 1$ ve $1 \leq \delta \leq 1.4$ rad, arasında olacağı gözlenir. Bu noktalar etrafında enerji kuvveti 6 ve 8 (enerji ölçümü) arasında değişir. Çalışma noktasına bağlı olarak, sistemin tüm depolanan enerjisinin sistem yükünün zamanla değişmesi ile alçalır veya yükselir olduğu gözlemlenir. Bu depolanmış enerji seviyesinin alçalması ve yükselmesi, alçak yük gerilimi ve yüksek yük gerilimi çalışmalarına tekabül eder. Böylece, sistem tarafından tolere edilemeyecek yük değişimleri arasındaki sınır kolayca belirlenebilir. Bu da gösterir ki $\delta_m = 0.8$ rad. ın seçimi ile oluşan bu yeni denklik noktası sistemin kararsız olmasına sebep olmadan daha büyük gerilim değişimleri olabilir.



Şekil 2-5: Güç sisteminin iki boyutlu enerji gösterilimi: $\delta_m=0.8$ rad. ve $w=1$ p.u.

2.5.2 Analiz 2: Jeneratör Rotor Açısı $\delta_m=1.6$ rad., Sistemin Frekansı

$$w=1\text{p.u}$$

Yüke bağlı olan durum değişkenleri ve güç üretim seviyesi aşağıdaki değişimler ile jeneratör açısı δ_m 0.8 radyandan 1.6 radyana bir seviye daha yükseltilir. Esas olarak bu, çalışma noktasını yeni bir seviyeye kaydırır. O zaman sonuçta enerji fonksiyonu şöyle ifade edilebilir.

$$v(\delta, V)=1.872V^3+a_2V^2+a_1V+a \quad (3)$$

$v(\delta, V)$ = Enerji fonksiyonu

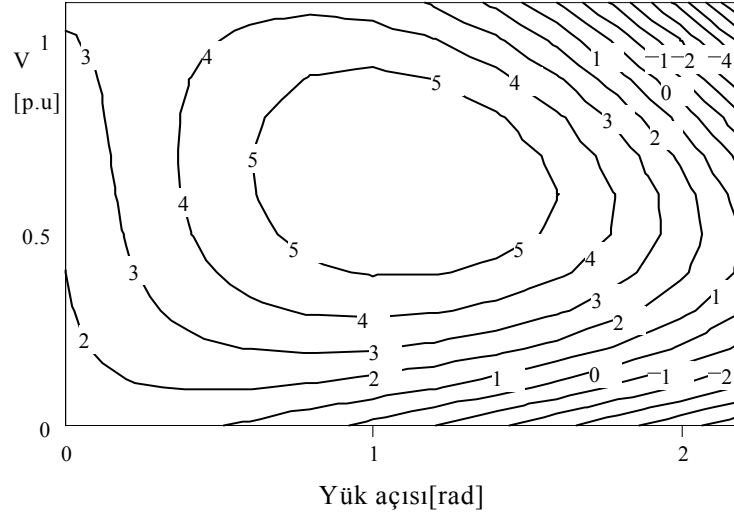
V =Yük gerilimi

δ =Yük açısı

a, a_1, a_2 = Yük açısı δ ya bağlı sabitler

Sonuçlar iki boyutlu olarak Şekil 2-6'da görülmektedir. Burada tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğünü gözlemledik. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. Analiz 1 de maksimum okunan enerji 8.36 (enerji birimi) idi, $\delta=1.4$ rad. ve $V=0.8$ p.u. iken. Ancak bu analizde δ ve V nin aynı değerlerinde maksimum enerji seviyesi 5.15 (enerji birimi) oluyor. çalışma noktasının bu yeni seviyesinde açıkça görüldüğü gibi

yükteki herhangi bir değişim depolanan enerji seviyesini aşağılara düşürmeye hatta belkide negatif değerlere kadar düşürmeye devam edecektir.



Şekil 2-6: Güç sisteminin enerjisinin iki boyutlu gösterilimi: $\delta_m=1.6$ rad. ve $w=1$ p.u.

Bu metodla yapılan gerilim kararlılığı analizi için sistemin tüm bilgilerinin bilinmesi gerektiği gibi bağlı bulunan jeneratörlerin açısının da bilinmesi gerekmektedir.

2.6 Gerilim Kararlılığı Analizlerine Giriş: P-V Eğrileri

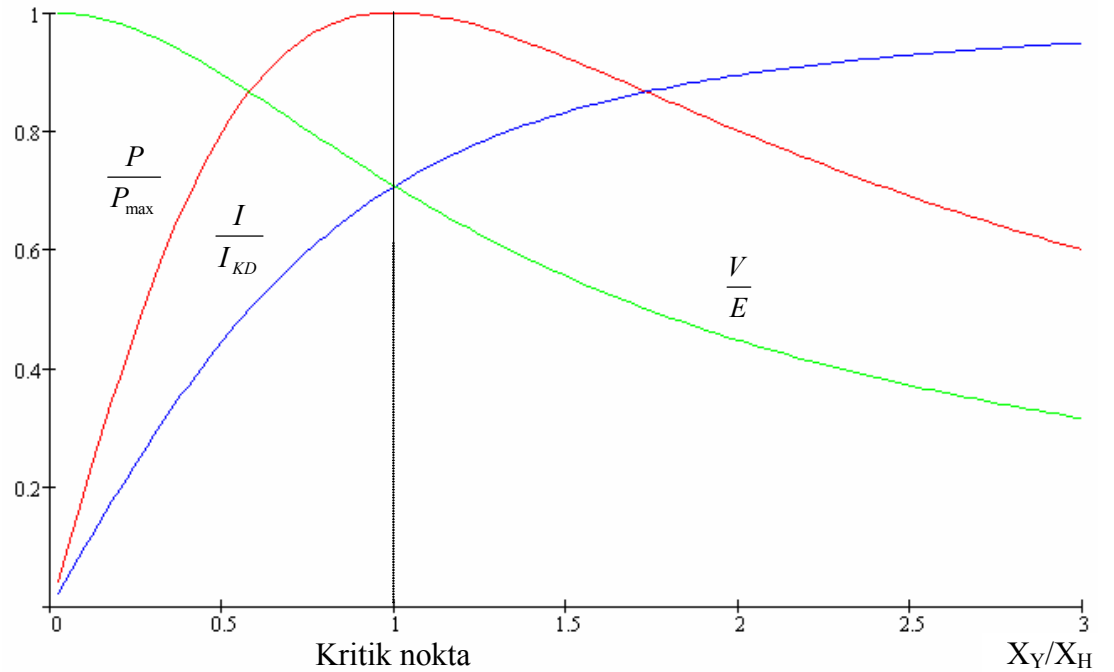
Gerilim kararsızlığının daha yavaş şekilleri ekseriye steady-state problemler gibi analiz edilir; yük akış simülasyonu en temel çalışma metodudur. Devrenin anlık görünümünde (snapshots) olağanüstü bir durumun ardından veya yük ekleme esnasındaki simülasyonu yapılır. Arıza sonrası güç akışlara ilaveten yine güç akışı temelli P-V eğrileri ve V-Q eğrileri analiz için genişçe kullanılırlar. Bu iki metod gerilim kararlılığı ile ilgili steady-state yüklenebilirlik limitlerini belirler.

P-V eğrileri genellikle gerilim kararlılığının radyal sistemlerdeki analizleri için yararlıdır. Eğer bölgedeki toplam yük ve kritik veya temsilci baradaki gerilim, bir şekilde tek bir baraya indirgenebiliyorsa, bu metod büyük, gözlü (mesh) şebekeler için de kullanılabilir. P bir interface veya enterkonnekte iletim hattındaki güç transferi de olabilir. Birkaç baradaki gerilimin P'ye göre değişimi çizilerek analiz yapılabilir. Bunun bir dezavantajı, eğer sistem devrilme noktasında veya maksimum güç noktasında çalışıyor ise güç akış simülasyonu çözümden uzaklaşacaktır

(Divergence). Bir başka dezavantaj, enerji üretimi bölge yükünün artışı karşılacak oranda arttırılacak şekilde programlanmalıdır.

Genel analizler için, eğer yük karakteristikleri gerilimin bir fonksiyonu olarak analiz edilirse P-V eğrileri bu iş için uygundur. Örneğin bir direnç yükü $P_{yük}=V^2/R$ ile çizilebilir. Sabit güç (gerilimden bağımsız) yükünün [49] modellenmesi daha da basittir, bu P-V eğrisinde bir dikey çizgidir.

İlk önce empedans yükler üzerinde duralım. Temel devre teorisinden bilinmektedir ki, eğer yük empedansının değeri, kaynak empedansının değerine eşitse maksimum güç iletimi gerçekleşir. Maksimum güç transferinin olmadığı tüm durumlarda güç akış probleminin iki çözümü vardır. Bunlar yüksek gerilim ve düşük gerilim çözümleridir. Daha büyük yük empedansları için (daha küçük admitanslar için) yüksek gerilimde düşük akım çalışma noktasında oluruz. Daha yüksek admitanslar için alçak gerilim de yüksek akım çalışma noktasında oluruz. Barbier ve Barret [50] bu matematiksel ilişkiyi gösterir. Direnç yükler ve reaktans şebekelerin en basit durumları için Şekil 2-7 gerilim akım ve güç ilişkilerini gösterir. Daha önce belirtildiği gibi eğer kaynak ve empedans büyüklükleri eşit ise maksimum güç meydana gelir. Gerilim maksimum yükte kritik gerilim olarak adlandırılır.

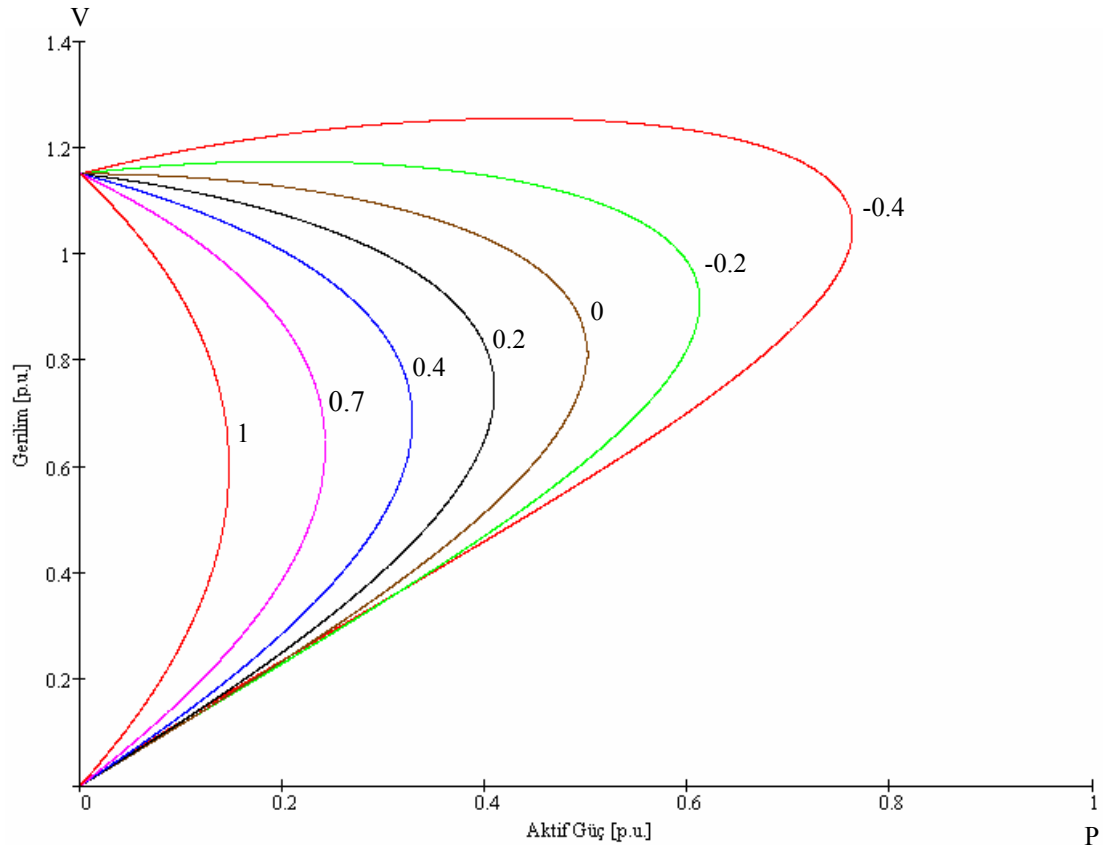


Şekil 2-7: Direnç yükler ve reaktans şebekeler için gerilim, akım ve gücün ilişkileri. $I_{KD}=E/X$ kısa devre akımı. $P_{max}=0.5$, $V_{krit}=0.707$

Şekilde basit radial bir system için normalize edilmiş akım, gerilim ve güç değişimleri gösterilmektedir. Hat empedansının yük empedansına eşit olduğu durumlarda yani X_Y/X_H oranı 1 iken kritik gerilim ve güç noktalarına ulaşılmaktadır. Bu noktadan sonra akım arttığı halde gücün azaldığı görülmektedir. Buda sistemin alçak gerilim çözümüne doğru taşındığını göstermektedir.

2.7 Gerilim Kararlılığı Analizlerine Giriş: V-Q Eğrileri

İlk olarak Şekil 2-8 de gösterilen P-V eğrilerini kullanarak V-Q eğrilerini çizebiliriz. Basit şekilde izah edilecek olursa P'nin sabit değerleri için Q ve V değerlerini (her güç faktörü için bir çift) not ederiz ve sonra yeniden V-Q eğrilerini çizeriz. Şekil 2-9 sonucu gösterir. Kritik gerilim yüksek yüklemeler için tekrar çok yüksek olur ($P=1p.u$ için $V=1p.u$ den fazla).

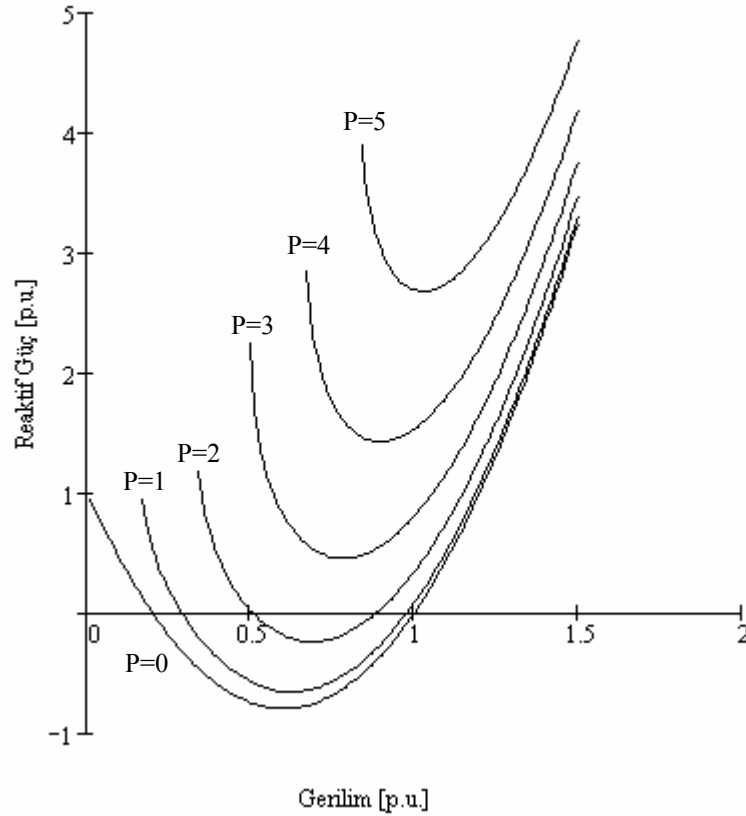


Şekil 2-8: Sabit kaynak (sonsuz bara) ve reaktans şebekeleri için P-V eğrileri.

Büyük sistemler için bu eğriler bir seri güç akış simülasyonu ile elde edilebilir. V-Q eğrileri test veya kritik baradaki reaktif güce karşı gelen gerilimi çizer. Bir hayali senkron kondansatör test barasında gösterilir. Bilgisayar program dilinde bu

bara reaktif güç limitleri olmadan bir “PV” bara ile değiştirilir. Güç akış bir dizi senkron kondansatör gerilim programı için simüle edilir ve kondansatörün reaktif çıkışı programlanmış gerilime karşı gelecek şekilde çizilir. Gerilim bağımsız ve absis değişkendir. Kapasitif reaktif güç pozitif dikey yönde çizilir. Test barasındaki şönt reaktif kompanzasyonu kullanmadan, çalışma noktası hayali senkron kondanserin kaldırılmasına tekabül eden sıfır reaktif noktadır.

(Bu eğriler ekseriye V-Q eğrilere tercihen Q-V eğriler olarak adlandırılırlar, fakat V-Q terminoloji baskındır, çünkü gerilim, reaktif güç yükden daha fazla bağımsız değişkendir. Q-V eğrileri gerilime tercihen programlanmış reaktif güç ile çizilirler.)



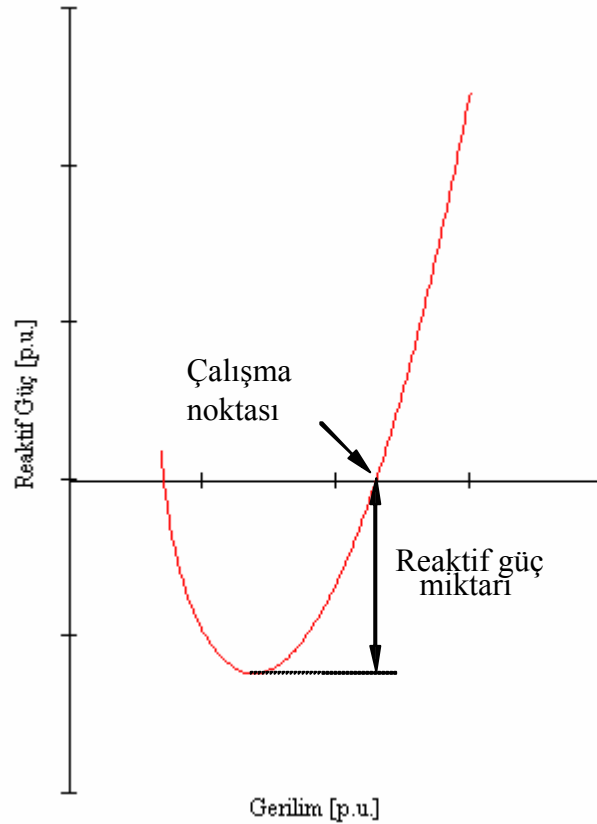
Şekil 2-9: Sabit kaynak (sonsuz bara) ve reaktans şebekeleri için normalize edilmiş V-Q eğrileri [35]. Yükler sabit güçtür.

Çeşitli sabit P güçleri için V-Q eğrileri Şekil 2-9'da gösterilmiştir. Bu eğrilerin kullanılma yerleri ve avantajları şu şekilde sıralanabilir.

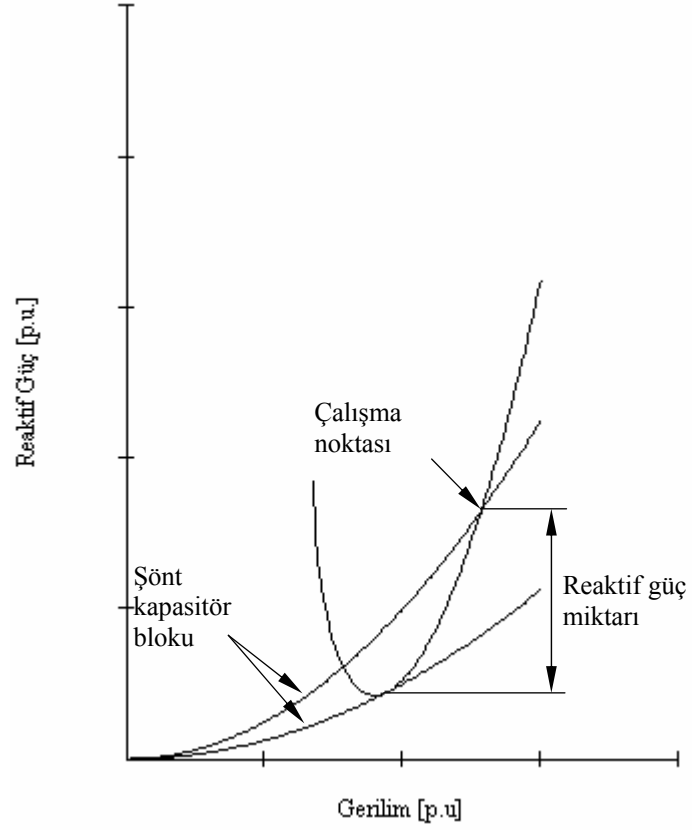
- Gerilim güvenliği reaktif güce bağlıdır ve V-Q eğrisi test barasındaki reaktif güç miktarını verir. Reaktif güç miktarı çalışma noktasının, bu eğrinin tabanından veya V-Q eğrisi ile baradaki geriliminin karakteristiğine bu eğriye yaptığı teğetin

Çalışma noktasından (ki bu nokta kullanılan kapasitörün gerilim karesinin karakteristik noktasıdır) MVar olarak mesafesidir (şekil 2-10 ve şekil 2-11). Test barası bir “gerilim kontrol bölgesinde” (bu bölgede gerilim miktarının değışimi bütün baralarda aynıdır) bütün baraların temsilcisi olabilir.

- V-Q eğrileri bir P-V eğrisi boyunca test sisteminin sıhhati için hesaplanabilir.
- Test barası şönt reaktif kompanzasyon karakteristikleri (kapasitör, SVC veya senkron kondansatör) direkt olarak V-Q eğriler ile çizilebilir. Çalışma noktası V-Q sistem karakteristiğinin kesişme noktasıdır (şekil 2-11). Reaktif kompanzasyon, gerilim kararlılığı problemleri için bir çözüm olduğundan dolayı faydalıdır.
- V-Q eğrinin dikliğı test barasının katılığını gösterir (ΔV bir ΔQ içindir).
- Daha iyi görmek için, jeneratörün reaktif gücü aynı grafik üzerinde çizilebilir. Eğer yakın jeneratörler kendi VAr limitlerine ulaşırsa, V-Q eğrisinin dikliğı daha az olur ve egrinin tabanı yaklaştırılır.



şekil 2-10: Reaktif güç miktarı.



Şekil 2-11: Reaktif güç miktarı.

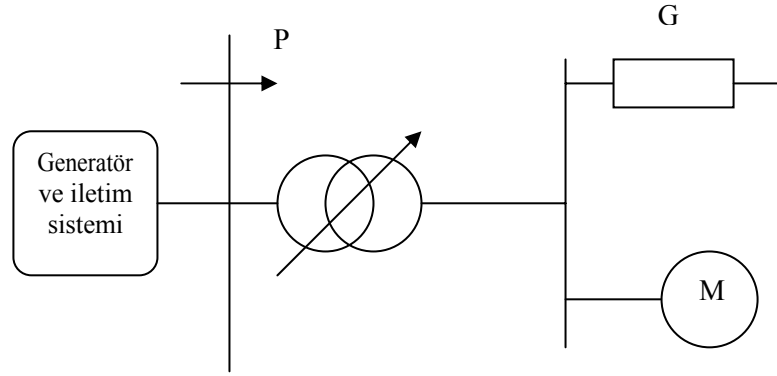
Olaya hesap tekniği açısından bakarsak, yapay P-V bara, güç akış ıraksama problemlerini minimize eder. Çözümler eğrinin sol tarafında elde edilebilir, ıraksama yalnızca eğer P-V baradan uzaktaki baralarda, gerilim daha aşağıya itilirse olur. Eğer aktif güçteki değişimler yalnızca kayıplardaki değişimlerden dolayı olursa, üretimin tekrar programlanma ihtiyacı minimum olur. Başlangıç değerleri biraz farklı programlanmış önceki çözümden kullanılır, böylece her güç akış çözümü hızlı olur. Bu işlemler otomatik yapılabilir, böylece bütün eğri bir seferde hesaplanabilir [12].

2.8 Uzun Dönem Gerilim Kararlılığının Grafikselsel

Açıklaması

P-V eğrileri kullanarak, gerilim kararlılığı yük karakteristiklerine bağlı olarak kontrol edebilir. Böylece ayarlı trafo, sabit enerjili yükler ve jeneratör akım limitlerinin etkileri hesaba katılabilir.

Şekil 2-12 örnek bir sistem modeli göstermektedir. Yaklaşık 0.9-1.1 p.u gerilim aralığı üzerinde, yaklaşık asenkron motor yükü (sabit güçlü statik yük gibi) ve farazi motor reaktif güç isteğini şönt kompanzasyon ile eşleriz. Burada sabit ve direnç yükünün farklı oranları kabul edilir (küçük bir gerilim aralığı üzerinde, aydınlatma cihazları gibi diğer yük elemanları sabit ve direnç yükünün kombinasyonları olarak modellenebilir). Direnç (veya iletkenlik, G), dönüştürme oranı “ m ” in karesi ile OLTC transformatörlerinin iletim tarafına yansıtılır. Tipik ayarlı trafo aralığı $\pm\%10$ dur.



Şekil 2-12: Örnek model.

Bundan sonraki kısımlarda yoğun olarak kullanılmaya başlanılacak olan P-V eğrilerinden bu bölümün daha önceki kısımlarında bahs edilmişti. Bu eğrilerin gerilim kararlılığı analizlerinde ne şekilde kullanılabileceğine de kısaca değinilmiş olmakla birlikte bunların detaylı incelenmesi bir sonraki bölüme bırakılmıştır.

Sistem eğrilerinin P-V ve Q-V eğriler ile belirlenmesinin ardından yük gerilim karakteristiklerine veya kısaca yük karakteristiklerine de aşağıda değinilecektir. Yük karakteristiği, yük tarafından çekilen aktif ve reaktif gücün gerilimin fonksiyonu olarak ifade edilmesidir.

İki ana yük modelinden birisi olan polinom yük modeline kısaca değinilecek olur ise; Polinom yükler aynı üstelliğe sahip yük bileşenlerinin toplanması ilkesine bağlı olarak oluşturulan bir yük modelidir. Eğer üsler tamsayı ise yük karakteristiği polinom olarak ifade edilebilecektir. Özel bir model olan ZIP modelin [51] üç bileşeni sabit empedans (Z), sabit akım (I) ve sabit güç (P) ten oluşan polinom yük modelinin aktif ve reaktif güç ifadesi aşağıda verilmiştir;

$$P = zP_0 \left[aP \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + bP \frac{V}{V_0} + cP \right] \quad Q = zQ_0 \left[aQ \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + bQ \frac{V}{V_0} + cQ \right] \quad (4)$$

Bu denklemlerde toplamada yer alan ifadelerden birincisi sabit empedans ikincisi sabit akım ve sonuncusu ise sabit güç modellerini ifade etmektedir. ZIP modelin alçak gerilim çözümü için yeterince güvenli olmadığı bilinmektedir. Polinom yük modellerinin bir sakıncası da polinom seviyesinin çok yüksek olması çözümü zorlaştırmaktadır. Beşinci dereceden bir yük modelinin ele alındığı bir çalışmada yük modellerinin gerilim kararlılığına etkisini incelenmiştir [3]. Yüksek dereceden polinomların yük dinamiğini benzetmekte daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Ancak bu hesaplama yükü getirecektir. Bu çalışmada kullanılmayacağı halde temel yük modellerinden biri olan polinom yük modellerinden kısaca bahsedilmekte fayda görülmüştür.

Bu çalışma da kullanılacak olan yük modeli üstel ifade ile belirlenen yük modelidir. Çok geniş bir kullanım alanına sahip üstel yük karakteristiğinin en genel gösterimi aşağıda verilmiştir;

$$P = zP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad Q = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (5)$$

Burada z gerekli boyutsal değişken, V_0 referans gerilim, α ve β katsayıları ise yükün özelliğine göre (motor, ısıtıcı, lamba, vb.) belirlenen değişkenlerdir. zP_0 ve zQ_0 , V gerilimi, referans gerilim V_0 gerilimine eşit olduğu sırada çekilen aktif ve reaktif gücü ifade etmektedir.

Farklı yük modelleri için oluşan uygulamalara burada değinilecektir. İleride grafiksel gösterimi verilecek olan ve aşağıda ki tabloda belirtilen α ve β değerleri farklı yükleri modellemekte iken sabit yük modelleride aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$\alpha=\beta=2$: Sabit empedans yük

$\alpha=\beta=1$: Sabit akım yük

$\alpha=\beta=0$: Sabit güç yük

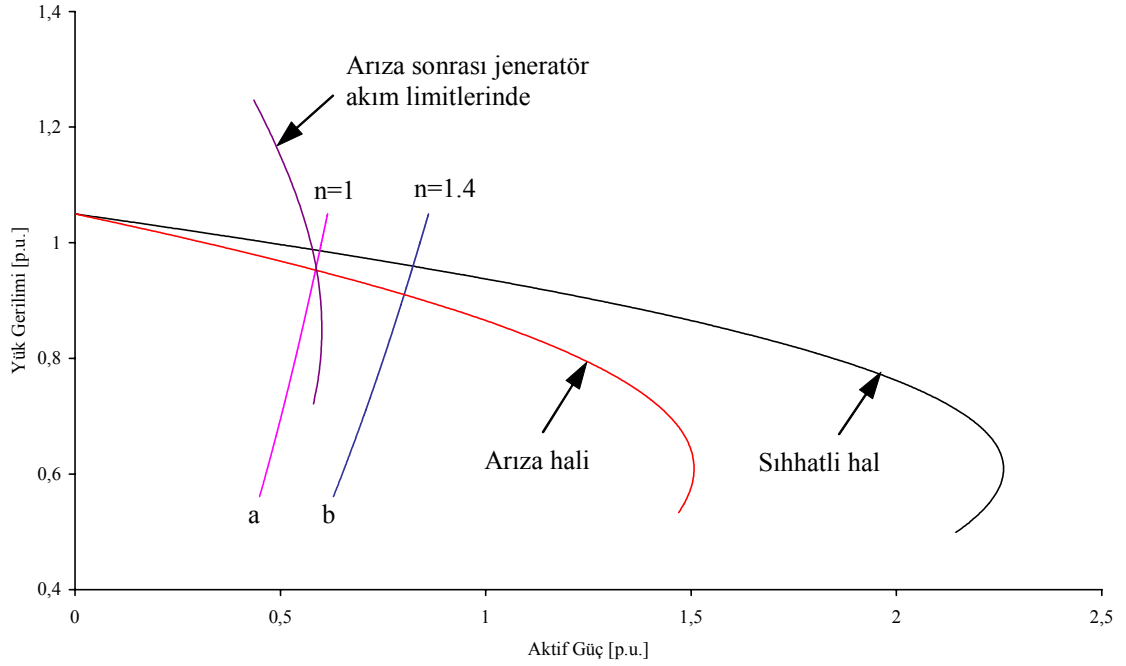
Tablo 2-2’de çeşitli yük tiplerine ait α ve β katsayıları sunulmuştur. Deneysel verilere dayalı bu katsayıların güvenilirliği birçok çalışmada analiz edilmiştir [3, 30].

Tablo 2-2: Farklı yük karakteristikleri için α ve β katsayılarının almış olduğu değerler [30].

Yük Çeşidi	α	β
Airconditionlar	0.50	2.5
Ocak Fanları	0.08	1.6
Batarya Şarjları	2.59	4.06
Elektronik Florasanlar	0.95	0.31
Normal Florasanlar	2.07	3.21

2.8.1 Aircondition yükler $\alpha=0.50$ ve $\beta=2.5$ durumu

Şekil 2-13, $\alpha=0.50$ ve $\beta=2.5$ yük durumu için üç sistem karakteristiği ve yük karakteristiğini gösterir. Çalışma noktası sistem ve yük karakteristiklerinin kesişim noktası olarak belirlenmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi a yükü için çalışma noktasını oluşturan kesişim noktası sıhhatli halde iken sistem eğrisi üzerinde daha yüksek bir gerilim seviyesinde ve kritik noktadan oldukça uzak bir bölgede çalışmaktadır. b yükü için de aynı şeylerin söylenebileceği sıhhatli hal durumu mevcut iken arıza sonrası jeneratör akım limitlerinden önce b yükünü a yüküne nazaran daha fazla kritik noktaya taşımıştır. Bunun ile birlikte arıza sonrası jeneratör akım limitleri için a yükü çok kritik bir nokta olan sistem eğrisinin devrilme noktası civarında çalışmasına karşın b yükü için kesişmenin çok düşük bir gerilim seviyesinde olması gerekir. Artık burada b yükü için sistem çökmüştür denebilir.



Şekil 2-13: $\alpha=0.50$ ve $\beta=2.5$ yük durumu için sistem ve yük karakteristikleri.

Yük karakteristiği: $P_{yük}=nP_1V^{0.50}$ başlangıç koşulları gerilim için 1.05p.u. ve güç için 0.6 p.u. alınmıştır. Yük eğrisi “a” $n=1$ için, “b” $n=1.4$ için.

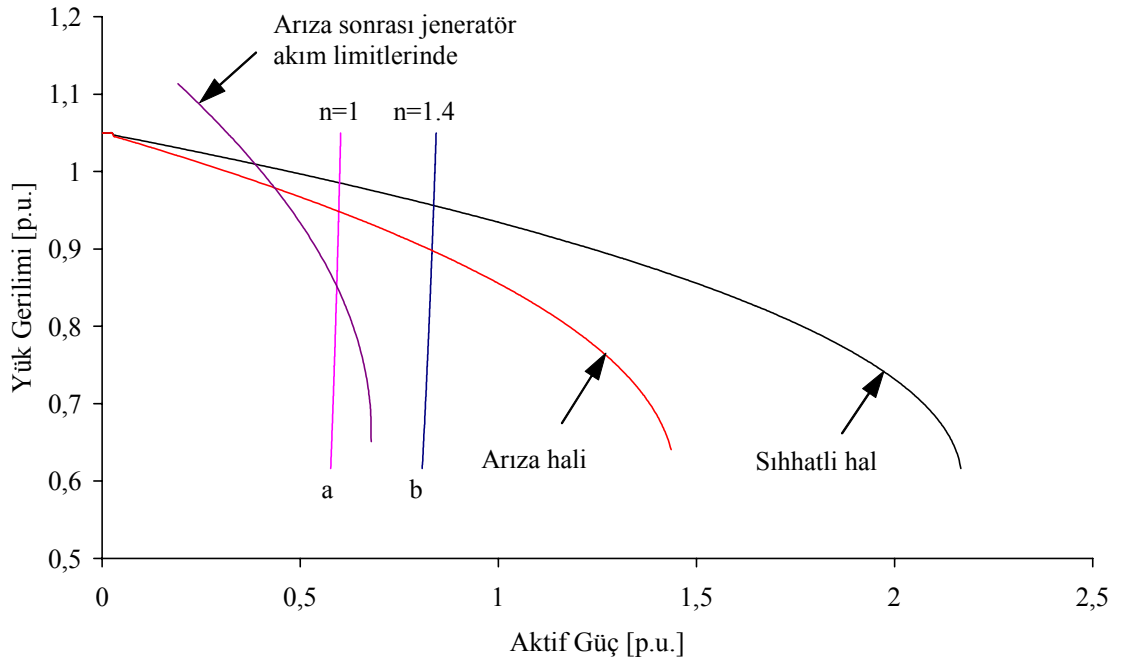
Bu üç sistem karakteristiği: (1) arıza öncesi (pre-disturbance), (2) arıza sonrası (post disturbance) jeneratör akım limitlerinden önce, (3) arıza sonrası bazı jeneratörlerde akım limitleri ile birlikte [50, 52]. Jeneratör alan akım limitlerinin aşırı yük için cevabı, aşırı tahrik limitleri veya operatör müdahalesinden dolayı oluşur. Her sistem karakteristiğinin, üretim ve iletim sistemlerinin uzun dönem güç transfer kabiliyetini gösteren bir maksimum güç noktası vardır.

Şekil 2-13 $\alpha=0.50$ ve $\beta=2.5$ yük durumu için iki farklı yük karakteristiğini de gösterir. İki yük karakteristiği: Başlangıç yük karakteristiği ve daha ağır yük şartlarını simule etmek için kullanılmakta olan 1.4 kat daha fazla olan bir yük olarak düşünülmektedir. Arıza sonrası gerilim düşecek ve yük karakteristiği arıza sonrası sistem karakteristiklerinden biri ile kesişecektir. Gerilimdeki bu düşüş alçak gerilim tarafının ayarlı trafolarla düzeltilmesine kadar direnç yükünü azaltacaktır. Eğer burada ayarlı trafo yok ise veya ayarlı trafolar limite iseler, yük iletkenliği termostatik olarak kontrol edilen yükler veya diğer sabit enerjili yükler için artacaktır.

Ayarlı trafo ve jeneratör akım limitlerinin hesaba katılması ile çalışma noktası yüklerden biri için çok alçak gerilimlere doğru iner. Bir çalışma noktasının kaybı gerilim çöküşünü başlatır. Eğer bozucu etki şiddetli kısa devreler içeriyorsa, sistemde bulunan motorlar tekrar hızlanamayabilir.

2.8.2 Ocak Fanları $\alpha=0.08$ ve $\beta=1.6$ durumu

Şekil 2-14 Ocak Fanları için $\alpha=0.08$ ve $\beta=1.6$ durumuna karşı gelen eğrileri göstermektedir. a ve b eğrileri için yük eşitliği $P_{yük}=nP_1V^{0.08}$ dir.

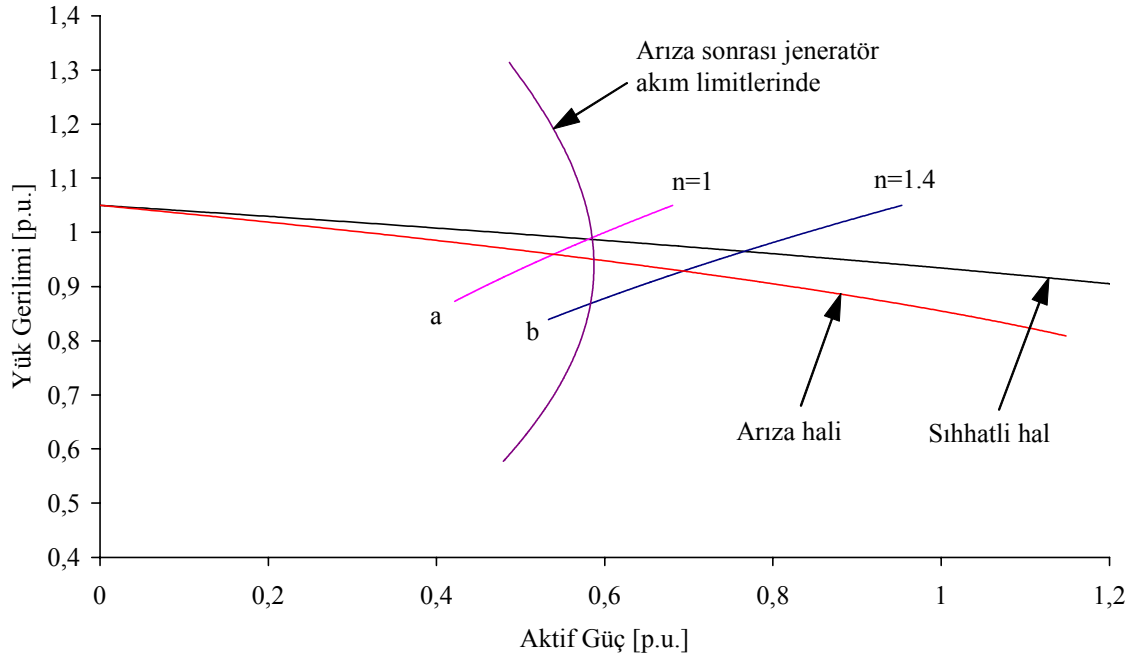


Şekil 2-14: $\alpha=0.08$ ve $\beta=1.6$ yükü için sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P_{yük}=nP_1V^{0.08}$. Yük eğrisi “a” $n=1$ için, “b” $n=1.4$ için.

Yük a için jeneratör akım limitlerine gelindiğinde artık yük eğrisi sistem eğrisi ile daha kritik bir noktada kesişir. Bu da sistemi artık daha kritik bir noktada çalışmaya zorlar. Yük eğrisi b için jeneratör akım limitleri ile verilen sistem karakteristik eğrisi ile kesişim noktası çok alçak gerilim değerleri için gerçekleşmektedir.

2.8.3 Batarya Şarj Aletleri $\alpha=2.59$ ve $\beta=4.06$ durumu;

Aşağıdaki şekilde batarya şarj aletleri için sistem ve yük eğrilerinin grafikleri verilmektedir. Burada $\alpha=2.59$ ve $\beta=4.06$ olarak alınmıştır.

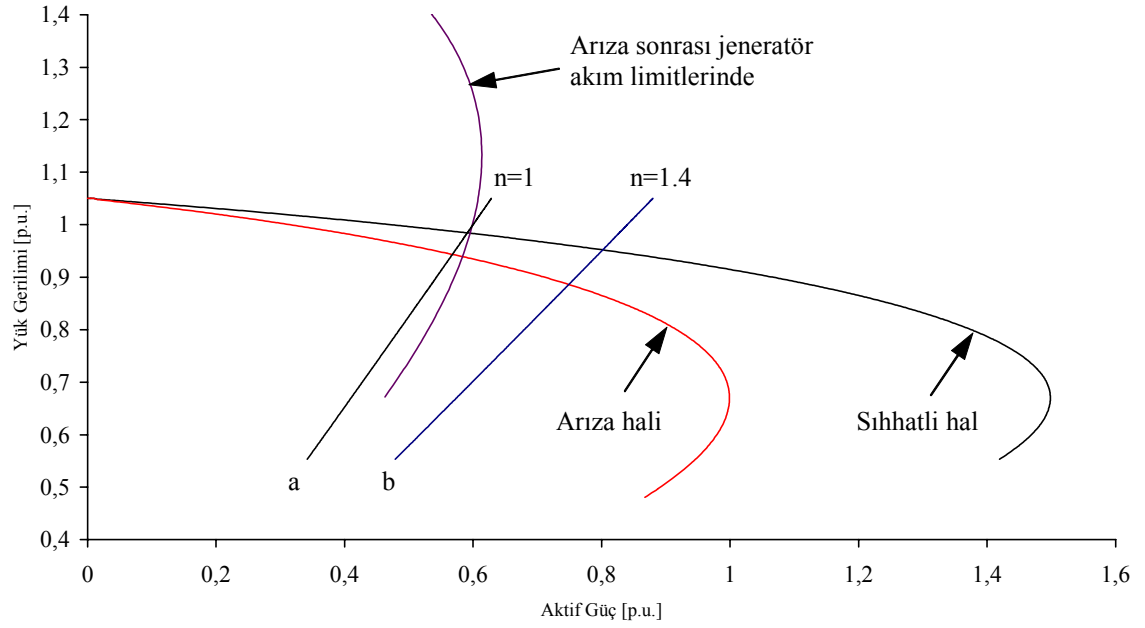


Şekil 2-15: $\alpha=2.59$ ve $\beta=4.06$ yükü için sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P_{yük}=nP_1V^{2.59}$. Yük eğrisi “a” $n=1$ için, “b” $n=1.4$ için.

Burada, gerek arıza durumunda gerekse jeneratör akım limitlerinde çalışma durumlarında da her iki yük eğrisi için kararlı bir çalışma noktası mevcuttur. Her halükarda yük a için çalışma şartları daha sıhhatli ise de yük b için daha da kritik bir noktada da olsa kararlı bir çalışma noktası mevcuttur.

2.8.4 Elektronik Florasanlar $\alpha=0.95$ ve $\beta=0.31$ durumu;

Diğer bir yükümüzde yukarıdaki tabloda verilen elektronik florasın yüklerdir. Aşağıda sistem ve yük eğrileri verilen şekilde $\alpha=0.95$ ve $\beta=0.31$ olarak alınmıştır.

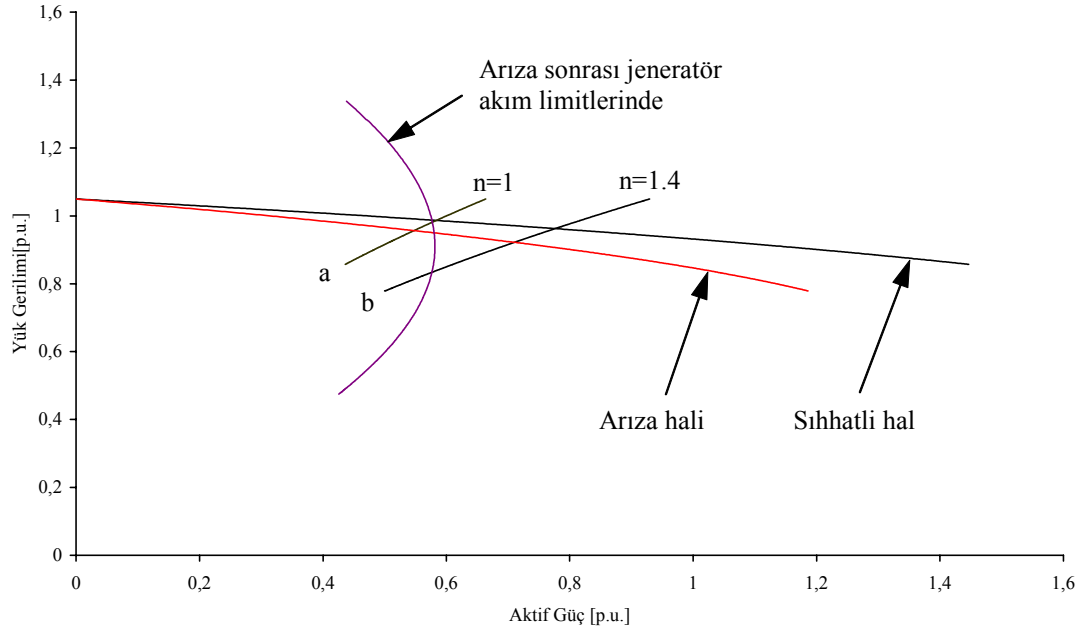


Şekil 2-16: $\alpha=0.95$ ve $\beta=0.31$ yükü için Sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P_{yük}=nP_1V^{0.95}$. Yük eğrisi “a” $n=1$ için, “b” $n=1.4$ için.

Şekil 2-16’da görülen elektronik florasın yüklerde de sistem çalışma noktaları açısından sıkıntılı olduğu görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi yük b için jeneratör akım limitlerinde çalışma noktası çok alçak gerilim değerlerinde olduğu için kararlı çalışma noktası yoktur. Yük a içinde mevcut çalışma noktası oldukça kritik bir değerdedir.

2.8.5 Normal Florasanlar $\alpha=2.07$ ve $\beta=3.21$ durumu;

Tabloda verilen son yük modelimizde normal florasın yükleri tanımlamaktadır. Burada da $\alpha=2.07$ ve $\beta=3.21$ olarak alınmıştır.

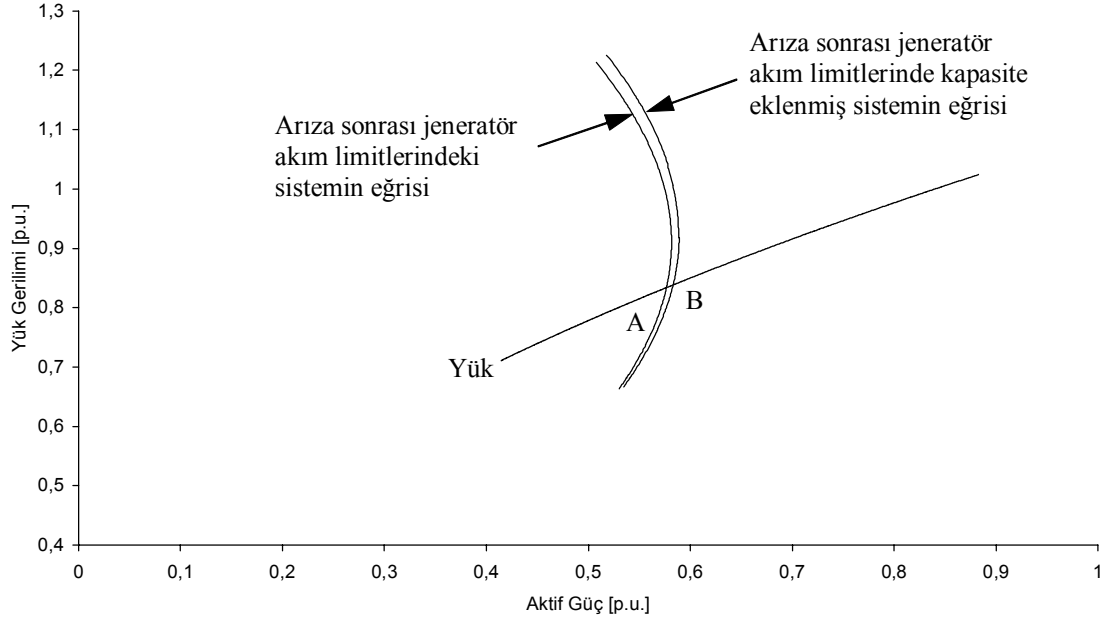


Şekil 2-17: $\alpha=2.07$ ve $\beta=3.21$ yükü için Sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P_{yük}=nP_1V^{2.07}$. Yük eğrisi “a” $n=1$ için, “b” $n=1.4$ için.

Normal florasın yüklerin, elektronik florasın yüklere göre çalışma şartlarının çok daha sıhhatli olduğu şekillerden görülmektedir. Her iki yük durumu için, hem arıza durumunda hem de jeneratör akım limitlerin de sistem eğrileri ile kararlı bölgede kesişme mevcuttur. Fakat yük a için daha sıhhatli bir noktada olan çalışma şartları, özellikle jeneratör akım limitlerinde yük b için çok daha kritik bir noktaya taşınmıştır.

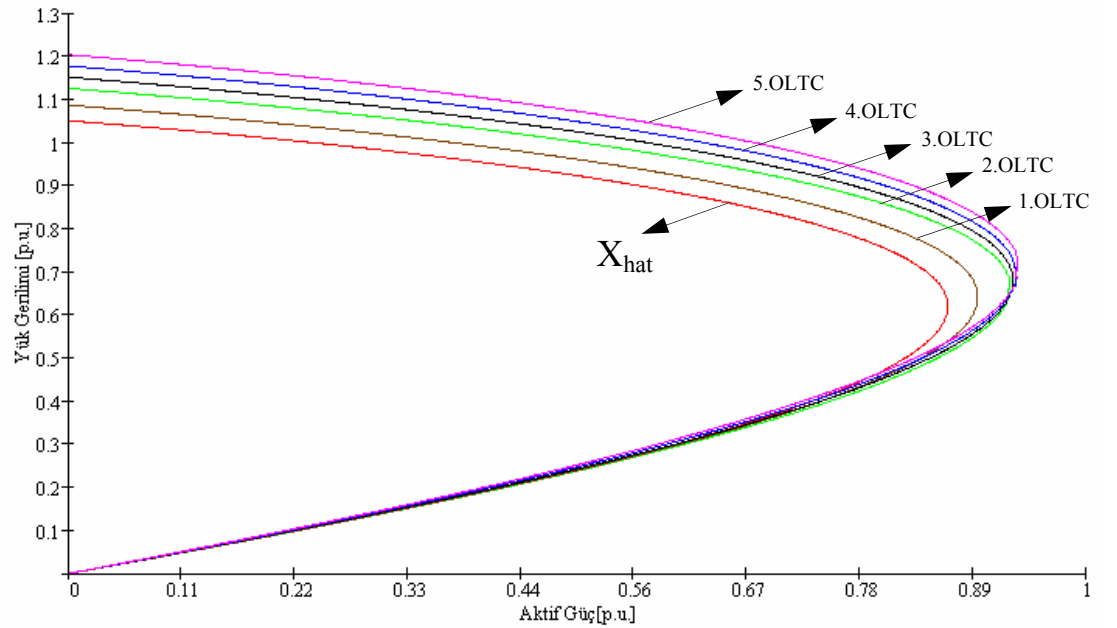
2.8.6 MSC ve OLTC’lerin devreye eklenmesi ve çıkarılmasının etkisi

Şekil 2-8’de gösterilen farklı güç faktörleri için P-V eğri grubunda, P-V eğrinin dip kısmında iken bir kapasitör grubunu ekleme veya çıkarmanın etkisini analiz edebiliriz. Şekil 2-18 gösterir ki bir kapasitör grubu, çalışma noktasını **A** dan **B** ye taşır. Gerilim ve güç arttırılır. Gerilim/reaktif güç performansı normaldir.



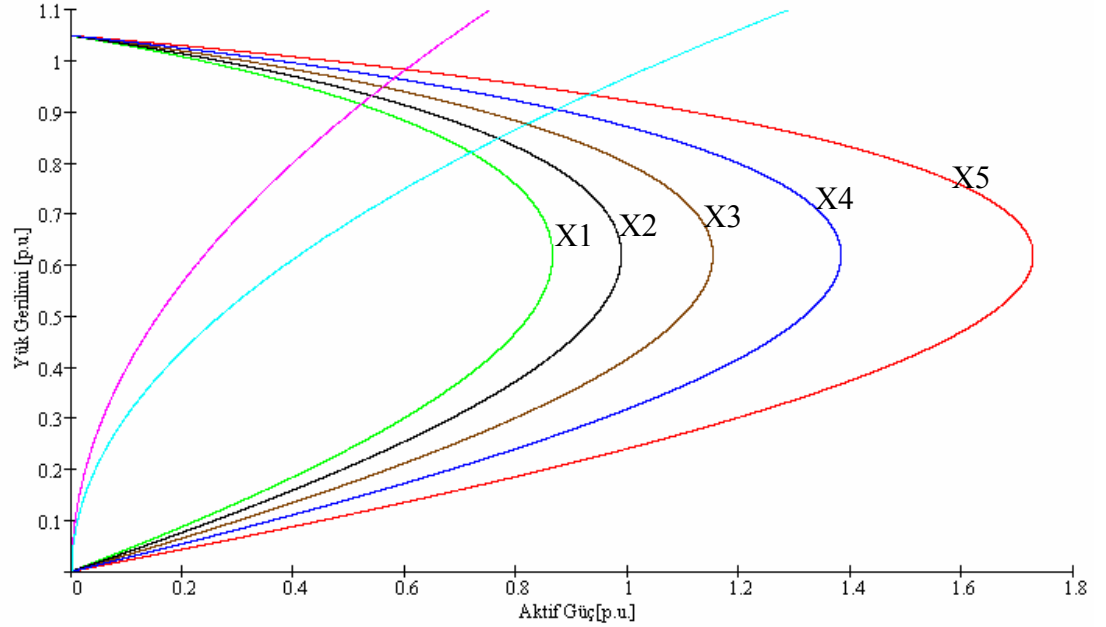
Şekil 2-18: Yüksek gerilim hassasiyetli yükler ile P-V eğrisinin alt kısmında kapasitör grubunun eklenmesinin etkisi.

Kapasitör eklenmesi daha yüksek gerilimde kesişme sağlar. P-V eğrinin dip kısmındaki kararlı çalışma ve kapasitör ekleme çıkarma etkisi zaman domeni simülasyonu tarafından kontrol edilir veya burada daha sonra yapılacağı gibi yarı dinamik analizler ile sistemin davranışı izlenebilir.



Şekil 2-19: Sisteme OLTC eklenmesinin etkisini gösterir sistem eğrileri.

OLTC eklenmesinin etkisinin gösterildiği Şekil 2-19'da görülmektedir ki OLTC eklendiği zaman özellikle sistemin yüksek gerilim kısmında gerilim seviyesi yükselmektedir. Şekilden çok iyi görülmemekle birlikte bunu alçak gerilim kısmı için her zaman söylemek ise çok doğru olmayacaktır.



Şekil 2-20: Farklı hat reaktansları için P-V eğriler.

Şekil 2-20'de farklı hat reaktansları için sistem eğrisinin nasıl bir cevap sergilediği görülmektedir. Burada şunu özellikle vurgulamak gerekir hat reaktansında ki değişimler sistem eğrisini olumlu veya olumsuz yönde etkileyecektir. Hat reaktansı büyüdükçe sistem şartları daha kritik bir noktaya taşınmaktadır.

Bir sonraki bölümde sisteme MSC ve OLTC eklenmesinin yanı sıra hat reaktansındaki değişimin nasıl etki yaptığı detaylı olarak incelenecektir.

2.9 Sonuç

Gerilim kararlılığının iki tipini anlattık: Transient gerilim kararlılığı ve uzun dönem gerilim kararlılığı. Gerilim hassasiyetli yük modellerini de içeren uzun dönem gerilim kararlılığı geçtiğimiz yıllarda en büyük ilgiyi çekti.

Gerilim kararlılığı, yük, iletim ve büyük güç sistemlerinin üretim alt sistemlerini içerir. Gerilim kararlılığının üç temel parametresi ile analiz edilmeli;

1. Şebeke empedansı ve eşdeğer devre,

2. Jeneratörlerdeki ve şebekelerdeki gerilim kontrolü için kullanılan metodlar,
3. Üretim noktasından tüketim noktasına iletilen güç, özellikle reaktif güç iletimi,
4. Tüketim merkezindeki gücün gerilim karakteristiği.

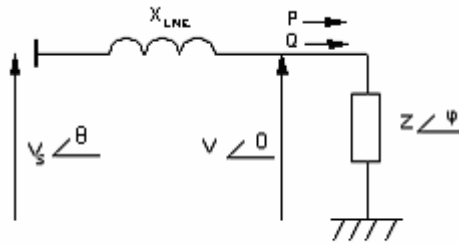
Gerilim kararsızlığı ve çökmesi dinamik ve normalde bir yük kararsızlığıdır. Şebekenin steady-state yüklenebilirlik limiti (bir P-V eğrisindeki maksimum güç noktası) gerilim kararsızlık limiti olması gerekli değildir. Ancak statik güç akışından rahatsızlık sonrası elde edilen steady-state analizler, uzun dönem gerilim kararlılığı için faydalı bir metottur.

3. P-V VE Q-V EĞRİLER

3.1 Giriş

Bu çalışmaya temel oluşturacak radyal bir sistemde sistemin davranışını incelemek için kullanılacak olan P-V ve Q-V eğrileri bu bölümde ele alınmıştır. Bu bölümün amacı, paralel hatlardan birinin devreden çıkması gibi ana problemlerden biri gerçekleştiğinde sistemin karakteristiğini belirleyen eğriler üzerindeki değişiklikleri gözlemektir. Buna ilave olarak; gerilim düşümünü düzeltmek için devreye alınan gerilim regülasyonu hareketlerinin sonucundan da bahsedilecek, bu hareketlerin modelleri çıkarılacaktır.

Saf reaktif hatla beslenen, sabit gerilimli (V_s) ve Z empedansına sahip bir yük ile tasarlanan radial sistem, çalışma konusu olarak seçilmiştir (Şekil 3-1). Sistem karmaşık olsa da yük davranışını analiz etmek için bu eşdeğere indirgenebilir [53].



Şekil 3-1: Radyal şebeke

Bilindiği gibi, sistem karakteristiğini temsil eden P-V ve Q-V eğrileri, hatbaşı gerilimi ve yükün güç faktörünü sabit tutarak, yük ile hat sonundaki gerilimin değişimini ifade eden eğriler ile belirlenmektedir. Bu karakteristikler ilk kez [54]'de, Fransız sistemindeki gerilim çökmelerinin sebeplerini açıklamak için kullanılmış ve aktif olarak [50]'de anlatılmıştır.

Şekil 3-1 analiz edildiğinde, yük ucundaki gerilim V , yük ucunda çekilen aktif ve reaktif güç P ve Q 'nun fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

Şekilde verilen radial hat için temel devre formülü yazılırsa;

$$\bar{V} = \bar{V}_s - jX_{HAT} \bar{I}$$

Hat sonundaki kompleks güç;

$$S = P + jQ = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{V} \frac{\bar{V}_s^* - \bar{V}^*}{-jX_{HAT}}$$

Hat sonu gerilimin açısı sıfır kabul edilecek ve hat başı gerilimin açısı θ olarak düşünülürse;

$$S = \frac{j}{X_{HAT}} (V_s V \cos \varphi + j V_s V \sin \varphi - V^2)$$

Buradan aktif ve reaktif güç ayrı ayrı yazılırsa bilinen yük akışı denklemleri elde edilir;

$$P = \frac{-V_s V}{X_{HAT}} \sin \varphi \quad Q = -\frac{V^2}{X_{HAT}} + \frac{V_s V}{X_{HAT}} \cos \varphi$$

Denklemden sinüslü ve kosinüslü ifadeler çekilir ise;

$$\sin \varphi = \frac{-PX_{HAT}}{V_s V} \quad \cos \varphi = (Q + \frac{V^2}{X_{HAT}}) \frac{X}{V_s V}$$

$$(\frac{-PX_{HAT}}{V_s V})^2 + (\frac{QX_{HAT}}{V_s V} + \frac{V^2}{V_s V})^2 = 1$$

Payda eşitlenip gerekli düzenlemeler yapılnca denklem aşağıdaki hale gelecektir;

$$P^2 X_{HAT}^2 + Q^2 X_{HAT}^2 + 2QX_{HAT} V^2 + V^4 = V_s^2 V^2$$

Bu denklem aşağıdaki gibi ikinci dereceden bir denklem halinde düşünülebilir,

$$(V^2)^2 + (2QX_{HAT} - V_s^2)V^2 + (P^2 + Q^2)X_{HAT}^2 = 0$$

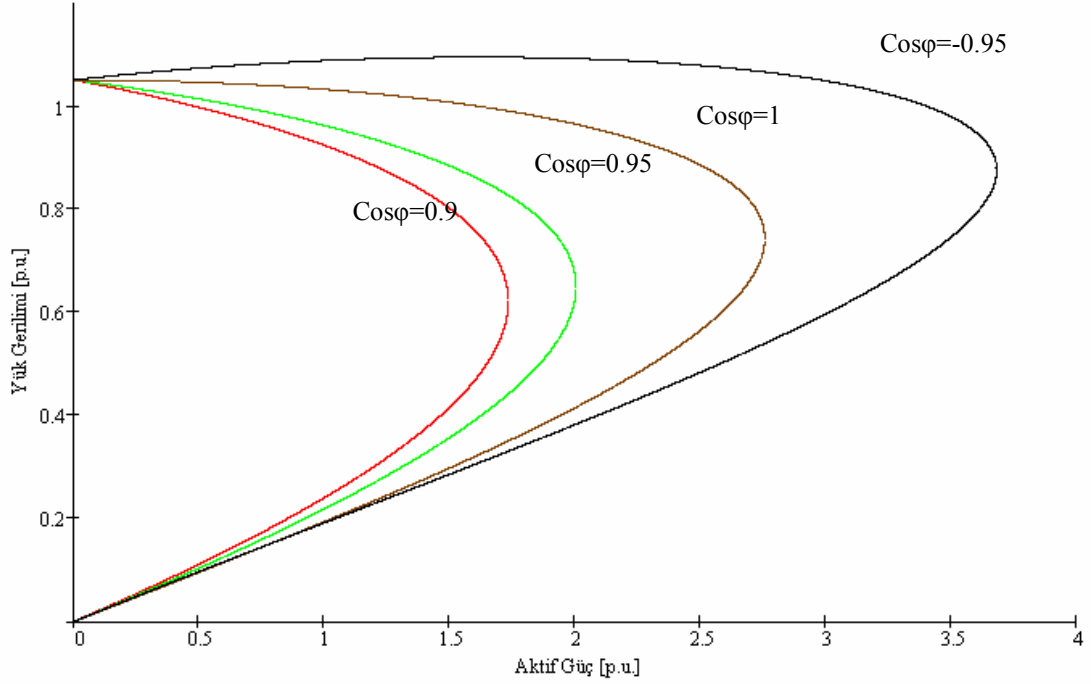
Bu ikinci dereceden denklem çözüldüğünde aşağıdaki kökler elde edilir.

$$V^2 = \frac{-(2QX_{HAT} - V_s^2) \mp \sqrt{(2QX_{HAT} - V_s^2)^2 - 4(P^2 + Q^2)X_{HAT}^2}}{2}$$

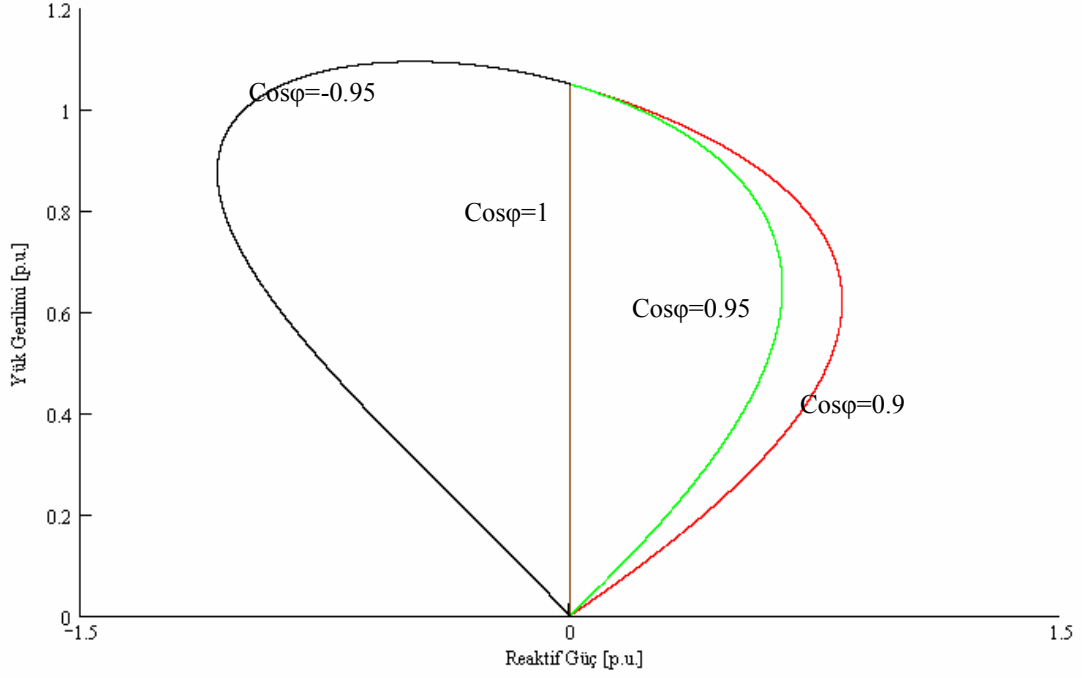
Hat sonu gerilimi P ve Q'ya bağlı olarak yazılabilir;

$$V(P, Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(V_s^2 - 2QX_{HAT} \mp \sqrt{(2QX_{HAT} - V_s^2)^2 - 4X_{HAT}^2 (P^2 + Q^2)})} \quad (1)$$

V_s gerilimi 1.05 p.u'da sabit tutularak yükün farklı güç faktörleri için (1) kullanılarak hesaplanan P-V ve Q-V eğrilerinin örnekleri sırasıyla Şekil 3-2 ve Şekil 3-3'de verilmiştir. Denklem (1)'de yer alan $\pm$ işaret dikkate alınarak ve toplama şeklinde ifade edilen terim çizilen eğrinin üst kısmını, çıkartma şeklinde yazılanı da alt kısmını hesaplamakta kullanılır.



Şekil 3-2: Farklı yük güç faktörleri için P-V eğrilere örnekler



Şekil 3-3: Farklı yük güç faktörleri için Q-V eğrilere örnekler

Bu şekillerden görüleceği gibi yük uçlarındaki gerilimin değişimi her bir güç katsayısı için belirlenebilmektedir.

Aktif ve reaktif güç yükün belirli bir empedans değerinde maksimum olurlar, bu değerler aşağıdaki şekilde yazılabilirler;

$$P_{\max} = \frac{\cos \phi V_s^2}{(1 + \sin \phi) 2 X_{HAT}} \quad Q_{\max} = \frac{\sin \phi V_s^2}{(1 + \sin \phi) 2 X_{HAT}}$$

Bu denklemler (1) formülünde yerine konulursa;

$$V_{\max P, \max Q} = \sqrt{\frac{V_s^2}{2} - \frac{\sin \phi V_s^2 X_{HAT}}{(1 + \sin \phi) 2 X_{HAT}}} \mp \sqrt{\frac{V_s^4}{4} - \left(\frac{\cos \phi V_s^2}{(1 + \sin \phi) 2 X_{HAT}}\right)^2 X_{HAT}^2 - \frac{\sin \phi V_s^2 X_{HAT} V_s^2}{(1 + \sin \phi) 2 X_{HAT}}}$$

Bazı sadeleştirmelerden sonra;

$$V_{\max P, \max Q} = \sqrt{\frac{V_s^2}{2(1 + \sin \phi)}} \mp \sqrt{\frac{V_s^4}{4(1 + \sin \phi)^2} [1 - (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi)]}$$

Denklemin ikinci kısmı sıfır olur;

$$V_{\max P, \max Q} = \sqrt{\frac{V_s^2}{2(1 + \sin \phi)} \frac{1 - \sin \phi}{1 - \sin \phi}}$$

Yukarıda yapılan işlemlerden ve bazı sadeleştirmelerden sonra;

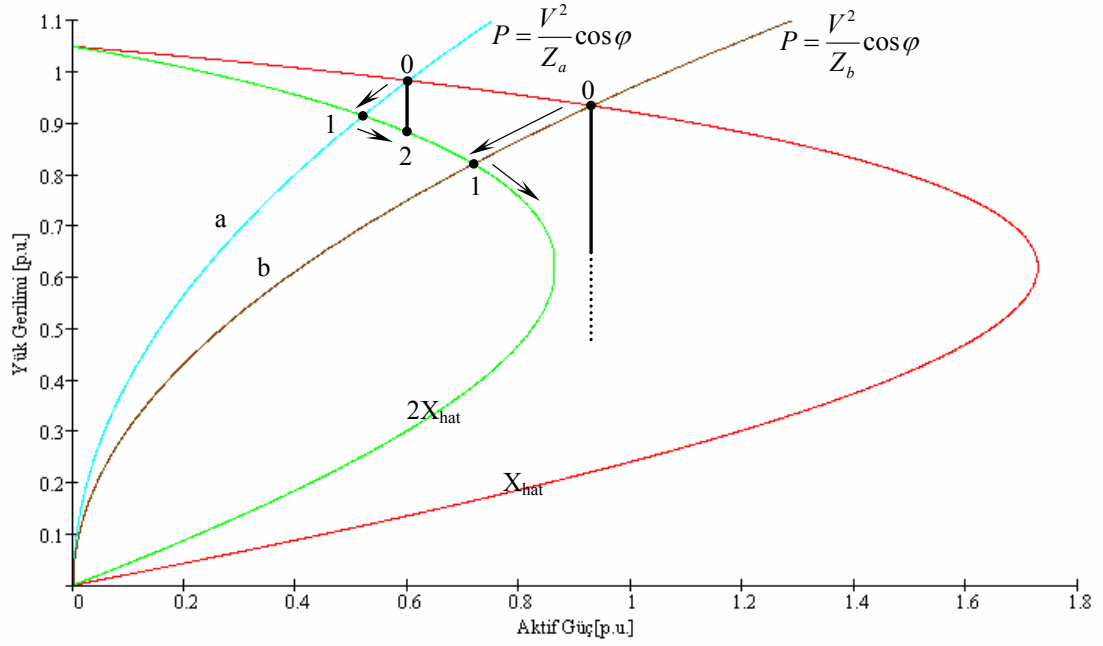
$$V_{\max P, \max Q} = \frac{V_s}{\cos \theta} \sqrt{\frac{1 - \sin \theta}{2}} \quad (2)$$

Denklem (2) göstermektedir ki herhangi bir sistemde aktif ve reaktif yükü azami yapan gerilim değeri hat reaktansından bağımsızdır. Eğer yükün aktif ve reaktif gücü ile gerilimin ilişkisi varsa sistemin çalışma noktası; yük karakteristiğiyle, sistem karakteristiğinin kesişiminden grafiksel olarak bulunabilir. Sabit empedans statik yük karakteristikleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir, burada eşdeğer empedans Z ve güç faktörü açısında φ ile ifade edilmektedir.

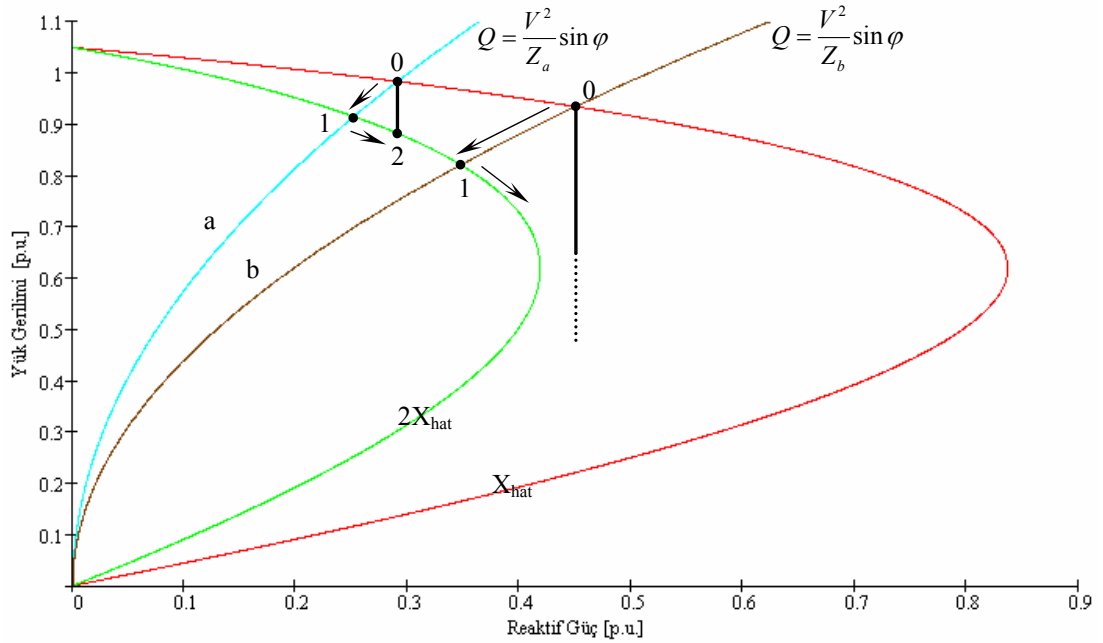
$$P = \frac{V^2}{Z} \cos \varphi \quad Q = \frac{V^2}{Z} \sin \varphi \quad (3)$$

Yük karakteristikleri a ve b eğrileriyle gösterilen yük empedansının iki değeri için Şekil 3-4 ve Şekil 3-5’de hesaplanmıştır. Burada a eğrisindeki Z ’nin değeri b eğrisinin karakteristik değerlerinden daha yüksektir. Yani a eğrisi daha küçük bir yükün ifadesidir.

Yük 0.9 geri güç faktörüne sahip iken yükü besleyen iki iletim hattından birinin kaybı durumunda hat reaktansının iki katına çıkması beklenir ve buda Şekil 3-4 ve Şekil 3-5’de gösterilmektedir. Bu durumda hattın iletebileceği azami güç miktarı azalacak olsa bile, bu noktaya ait gerilim denklem (2)’de görüldüğü gibi hattın reaktansından bağımsız olduğu için değişikliğe uğramayacaktır. Aslında, aynı gerilim değeri dP/dV ve dQ/dV ’nin türevlerinin sıfır olduğu (dikey tanjant) noktada gerçekleştiği de gösterilebilir.



Şekil 3-4: Hat reaktansının farklı değerleri ve yük güç faktörü=0.9 için P-V eğrileri a, b: farklı empedans değerleri için yük karakteristikleri



Şekil 3-5: Hat reaktansının farklı değerleri ve yük güç faktörü=0.9 için Q-V eğrileri a, b: farklı empedans değerleri için yük karakteristikleri

Sabit empedans statik yük için hat reaktansındaki değişim, şekilde görüldüğü gibi çalışma noktasını 0'dan 1'e doğru değiştirir. Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi; herhangi bir arıza anında gerilim seviyesi sistemde kabul edilebilir en düşük seviyeye inse bile, sistem karakteristiğiyle yük karakteristiği arasında her zaman bir

kesişim vardır. Ancak yeni denge noktası farklı bir gerilim ve güç değerindedir. Fakat, dinamik yük düşünüldüğünde bu kesişim her zaman var olamayabilir. Farz edilen sabit empedans karakteristiği, bu durumda yükün transient davranışı olarak ifade edilebilir [31, 36, 55]. Yük karakteristiği örneğin sabit MVA yükü için artık a veya b eğrisi değil düz bir çizgidir. Bu durumda sistem geçici bir süre için 0-1 yolunu sabit empedans eğrisi üzerinden takip eder, daha sonra yük tabiatı gereği P-V ve Q-V eğrisi üzerinden 2 yolunu takip ederek yeni bir çalışma noktasına ulaşır. Bu noktada artık arıza öncesi gerilim olmamakla birlikte arıza öncesi güç mevcuttur. Bu durumda Yük b için arıza durumundan sonra yük a'daki 2 noktası gibi bir stabil çalışma noktasının bulunamayacağı Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'den gözlenebilir. Şayet en bilinen tedbirlerden olan kompanzasyon sistemlerinin (MSC) devreye girmesi ve yük altında gerilim ayarlayabilen regülatörlerin çalışması (OLTC) gibi herhangi bir karşı tedbir alınmaz ise, yük b için sistemin transient cevabı neticesinde çalışma noktası 0'dan 1'e hareket edecek ve daha sonra sistem gerilim çökmesine doğru gidecektir [55].

3.2 Farklı Gerilim Hassasiyetli Yükler İçin P-V Ve Q-V

Eğrileri

Birçok durumda yükün aktif ve reaktif büyüklüklerinin gerilime karşı hassasiyetleri farklılık gösterebilir. Genel bir yaklaşım ile; farklı aktif ve reaktif güç hassasiyetli yükün davranışı hesaba katılabilir [56, 57, 58].

Mesela literatürlerde çok iyi bilinen yükün steady-state güç gerilim karakteristiğini ifade için kullanılan üstel modelleri ele alalım. Literatürde birçok farklı yük modeli bulunmaktadır ve bunların detaylı bir mukayesesi [3]'da yer almaktadır. Bu çalışmada yüksek dereceli polinomların yük modelleri için daha uygun olduğu belirtilmekle birlikte üstel gösterimin sabit empedans ve sabit güç modellerine göre daha güvenilir olduğu gösterilmiştir.

$$P = P_0 \frac{V^\alpha}{V_0^\alpha} \quad Q = Q_0 \frac{V^\beta}{V_0^\beta} \quad (4)$$

V_0 genelde 1p.u. olarak seçilir, ve P_0 ve Q_0 bu gerilimde ki sabit anma güçlerdir.

Her V değerinde, yük bir empedans ile ifade edilebilir;

$$P = P_0 \frac{V^\alpha}{V_0^\alpha} = \frac{V^2}{Z(V)} \cos \varphi(V) \quad \text{ve} \quad Q = Q_0 \frac{V^\beta}{V_0^\beta} = \frac{V^2}{Z(V)} \sin \varphi(V) \quad (5)$$

P_0 ve Q_0 , birim gerilim V 'de ve $V_0=1$ p.u. civarında iken hesaplanırsa yukarıdaki formül şu şekilde ifade edilebilir,

$$P = P_0 = P_1 = \frac{\cos \varphi_1}{Z_1} \quad \text{ve} \quad Q = Q_0 = Q_1 = \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} \quad (6)$$

Burada '1' indisi, $V=1.0$ p.u.'de güç faktörü ve empedansın hesaplanmış değerini gösterir. Şöyle ki; anma empedansları ve anma güç faktörleri $V = 1.0$ p.u.iken anma güce karşılık gelir.

$$Z_1 = \frac{1^2}{|P_1 + jQ_1|} \quad \text{ve} \quad \cos \varphi_1 = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right] \quad (7)$$

Böylece formül (5)'i aşağıdaki gibi ifade etmek mümkün olacaktır,

$$P = \frac{\cos \varphi_1}{Z_1} V^\alpha = \frac{V^2}{Z(V)} \cos \varphi(V) \quad \text{ve} \quad Q = \frac{\sin \varphi_1}{Z_1} V^\beta = \frac{V^2}{Z(V)} \sin \varphi(V) \quad (8)$$

buradan,

$$Z(V) = \cos \varphi(V) \frac{Z_1}{\cos \varphi_1} V^{2-\alpha} \quad \text{ve} \quad Z(V) = \sin \varphi(V) \frac{Z_1}{\sin \varphi_1} V^{2-\beta} \quad (9)$$

(9)'da verilen formüller birbirlerinin yerine kullanılabilecek yapıdadırlar. Bu formüller üzerinde biraz çalışırsak,

$$\cos \varphi(V) = \frac{Z(V)}{Z_1} \frac{\cos \varphi_1}{V^{2-\alpha}} \quad \text{ve} \quad \sin \varphi(V) = \frac{Z(V)}{Z_1} \frac{\sin \varphi_1}{V^{2-\beta}}$$

ve bu iki ifade arasındaki oran;

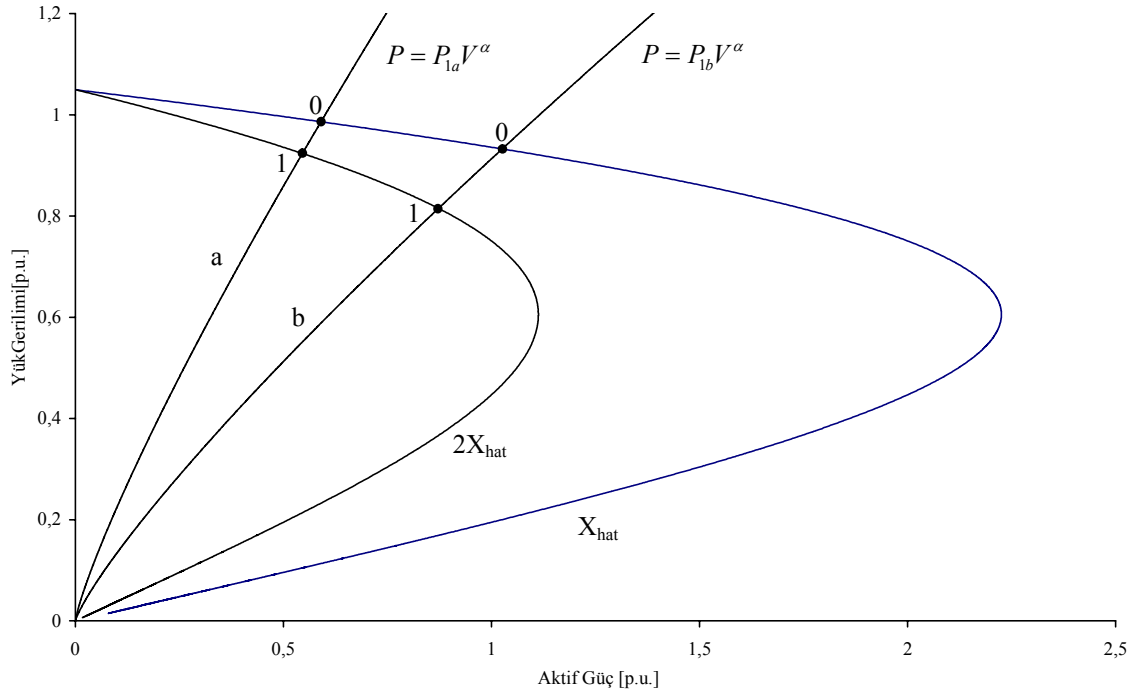
$$\tan \varphi(V) = \frac{\sin \varphi(V)}{\cos \varphi(V)} = \frac{\frac{\sin \varphi_1}{V^{2-\beta}}}{\frac{\cos \varphi_1}{V^{2-\alpha}}}$$

bu ifadeyi biraz sadeleştirdiğimizde aşağıdaki sonucu buluruz.

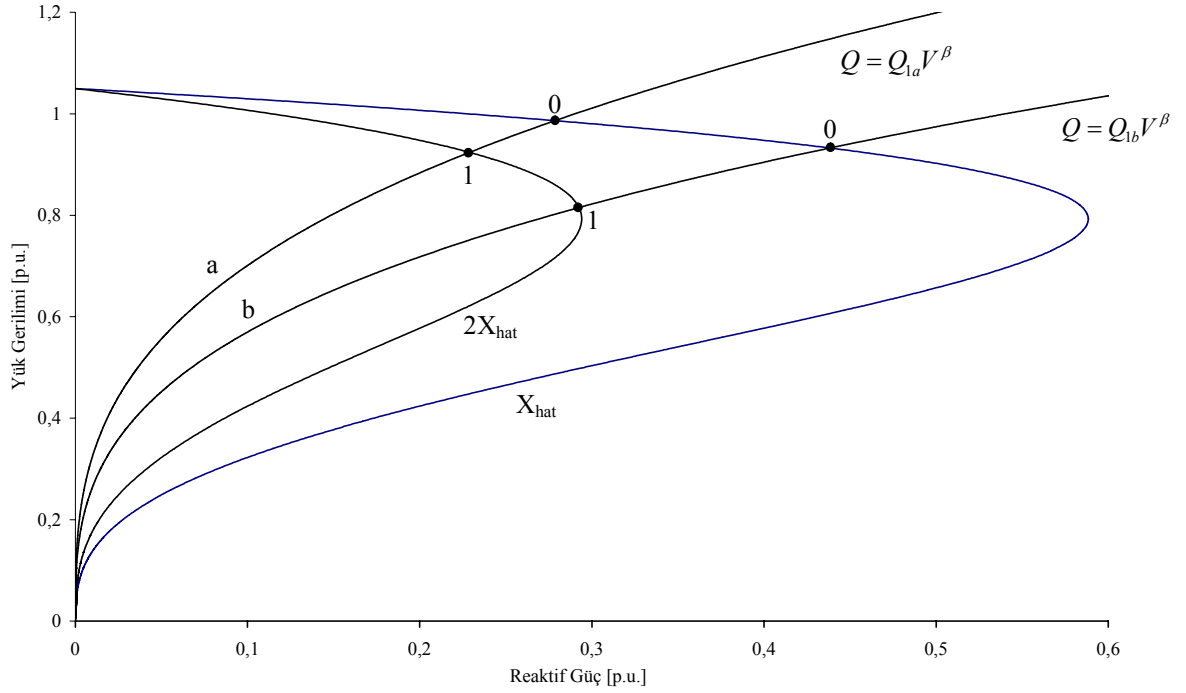
$$\tan \varphi(V) = \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} V^{\beta-\alpha} = \tan \varphi_1 V^{\beta-\alpha} \quad (10)$$

Bu durum α 'nın β 'dan farklı olduğu durumlarda güç faktörünün gerilime bağımlılığı göz önüne alınarak sistem karakteristiği çıkarılabilir.

Artık anlaşıyor ki; farklı gerilim-güç hassasiyetlerine sahip olan yükü besleyen P-V ve Q-V eğrileri artık sabit güç faktörü için hesaplanan eğriler ile aynı değildir. Yükün karakteristiği sistemin karakteristiğini etkilemektedir buna örnek olarak; $\alpha=1.2$ ve $\beta=3$ alınarak çıkartılan eğriler Şekil 3-6 ve Şekil 3-7'de gösterilmiştir. Bu değerler tipik bir endüstriyel dağıtım şebekesine ait yük hassasiyetleri olarak kabul edilebilir [3, 30, 59]. Artık bir önceki hesaplamada alınan Z değerleri burada $V=1$ p.u. ve $\cos\varphi=0.9$ için hesaplanan Z_1 değerine karşılık gelir.



Şekil 3-6: Farklı Gerilim ve Güç hassasiyetleri için P-V eğriler $\alpha=1.2$.



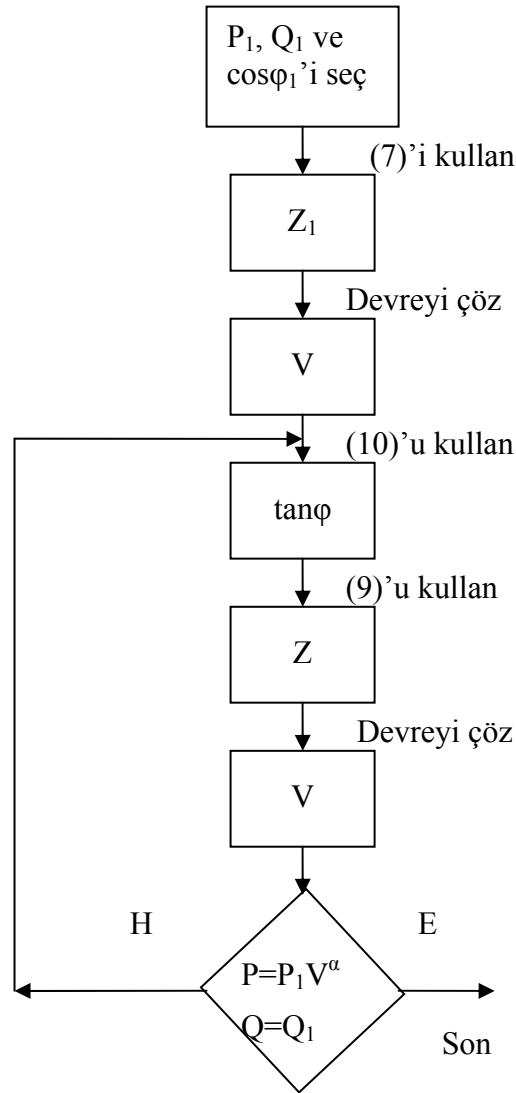
Şekil 3-7: Farklı Gerilim ve Güç hassasiyetleri için Q-V eğriler $\beta=3$ için.

Hat reaktansının iki katına çıkması durumu da burada bir kez daha gösterilmiştir. Şekillerde verilen yük karakteristikleri yine iki farklı yük durumu için verilmiştir. Şu belirtilmelidir ki; düşünülen yük modeli sadece oldukça dar aralıktaki gerilim değerlerinde tipik olarak $\pm\%10$ anma gerilim civarında geçerli olduğu için, anma gerilim değerleri dışındaki olayların yorumlanmasında dikkat edilerek kullanılmalıdır.

İki gerilim indisinin (α ve β) birbirine eşit olmadığı durumdaki Şekil 3-6 ve Şekil 3-7'den görülebiliyor ki; aktif ve reaktif güç limitlerine tekabül eden gerilim değerleri birbirinden farklıdır. Reaktif güç limitine aktif güç limitine ulaşmadan önce ulaşılır. Yani daha yüksek bir gerilim değerinde reaktif güç limitine ulaşılmaktadır. Bu α ve β arasındaki farklılıktan dolayıdır, gerçek hayatta da β , α 'dan büyüktür. Reaktif gücün gerilime aşırı bağıllığı bilinmektedir. Burada verilen şekiller [60]'de analitik olarak ifade edilenin grafik olarak açıklamasıdır.

Denklem (10) incelendiğinde, $\alpha=\beta$ için gerilim değiştiği zaman güç faktöründe değişiklik yoktur ve aynı gerilim için aktif ve reaktif güç limitlerine ulaşılır. Bu durum göstermektedir ki; aynı P-V ve Q-V eğrilerinin sabit empedans-admitans yük ($\alpha=\beta=2$) ve sabit MVA yük için kullanılması doğrudur ($\alpha=\beta=0$) buda Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'de gösterilmiştir. Farklı α ve β değerleri için eğriler Şekil 3-8'deki akış

diyagramı düşünülerek, MATLAB programında hazırlanan bir rutin ile elde edilmiştir .



Şekil 3-8: Farklı Gerilim-yük hassasiyetli α ve β yükler için P-V ve Q-V eğrileri elde etmekte kullanılan rutinin akış diyagramı.

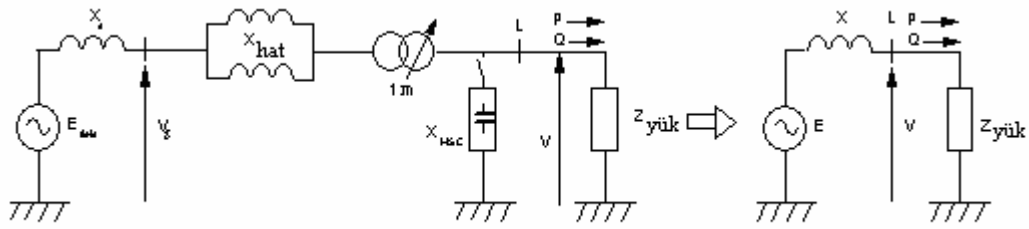
Farklı yük modelleri de, örneğin polinomal modellerde, (4),...(10) denklemlerinin uygun modifikasyonlarıyla rutine yerleştirilebilmektedir.

3.3 Çeşitli Cihazların Etkilerini Göstermek İçin Eğrilerin

Kullanılması

P-V ve Q-V eğrileri, bir yük tarafından bakıldığında çeşitli olaylar esnasında sistemin nasıl davranacağını incelemek için kullanılabilir. Bu olaylar; hat açması gibi bir arıza olduğunda, arıza sonrası gerçekleşen bir seri önleyici tedbiri de içerebilir. Bu önleyici tedbirler OLTC'lerin devreye girmesi, mahalli kompanzasyon (MSC) sistemlerinin çalışması şeklinde olabilir.

Her bir durumun modellenmesi için yük ucundan görülen Thevenin eşdeğerinin kullanılması yeterlidir. Durumu daha iyi gösterebilmek için radyal şebeke ile beslenen basit bir yük Şekil 3-9'da gösterilmiştir.



Şekil 3-9: Bölgesel gerilim regülatörlü bir radyal güç sistemine ve yük düğümü L'den görülen Thevenin eşdeğerine örnek.

Sistemdeki kompanzasyon sistemi (Mechanically Switched Capacitor) iki kapasitif basamağa sahip ve bölgesel olarak reaktif güç ürettiği düşünülür. OLTC ise belirli seviyede gerilimi ayarlamak için kullanılır.

Jeneratör tarafından üretilen reaktif güç sınırına ulaşılmadığı sürece V_s gerilimi sabit kalır, limit gerilim senkron reaktans X_d 'nin arkasındadır ve kalıcı durum analizleri için X_d sabit düşünülebilir.

Yük ucu L'den görülen Thevenin eşdeğeri Şekil 3-9 referans alınarak, eşdeğer gerilim E ve eşdeğer reaktans X, burada çalışılan duruma göre aşağıdaki değerler olarak alınır.

i) Sıhhatli şebeke için:

$$E = V_s \quad \text{ve} \quad X = X_{HAT}$$

ii) MSC eklenmesi:

Gerilim bölme kullanılarak

$$E = V_s \frac{X_{MSC}}{X_{MSC} + X_{HAT}}$$

ve yük tarafından görülen Thevenin eşdeğeri

$$X = \frac{X_{HAT} X_{MSC}}{X_{HAT} + X_{MSC}}$$

iii) Yalnızca OLTC eklenmesi:

$$E = V_s m \quad \text{ve} \quad X = m^2 X_{HAT}$$

iv) MSC ve OLTC'nin birlikte eklenmesi:

Gerilim bölme kullanılırsa,

$$E = V_s \frac{m}{1 + m^2 \frac{X_{HAT}}{X_{MSC}}}$$

Yük tarafından görülen eşdeğer devre OLTC'nin off nominal settingi dikkate alınarak yazılır.

$$X = \frac{m^2 X_{HAT} X_{MSC}}{m^2 X_{HAT} + X_{MSC}}$$

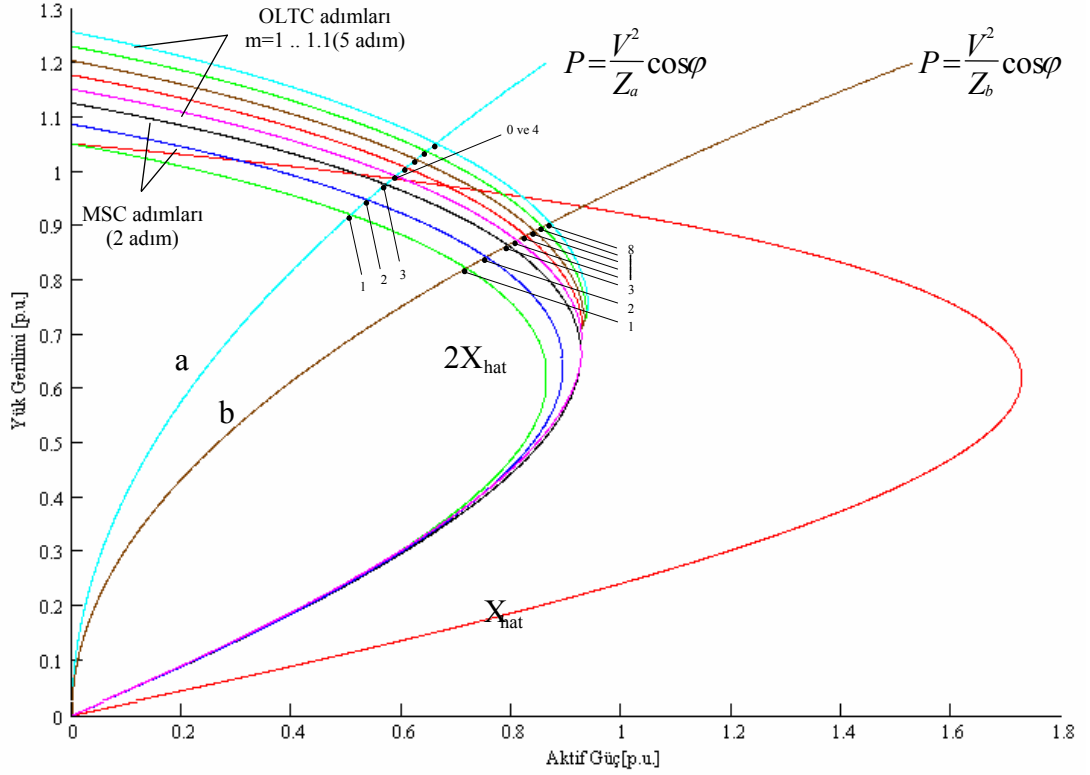
v) Durum iv)'e jeneratör reaktansının eklenmesi

$$E = E_{field} \frac{m}{1 + m^2 \frac{X_{HAT} + X_d}{X_{MSC}}} \quad \text{ve} \quad X = \frac{m^2 (X_{HAT} + X_d) X_{MSC}}{m^2 (X_{HAT} + X_d) + X_{MSC}}$$

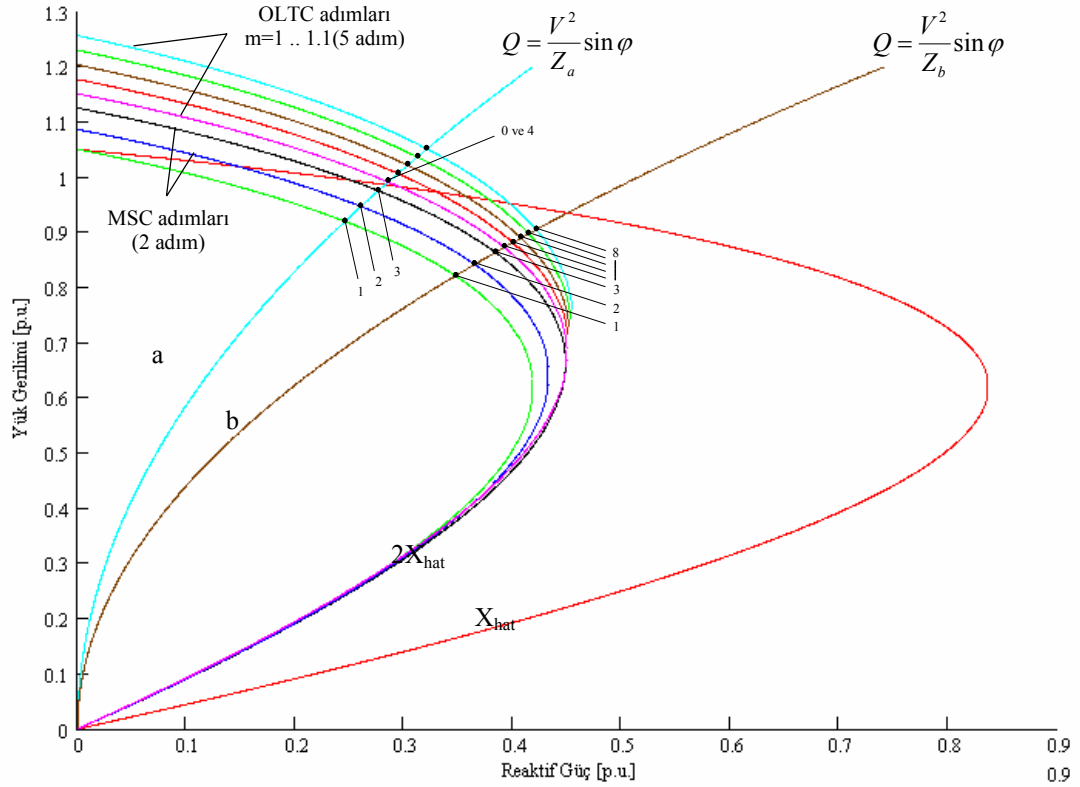
Son durum için artık jeneratör terminalinde gerilim sabit değildir. Fakat alan sargısı uygulanan gerilim sınırına dayanmıştır ve sabit alınır. Bu düşüncelerden ve P-V, Q-V eğrilerinden yola çıkarak, verilen durumun, gerilim kararlılığı açısından ne kadar kritik olduğu, daha sonra nasıl bir eğilim göstereceğini, P-V ve Q-V düzleminin neresinde olduğunu anlamak için bu farklı çalışma şartlarını göstermek mümkün olacaktır.

Şekil 3-9'da görülen iki radial hattın birinin açılması arıza durumu olarak farz edilir. Bu, Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'de görüldüğü gibi sistemin daha kritik şartlarda

çalışmasına neden olur. Sistemin aktif ve reaktif güç iletebilme kapasitesi şimdi daha da azdır, bu da sistem karakteristiği ve yük karakteristiği arasındaki kesişim noktasının yeni çalışma noktasının sistem limitine daha da yaklaşmasıyla sonuçlanır yada diğer bir ifade ile aktif ve reaktif güç limitlerinde azalma görülür. Bu durum iv) deki ilişkinin çözülmesinden elde edilen eğrilerle Şekil 3-10 ve Şekil 3-11’de gösterilmiştir.



Şekil 3-10: Sabit empedans yükler için P-V eğrileri; MSC ve OLTC adımları ile birlikte gösterimi.



Şekil 3-11: Sabit empedans yükler için Q-V eğrileri; MSC ve OLTC adımları ile birlikte gösterimi.

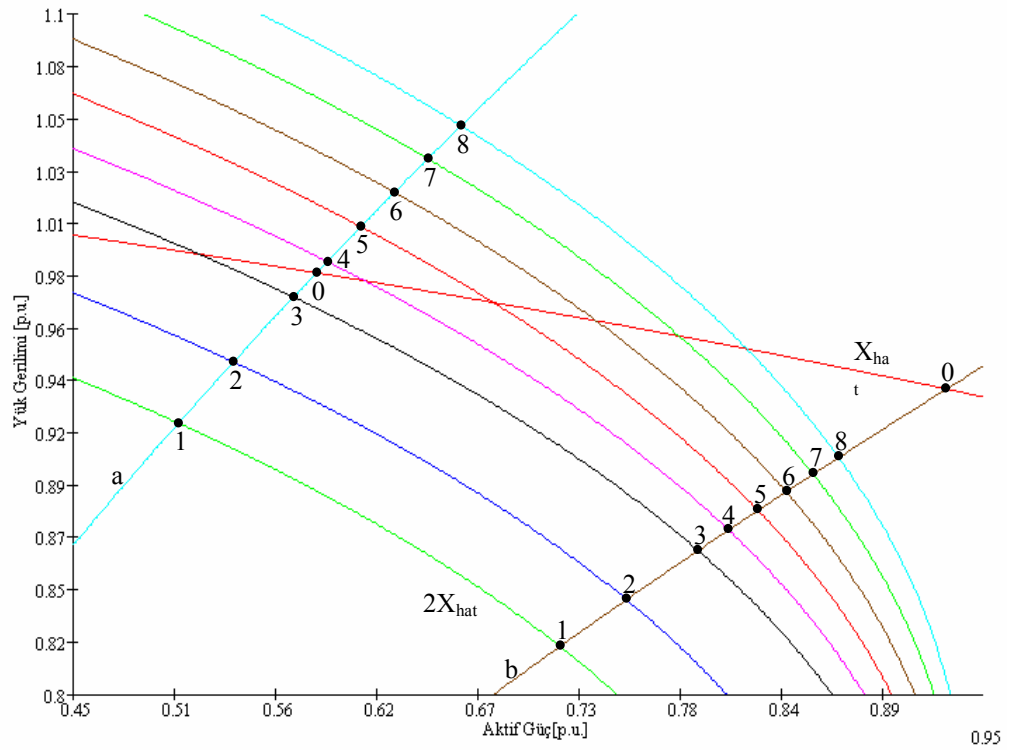
Arızadan sonra, her iki a ve b yükü için, operasyon noktası 0'dan 1'e kayar kayma esnasında transient yol 0-1, genellikle yük karakteristiği ile çakışan sabit empedans karakteristiğiyle belirlenir.

Yükün sabit empedans karakterine sahip olduğu farz edilirse, ne aktif nede reaktif gücün değerinin tekrar eski konumuna gelmesinin mümkün olmadığı söylenebilir, fakat yük dinamik karakterliyse yük arıza öncesi değerine ulaşmaya çalışacaktır (bu durum Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'de izah edilmiştir). Sabit empedans karakterli yükler için gerilim ve gücün bozulmadan önceki değerlerine (0 noktası) bir dış etmenin zorlaması ile ulaştırılabilir. Bozulan gerilimi eski değerine getirmek için iki MSC adımının eklenmesini takiben OLTC hareketi Şekil 3-10 ve Şekil 3-11'de modellenmiştir.

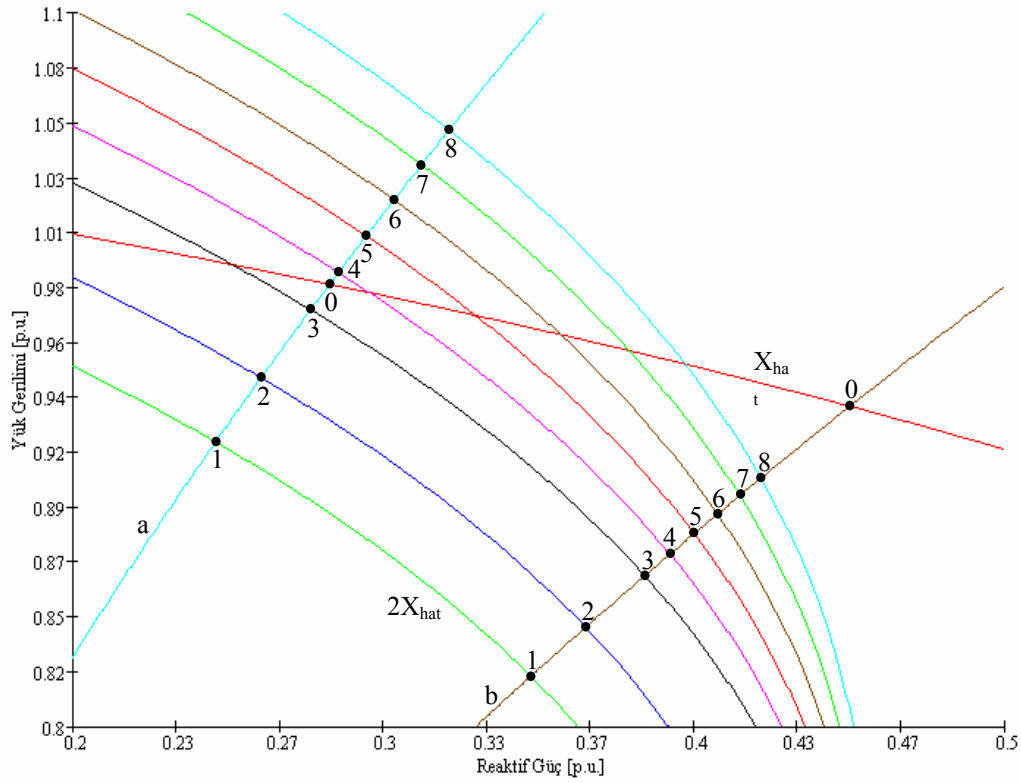
Yükün yapısından dolayı anlık bir zaman aralığında sistem "1" noktasında çalışıyor iken birinci MSC devreye girdiğinde bir zaman gecikmesi olur ve çalışma noktası "1" de kalmaya devam eder, bu gecikme diğer ara çalışma noktaları içinde geçerli olur. Bundan dolayı, sistem, sistem eğrileri ve yük karakteristiği arasındaki kesişmelerden oluşan ara durumun üzerinde hareket eder ve 1-0 yolunu izleyerek ilk

bozulma anındaki değerine tekrar yaklaşır (a yükü için 1 ile 4 noktalarına bakın, b yükü için 1 ile 8 noktalarına bakın).

Aşağıdaki şekillerde Şekil 3-10 ve Şekil 3-11’de görülen grafiklerin daha iyi anlaşılması için a ve b eğrisi ile sistem eğrilerinin kesişim noktaları büyütülerek gösterilmiştir. Burada a ve b yükü için MSC ve OLTC hareketlerinin etkileri daha iyi bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3-12: Şekil 3-10’da verilen eğrideki MSC ve OLTC adımlarının detaylı gösterimi



Şekil 3-13: Şekil 3-11’de verilen eğrideki MSC ve OLTC adımlarının detaylı gösterimi

İlk MSC adımı eklendiği zaman, çalışma noktası 1’den 2’ye hareket eder, daha sonraki kapasitif basamağın eklenmesinden sonra sistem 3 nolu noktaya taşınır. Şekilde görülen b eğrisiyle belirtilen diğer yüke bakılırsa, bu yükte MSC adımlarının eklenmesinin daha az etkili olduğu gözlemlenir, çünkü burada gerilimde daha az bir artış olmaktadır (a ve b yükleri için 1 ve 3 noktalarındaki gerilimler arasındaki farklılığa bakınız).

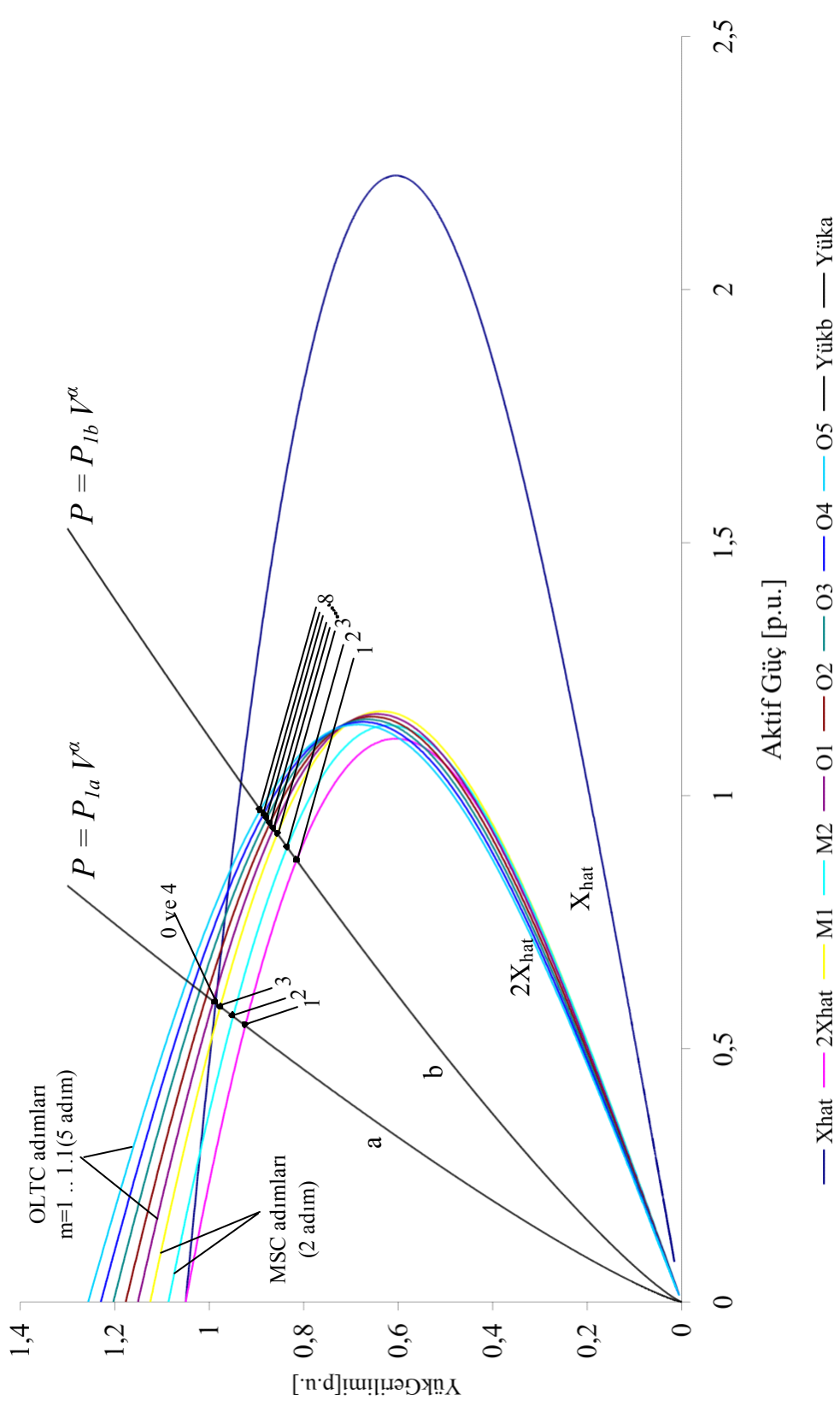
Bir OLTC adımı, arıza sonrası gerilimi tekrar 0 noktasında ki değerine getirmek için imkan sağlar; bu cihazlar genellikle ± 5 basamağa sahip olarak tasarlanırlar ve her birinin 0.02 p.u./p.u. değeri kabul edilebilir (daha gerçekçi bir değerle, mesela %5/8 kullanılabilir, fakat gösterilmek istenende hiçbir değişiklik olmaz). Düzenleme aralığı $\pm 10\%$ olursa, m’nin oranı 0.9 ile 1.1 p.u./p.u. aralığında olur. Bu çalışmada yalnızca artan basamaklar ve bu aralığın üst kısmı hesaba katılmıştır.

Yük a için, sistemi aktif ve reaktif güç bakımından arıza öncesi çalışma noktasına getirmek için MSC eklenmesi ve ardından bir OLTC adımı yeterlidir (a eğrisindeki 4. noktaya bakın). b yükü için ise her iki hareket yani MSC ve OLTC

eklenmesi sistemi eski durumuna geri getirmek için yeterli değildir. Çünkü 8 noktası 0 noktasından daha aşağıdaki bir gerilim seviyesindedir.

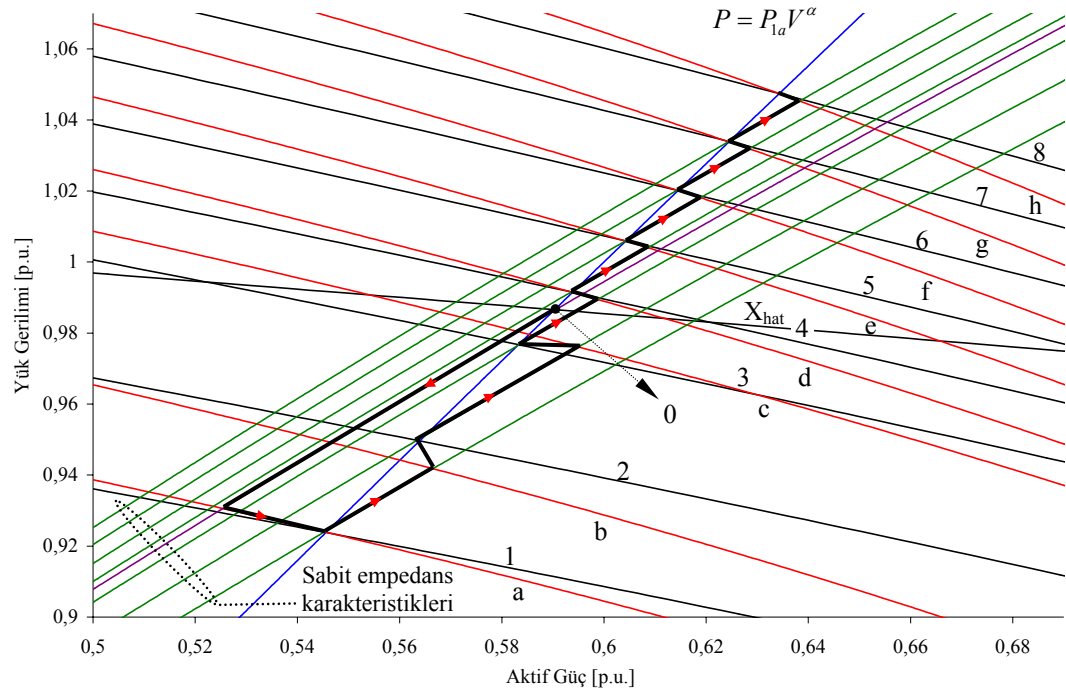
b yükü için daha az etkili olsada OLTC ve MSC hareketlerinin nasıl olduğunu gözlemlemek ilgi çekici olacaktır. Gerçekte şartların kritik noktaya yakın olması OLTC adımlarının pozitif olmasına yani yükseltilmesi beklenmesine rağmen artan OLTC adımlar için gerilim düşüşü gözlemlenebilir [61].

Eğer yük, farklı güç-gerilim hassasiyetlerine sahip ise sistem ve yük karakteristikleri farklı olur, buna örnek olarak Şekil 3-14 ve Şekil 3-15’de görülebilen MSC ve OLTC hareketleri düşünülebilir.

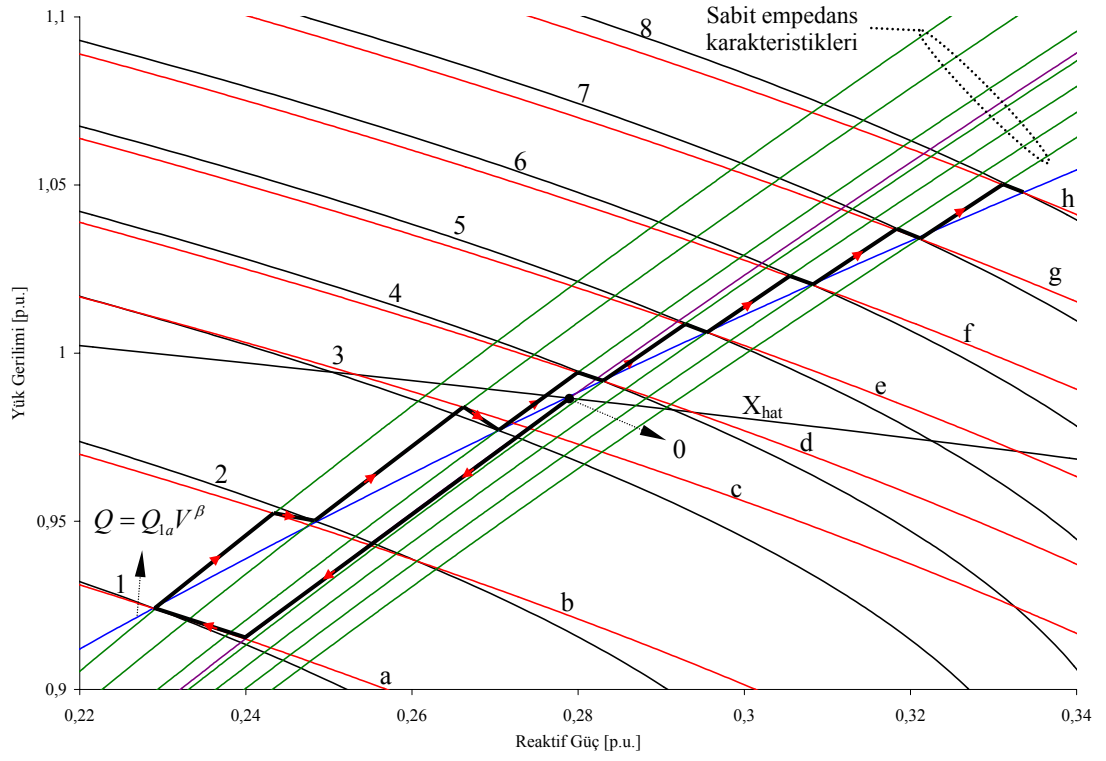


Şekil 3-14: Sabit empedans yükler için P-V eğrilerin MSC ve OLTC adımları ile birlikte gösterimi. Yükün güç-gerilim hassasiyetleri $\alpha=1.2$ $\beta=3$

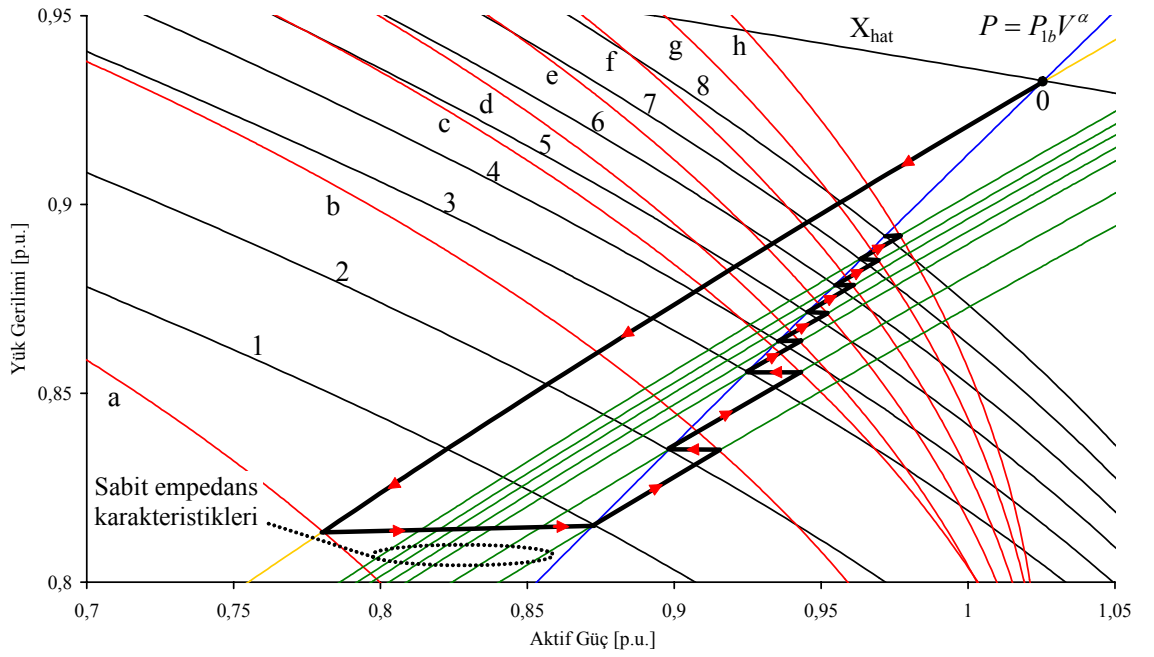
Ancak bu durum da sistemin davranışını daha iyi analiz edebilmek için dinamik yük yapısı modele dahil edilebilir. Yük a için P-V eğrisinin dinamik yolu Şekil 3-16'da ve Q-V eğrisinin dinamik yoluda Şekil 3-17'de gösterilmiştir. Yük b için ise Şekil 3-18 P-V eğrisinin dinamik yolunu gösterirken Şekil 3-19'da Q-V eğrisi için dinamik yolu göstermektedir.



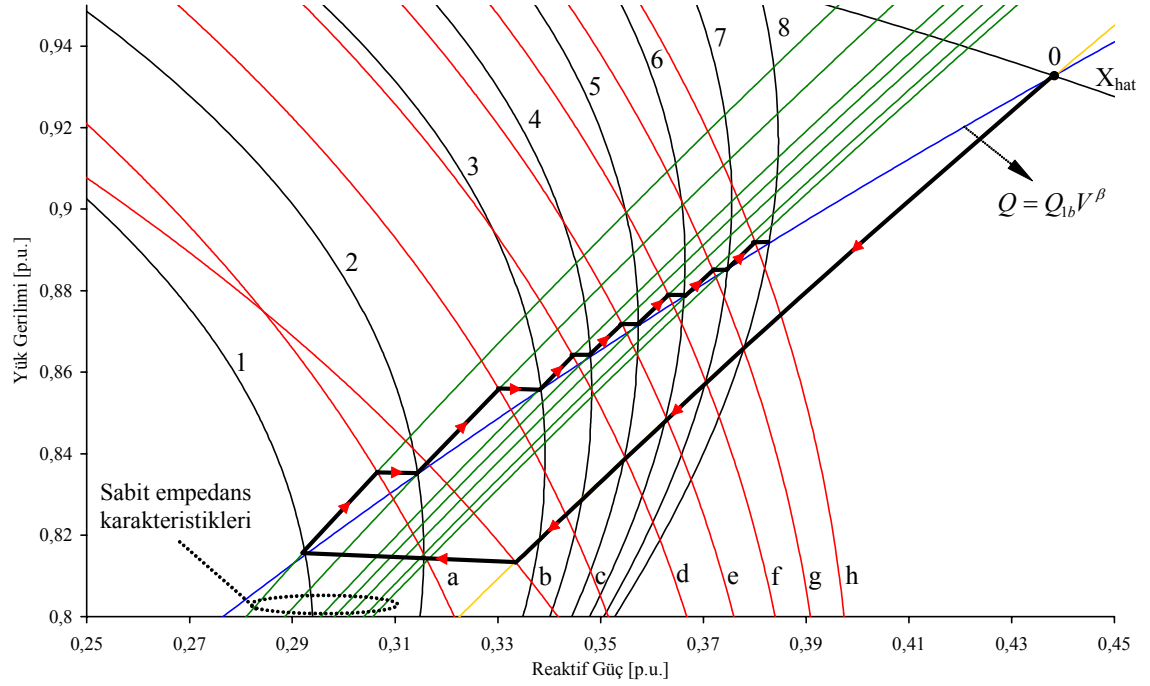
Şekil 3-16: Yük a için P-V düzlemde dinamik yol.



Şekil 3-17: Yük a için Q-V düzlemde dinamik yol.



Şekil 3-18: Yük b için P-V düzlemde dinamik yol.



Şekil 3-19: Yük b için Q-V düzlemde dinamik yol.

Mümkün olan dinamik yol, b yükü için Şekil 3-18 ve Şekil 3-19'da gösterildiği üzere P-V ve Q-V eğrileri yoluyla belirlenebilir.

Yük empedansı; arıza durumu, OLTC yada MSC basamağının eklenmesinden sonra, ani değişiklik gösteremez, bu da sistem çalışma noktasının belirli bir süre için, sabit empedans yük şartlarına göre hareket ettiğini gösterir, yine sabit empedans yük modeli için bu eğri ile sabit yük empedansı kullanılarak belirlenmiş sistem eğrisi arasında kesişim noktası elde edilebilir; bu eğriler şekillerde a,...h harfleri ile gösterilmiştir.

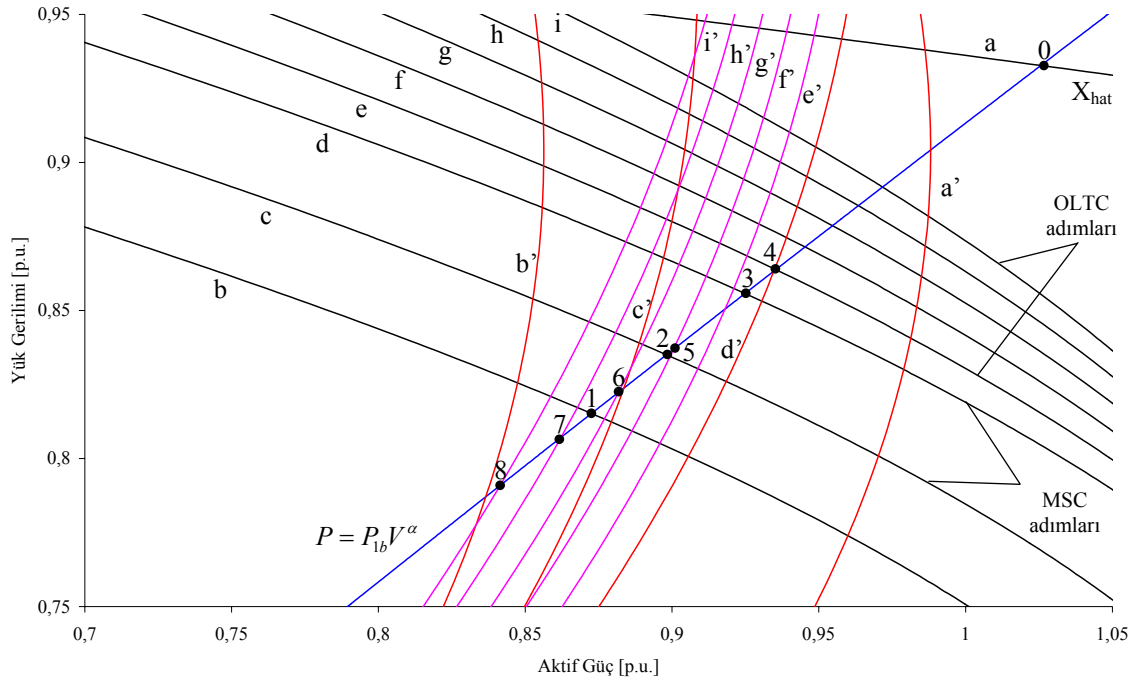
Belirli bir zaman sabitiyle çalışma noktası sabit empedans eğrisi üzerinden farklı gerilim hassasiyetleri ile belirlenmiş olan eğri üzerindeki kesişim noktasına hareket eder. Farklı gerilim hassasiyetleri için üretilen eğriler 1,...8 rakamları ile gösterilmiştir. Bu zaman sabitinin OLTC veya MSC'lerin devreye alınmasını sağlayan kontrol sisteminin zaman sabitinden küçük olduğu kabul edilirse ilk MSC adımı bu noktaya ulaşılmasından sonra devreye girer yine sabit empedans eğrisi boyunca çalışma noktası hareket eder ve ikinci MSC adımı gerçekleşmeden farklı gerilim hassasiyetler göz önüne alınarak belirlenen eğri üzerine kayar.

Çalışma noktasının hareket ettiği yol şekillerde işaretlenmiştir. Her kesişim noktasında hem aktif hemde reaktif güç için aynı gerilim değerlerinin elde edilmekte olduğu şekillerden görülmektedir.

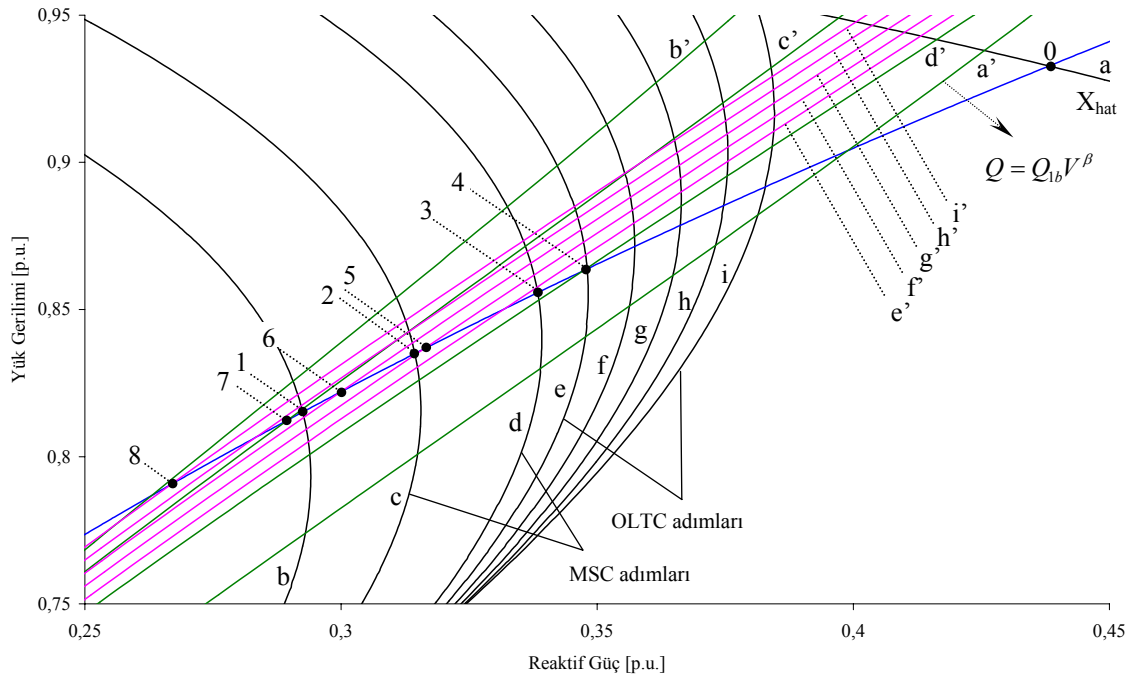
Transient çalışma noktası ve steady-state çalışma noktası arasındaki kayma, noktalar arasındaki düz çizgi ile gösterilmiştir. Açıktır ki uygun bir yük modeli kullanılarak yapılacak dinamik bir çalışma yükün takip ettiği gerçek yolu belirleyebilir [62]. Ancak unutulmamalıdır ki bu dinamik çalışmada farklı zaman sabitleri mutlaka hesaba katılmalıdır. Birçok durumda MSC ve OLTC gibi mekanik kontrol cihazlarının zaman sabiti, sistemin zaman sabitine göre çok büyük olduğu kabul edilebilir.

Göz önüne alınması gereken diğer bir etki ise, özellikle radial şebekede, iletim sisteminin üst tarafında çalışan makinalarından birinin limit değerlere ulaşmasından dolayı üretilen reaktif güçteki eksikliklerdir. Bu durumda operasyon noktası bir P-V, Q-V eğrisinin üst kısmından alt kısmına atlayabilir, Q-V ve P-V eğriler genelde jeneratör terminallerinden senkron reaktansın arkasındaki noktadaki sabit gerilimdeki değişim göz önüne alınarak hesaplanan eğrinin alt kısmıdır (Thevenin eşdeğeri v).

Bu durum Şekil 3-20 ve Şekil 3-21’de gösterildiği gibi yük b için ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3-20: Jeneratör reaktif gücü eklenmiş farklı yük gerilimi-güç hassasiyetli ve yük b için eğriler.



Şekil 3-21: Jeneratör reaktif gücü eklenmiş farklı yük gerilimi-güç hassasiyetli ve yük b için eğriler.

Bu eğride gösterilen $a',...i'$ eğrileri jeneratör reaktansı hesaba katılarak belirlenmiştir. $a,...i$ eğrileri ise reaktif güç limitleri hesaba katılmadan elde edilen eğrilerdir.

Çalışma noktası 0'da iken aktif ve reaktif güç limitlerine yakın bir noktada bulunmaktadır. (eğri a'). Hattın birinin açılmasından sonra reaktif güç eksikliği yok ise sistem 1 noktasına kayar. Şayet sistemde reaktif güç eksikliği var ise çalışma noktası 2 olarak gerçekleşir. Bu durum reaktif gerilim hassasiyetinin fazla olması sebebi ile Q-V eğrisinde daha da belirgindir. Sistemi tekrar eski durumuna taşımak için MSC ve OLTC'ler harekete başlayınca çalışma noktası sırasıyla 3-4-5...8 ile belirtilen noktalara kayar. Dikkat edilecek olursa MSC adımları sistemin gerilimini arttırıcı yönde etki yaparken OLTC adımları beklenenin aksine sistemi çalışma noktasından daha da uzaklaştırır. Gerilim çökmesinden kurtulmak için zayıf sistemlerde genellikle OLTC'ler kilitlenerek devre dışı bırakılmaktadır. Bu pratik bilhassa ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.4 Sonuç

Bu bölümde, sistem karakteristiğini belirlemek için kullanılan P-V ve Q-V eğriler incelenmiş, çeşitli yük sistem cihazları ile ilgili modeller geliştirilerek sisteme entegre edilmiştir. Büyük bir arızadan sonra sistemin davranışı bu cihazların etkileride dikkate alınarak modellenmiştir. Muhtelif düzeltici hareketlerin sistem üzerindeki etkileri görsel olarak izah edilmiştir. Sonuç olarak;

1. Yük davranışı gerilim kararlılığında etkilidir.
2. Yükün zaman sabitleri dikkate alınarak sistemin davranışı yarı steady-state analiz metodları ile incelenebilir.
3. MSC ve OLTC gibi cihazlar bir arıza sonrasında sistemi sağlıklı çalışma noktasına taşıyabilirler.
4. Sistemdeki reaktif enerji eksikliği sistemin eşdeğer devresinde uygun modifikasyonlar yapılarak modellenilebilir.

4. SİSTEM DURUMUNUN YEREL ÖLÇÜMLER İLE TAHMİNİ İÇİN METOTLAR

4.1 Giriş

Bir önceki bölümdeki şekillerden çok açık bir şekilde görülüyor ki Şekil 3-9'daki gibi radial sistemdeki paralel hatlardan birinin kaybı çalışma noktasını güç transfer limitine daha da yaklaştırdığı için sistem eskisine göre daha kritik bir noktada çalışır (Şekil 3-10, Şekil 3-11, Şekil 3-14, Şekil 3-15'in 1 noktası). Bu durumda yapılan bir seri operasyon ile sistem arıza öncesi duruma getirilmektedir. Bu durum, yani gerilimin eski değerine dönmesi sistemde yapılan gerilim ölçümleri ile belirlenebilir. Yerel olarak yapılacak gerilim ölçmeleri ölçüm yapılan noktaya göre şebekenin üst tarafında olan olayları anlamamızı sağlayabilir. Mesela; ani gerilim düşmeleri hat kaybını veya sistem empedansının yükselmesini gösterir. Benzer şekilde gerilim yükselmesi empedansın düşmesi veya büyük bir yükün devre dışı kalması anlamına gelebilir. Aslında, bölgesel elemanların müdahalesiyle yük noktasındaki arıza öncesi gerilimin düzeltilmesinin mümkün olduğu bir önceki bölümde gösterilmişti. Fakat, daha zayıf sistemlerin mahalli müdahaleler ile sürekli desteklenmesi sistemin yapısını yeniden arıza öncesi hali almasını sağlayamaz, hatta tam aksi yönde tesir edebilir [28]. Görülüyor ki; sadece gerilim seviyesinin gözlemlenmesinden elde edilen bilgilerin yanı sıra elde edilebilir diğer bilgileri de belirlemek sistemin sağlığına karar verebilmek için gereklidir. Bu bilgiler ışığında artık sistemi düzeltebilecek manevralar gerçekleştirilebilir veya bu manevralardan tamamen vazgeçilebilir.

Çalışma noktası hakkında sistemin güvenliğinin bir göstergesi, P-V ve Q-V eğrileri olarak sistem karakteristiklerinin bölgesel eğimlerinin değerleriyle belirlenmiştir. Tüm devre parametrelerinin hesaplanması ve sonra lineer sistemin Jacobian analizinden çıkan bir yük akış çalışmasının çözümüyle, verilen bir nokta için bu değer elde edilebilir [5, 63].

Gerilim kararlılığı analizleri için kullanılan bir çok metodun yanı sıra yeni uygulamalarda çokça kullanılan yapay zeka ve fuzzy-logic teknikleri ile ilgili

çalışmalarda geniş yer tutmaktadır. Bu çalışmalardan sonuç elde edebilmek için sistemin uzun süre izlenmesi ve yeterli veri kaydının yapılması gerekliliği gibi bir dez avantajı vardır. Yine kararlılık analizlerinde kullanılan sistemin depolanan enerjisinin analizleri ve özellikle bunun Liapunov Fonksiyonları ile yapılması yine son yıllarda yapılan çalışmalardandır.

Son yıllarda yaşanan gelişmeler bu yaklaşımlardan farklı olarak g sisteminin tüm verileri elde edilemediği zaman kullanılabilircek yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Bu düşünce ile yapılan bu çalışmada g sisteminin tüm verileri elde edilmeden bu analizler yapılmaya çalışılmıştır. Benzer bir düşünce ile yola çıkılarak hazırlanan [26]'deki çalışmada sistemin bir bölgesindeki bir yükün akımı ve bara gerilimi ölçülerek veriler elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak sistemin yük empedansı ile Thevenin empedansının karşılaştırılması ile gerilim kararlılığı analizleri yapılmıştır. Burada yük empedansı direk akım ve gerilim ölçümlerinden hesaplanabilirken, Thevenin empedansını hesaplamak için bazı n kabuller yapılmıştır. Bu n kabuller kararlılığa karar verirken bazı soru işaretlerini de beraberinde taşıtmaktadır. Bu metodun bir başka dezavantajı ise verileri elde etmek ve bunları kıyaslamak için uzun süreli monitrlemeye ihtiyaç duymasıdır.

Bazen, sistem hakkında yorum yapabileceğimiz verilere sahip olamayabiliriz veya sistem hakkında elimizde var olan veriler yeterli olmayabilir. Mesela; özelleştirilmiş sistemler de sahip olduğumuz dağıtım şebekesini çok iyi bilmekle birlikte st sistem hakkında bilgimiz sınırlıdır. İletim sağlayan şirket bu bilgileri saklayabilir. Bu tür durumlarda sistemin çalışma şartları hakkında yorum yapmamıza izin veren bir indikatörün belirlenmesi için bölgesel verilerden hareket etmek daha mantıklıdır.

Her gerilim düşmesinde, iyi analiz edilmeden bölgesel elemanların eklenmesi veya çıkarılması bir kısım istenmeyen sonuçlar ortaya çıkarabilir hatta sistemi gerilim çökmesine taşıyabilir. Dolayısıyla sistemin durumunun local olarak belirlenmesi gerekir. Bu tür bilgilerin hesaplanması gerilim düşmesine karşı alınacak tedbirlerin planlanmasında bize yardımcı olabilir.

4.2 $\Delta V/\Delta Q$ İndikatörü

Sistemin durumunu belirleyebilmek için önerilen metotlardan bir tanesi sisteme küçük bir yük sokulması esasına dayanır. Hat sonundaki yüke yapılacak küçük bir ilave ile sistemin buna vereceği cevap analiz edilerek gerilim düşmesine karşı tedbirler belirlenebilir [37]. Bölgesel olarak ilave edilen yükün sistemin akımına hissedilebilir bir şekilde etki etmediği varsayılmaktadır. Diğer bir değişle hat sonundaki gerilim seviyesi çok büyük oranlarda bir değişiklik göstermez. Güvenilir bir yolla gerçek sistem çalışma şartlarını değerlendirmek için bu küçük gerilim değişimini uçtaki aktif ve reaktif güçteki değişikliklerle ilişkilendirmek mümkündür. İşte bundan sonra “tester” olarak ne çeşit bir yükün daha uygun olacağı ve ne çeşit güç ölçümlerine ihtiyaç duyulduğunu düşünmek gerekecektir. P-V ve Q-V eğrilerinde yük eklenmesinin etkileri, farklı indikatörlerin daha iyi anlaşılması için gösterilecektir

Bölgesel “tester” için kullanılabilecek en basit yük, kapasitif yük olarak ifade edilebilir. Bu bölümde çeşitli senaryolarla birlikte literatürde teklif edilen ve pratikte kullanılan indisler incelenmiştir [31, 37]. İlk olarak sisteme kapasite eklenmesinin etkisi incelenmiştir. Kapasitif yük genellikle bu tip sistemlerde kompanzasyon için kullanılmakta olduğundan yük ucunda hazırdır ve sisteme eklenmesi büyük bir problem teşkil etmez. Bu yükün eklenmesi, yük ucunda aynı kapasitör tarafından eklenen reaktif güçle ilgili olan ve ΔV ile gösterilen gerilim değişimine neden olur. Buda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

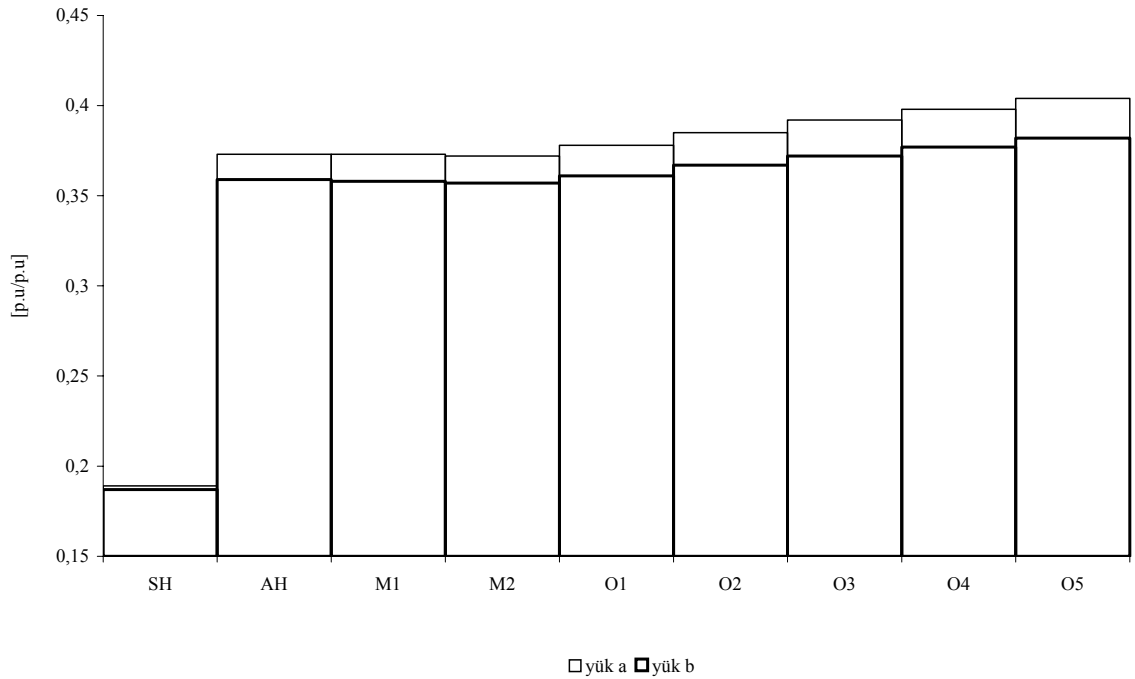
$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{Q_{\text{eklenen kapasite miktarı}}} \quad (6)$$

Bu değer yükün eşit ve farklı güç-gerilim duyarlılığı için Şekil 3-10 ve Şekil 3-11’de gösterilen ve Şekil 3-18 ve Şekil 3-19’da incelenen yerel hareketlere ve arızaya bağlıdır. Bunlar burada tekrar edilecek olursa sırasıyla:

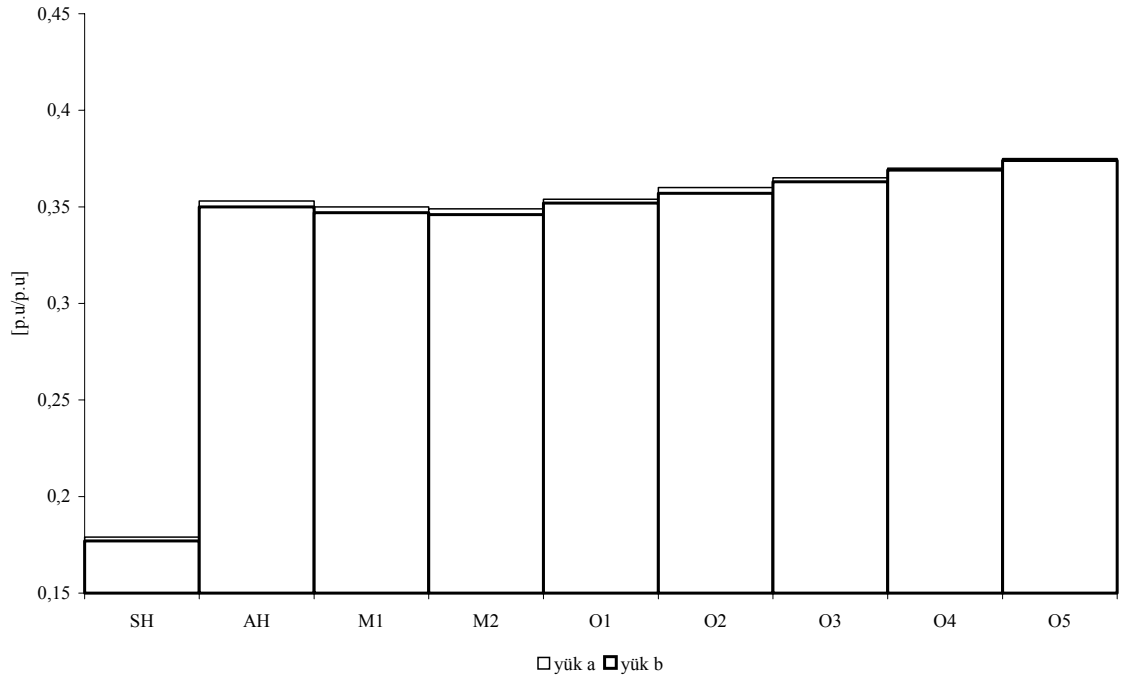
- | | |
|--|----|
| 1. Sıhhatli çalışma durumu | SH |
| 2. Hattın birinin devre dışı kalma durumu (Arıza hali) | AH |
| 3. Birinci MSC’nin devreye girmesi durumu | M1 |
| 4. İkinci MSC’nin devreye girmesi durumu | M2 |

5. Birinci OLTC'nin devreye girme durumu	O1
6. İkinci OLTC'nin devreye girme durumu	O2
7. Üçüncü OLTC'nin devreye girme durumu	O3
8. Dördüncü OLTC'nin devreye girme durumu	O4
9. Beşinci OLTC'nin devreye girme durumu	O5

İndeksin anlamının daha iyi açıklanması için, hem a yükü hemde b yükü için hesaplamalar yapıldı, aslında a yükü için ikinci ve beşinci OLTC basamakları arasındaki hesaplamalara gerek yoktur. Çünkü birinci OLTC adımından sonra gerilim arıza öncesi değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla bu noktadan sonra herhangi bir manevra yapılmasına gerek yoktur. Ancak indeksin durumunu daha iyi analiz edebilmek için bu hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



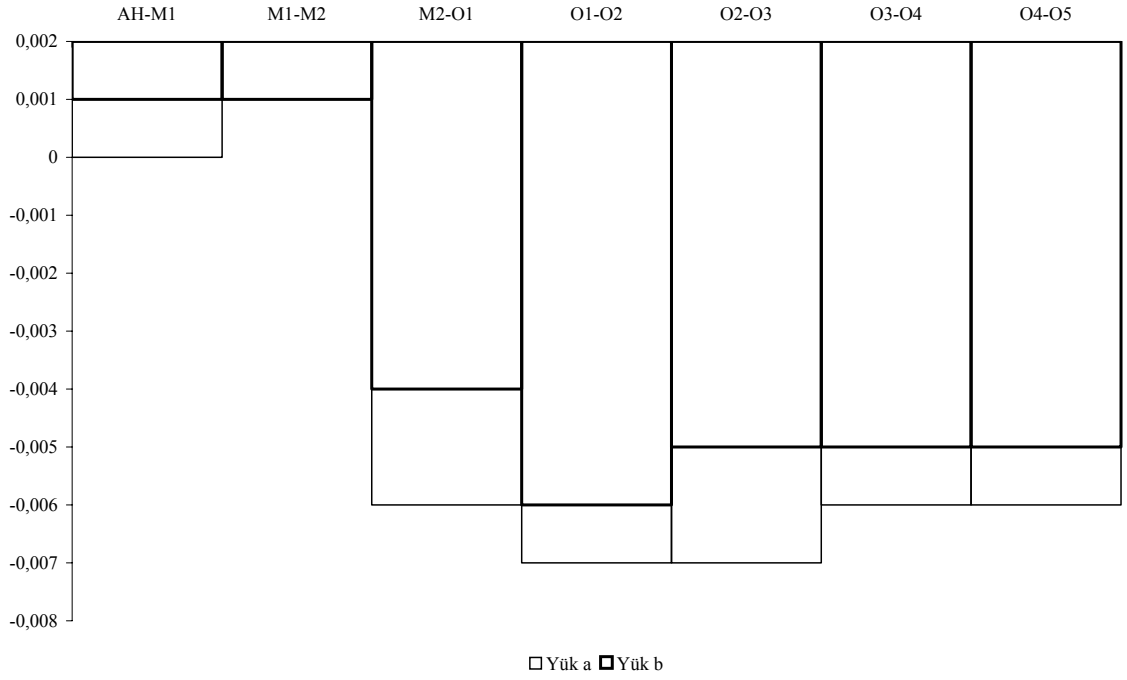
Şekil 4-1: Yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$. Sabit empedans yük için.



Şekil 4-2: Yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$. Farklı güç-gerilim hassasiyetli yük için.

Bir önceki listede izah edilen senaryolara göre hem sabit empedans, hem de üstel fonksiyonla ifade edilen gerilime bağlı nonlinear yük için $\Delta V/\Delta Q$ indisleri hesaplanarak Şekil 4-1 ve Şekil 4-2’de toplu halde sunulmuştur. İndeks değerinin elde edilmesi için eklenen reaktif güç miktarı oldukça küçüktür. Bu değer reaktif gücün yüzde biri kadardır.

İki şekilde de görüldüğü gibi hattın düşmesinden sonra indeksteki artış okunabilir bir değerdedir. Bu değerler sabit empedans yük modelinde a yükü için 0,373 b yükü için de 0,359 değerinde olup üstel yük modelinde ise a yükü için 0,353 b yükü için ise 0,35 değerindedir. Burada şu belirtilmelidir ki sistem gerilimi, yük noktasındaki reaktif güç eklentisine karşı oldukça duyarlıdır. Dolayısıyla eklenen Q oranı ile arıza öncesindeki indeks değerini çok küçük bir oranda okurken arıza sonrası bu oranın çok yüksek olduğunu görüyoruz. Arızadan sonra hesaplanan endeks ile sağlıklı durum için hesaplanan değerlerin mutlak değerleri sistem hakkında bir bilgi vermekle beraber bu iki değer arasındaki değişim oranı daha önemli gözükmemektedir. Zira mutlak değer sistemin ve yükün etkisi altındadır. Şekil 4-3’de sabit empedans yük için hesaplanan indeks değişim oranları toplu halde sunulmuştur.



Şekil 4-3: Şekil 4-1’de görülen grafiğin indeksleri arasındaki farkı gösterir.

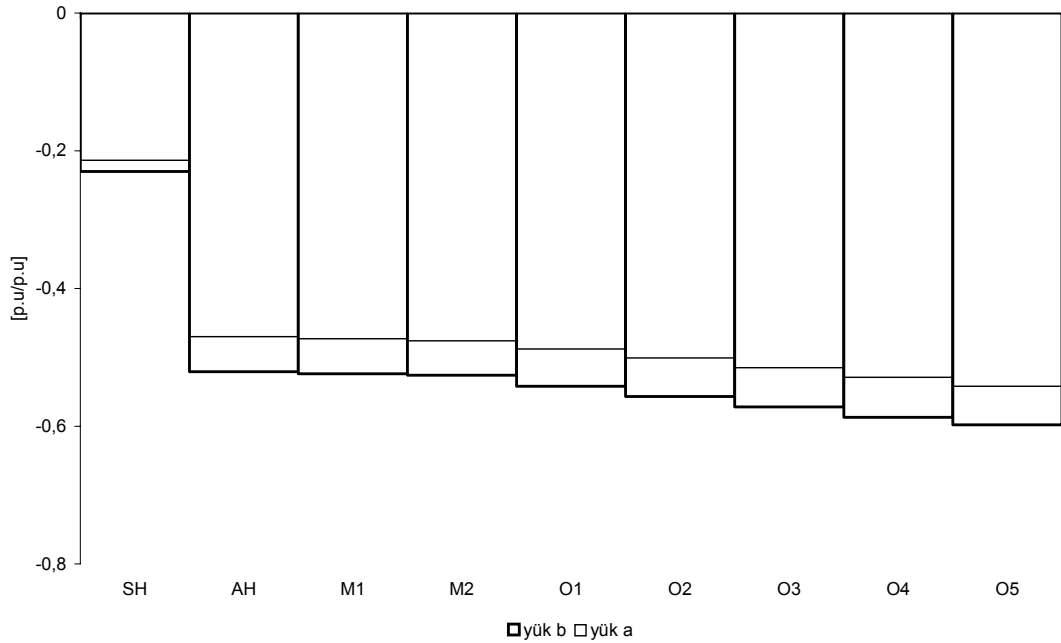
Bununla beraber Şekil 4-1 ve Şekil 4-2’den de görüldüğü gibi, mutlak değer üzerinde bazı faydalı yaklaşımlar olabilir, mesela burada da görüldüğü gibi yükün genliği fark edilebilir bir değerde değişmediği halde gerilimdeki değişimin çok fazla olduğunu indeks değerinden anlamaktayız. İndekste düşüşe MSC müdahalesinin sebep olduğu görülmekle birlikte, OLTC çalıştığı zaman indekzin değeri artmaktadır. Bu [64]’da gösterildiği gibi gerçek bir gerilim çökmesi olabilir. Ancak bizim örnek durumumuzda böyle birşey söz konusu değildir. Sistemde reaktif enerji eksikliği olduğunda aşırı kompanze edilmiş sistemlerin gerilim çökmesine karşı zaafiyet gösterdiği bilinmekle beraber [31] bu çalışılan örnek yüklerde ve sistem de böyle değildir. İndeks değerinin yüksek olmasının anlamı, sağlıklı şebeke şartlarına göre sistemin hala kritik şartlarda çalıştığı anlamına gelir. Fakat, her iki yük şartı için elde edilen grafikler karşılaştırılırsa, sistem a yüküne göre daha çok yüklü olsa bile, yük b için ($\Delta V/\Delta Q$) oranındaki yükseliş yük a için hesaplanandan daha küçük olur. Bunun yanı sıra şekillerden de görüleceği gibi farklı gerilim duyarlılığına sahip yükler için yükün büyüklüğü indekzin mutlak değerinde önemli değişiklikler oluşturmamaktadır. Fakat yine de sistem hakkında bir fikir verir. Bu da, bir durum diğerinden daha kritik olduğunda birbirlerinden ayırt edilmelerini zorlaştırmaktadır. Bu şekilde bu indekslerin farklı yük hassasiyetleri için anlaşılabilir bir sonuç vermediği Şekil 4-2’den görülmektedir.

4.3 $\Delta V/\Delta Q$ İndeksine Farklı Bir Yaklaşım

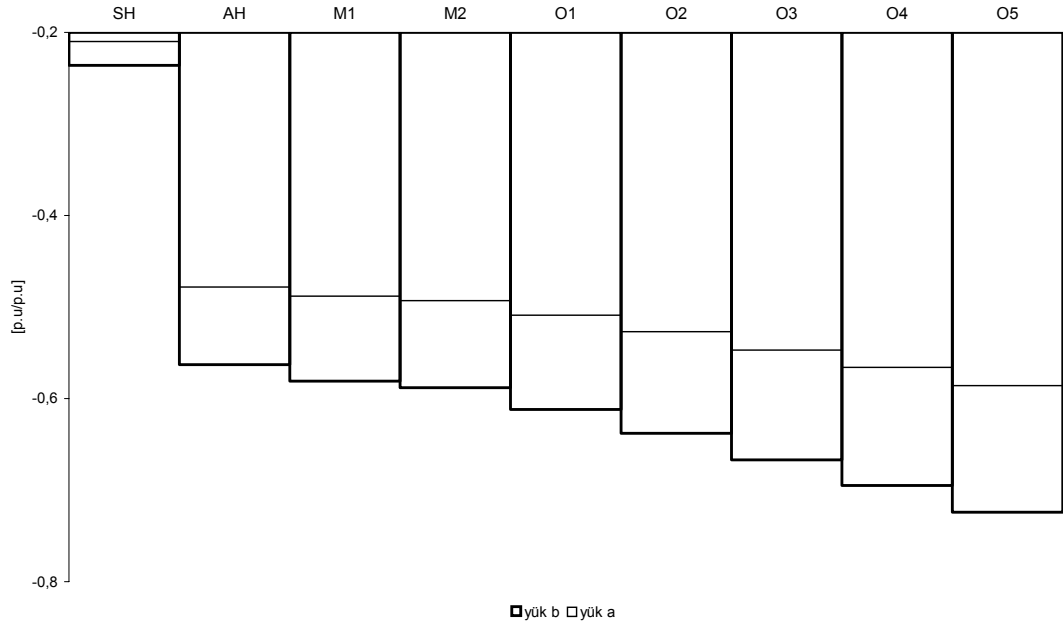
Bir başka çalışmada ele alınan diğer bir yaklaşım [37], yine reaktif bileşeni ile yük ucuna kapasitör eklenmesi esasına dayanır. Bu çalışmada yük tarafında ortaya çıkan toplam (yük+kapasitör) reaktif güçteki değişim, gerilimdeki değişim ile ilişkilidir. Şöyle ki yük eklenmesi neticesinde ortaya çıkan gerilim değişimi bu noktadaki gerilime bağlı olan reaktif gücü de değiştirecektir. Bu değişim gözönü alınarak indeks yeniden hesaplanabilir.

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{Q_{\text{kapasite eklenmiş}} - Q_{\text{kapasite eklenmemiş}}} \quad (7)$$

Şekil 4-4 ve Şekil 4-5’de bir önceki bölümde izah edilen senaryo ve yük şartları için ve yeni formülle hesaplanan indeks değerlerini gösterir. [37]’de açıklandığı gibi arıza sonrası hat reaktansındaki ani yükselme çok rahat bir biçimde bu indekste görülebilir. Aynı değişim, MSC ve OLTC eklenmesinden sonra da gözlemlenebilir. İndeksin negatif işareti sistemdeki tüm yükten çekilen reaktif güçteki düşüşten dolayıdır. Reaktif güçteki düşme gerilim seviyesinde artışa neden olur. Dolayısı ile $\Delta V/\Delta Q$ ifadesinin payı daima pozitif, paydası ise negatiftir.



Şekil 4-4: Yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$. Sabit empedans yük için.

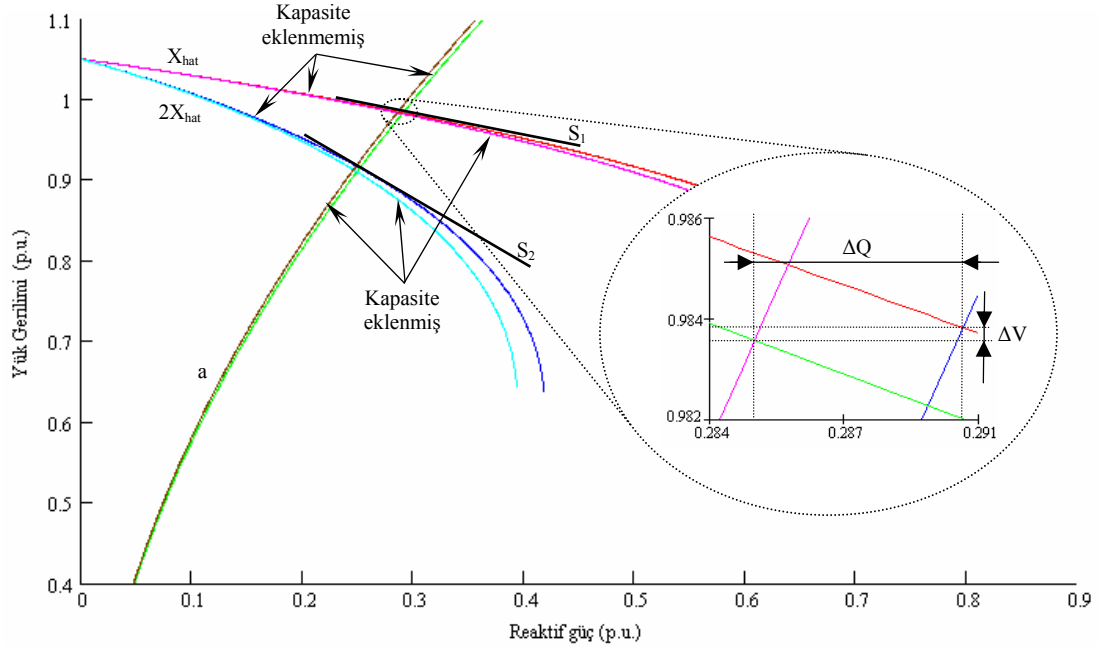


Şekil 4-5: Yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$. Farklı güç-gerilim hassasiyetli yük için.

Şekil 4-4 ve Şekil 4-5 incelendiğinde her bir düzeltici hareketten sonra indekslerin aldığı değerin büyüdüğü gözlenecektir. İndeks her iki yük için de giderek büyüyen bir değer alır. İndeks değişimindeki artışlar b yükü için daha fazla olmakla beraber sistemin özellikle a yükü için durumunu belirlemekte zayıf kalmaktadır. Bir önceki bölümde verilen Şekil 3-11 hatırlanacak olursa birinci OLTC'den sonra sistem gerilimi arıza öncesi seviyesine gelmektedir. Sistem eskisine göre daha kritik bir seviyede çalışmasına rağmen gerilim bakımından kararlıdır. Sonuç olarak a yükü ile b yükü arasında olması gereken fark bu indekslerden belirlenememektedir. İki farklı yük için elde edilen indeks değerlerinin mutlak değerleri her iki yük durumu için büyük bir farklılık göstermemektedir. Bir önceki bölümde izah edildiği gibi, yük a, b yüküne göre çok daha kararlı bir bölgede çalışmaktadır. Benzer şekilde Şekil 3-15'den görüldüğü gibi 2. OLTC basamağından sonra yük b için sistem gerilim çökmesine sürüklenmektedir. Fakat bu durum indekslerden anlaşılamamaktadır.

Bu durumun sebebini anlatabilmek için “tester” ın sisteme bağlanmasını detaylı bir şekilde incelemeliyiz. $\Delta V/\Delta Q$ oranı ile ölçülen miktar Şekil 4-6'daki Q-V eğrisi düşünülerek incelenebilir. $\Delta V/\Delta Q$ oranı ile kapasitif yük eklenmesinden önceki ve sonraki çalışma noktalarını birbirine bağlayan doğrunun oluşturacağı üçgenin açısı ölçülmektedir. Bu açı sistemin sağlık durumu hakkında karar verebilmek için yeterli verileri taşımamaktadır. Sistemin durumunu belirleyebilmek için sistem

eğrilerinin eğimlerinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Örnek olarak genel yük şartları için S1 ve S2 çizgileriyle arıza öncesi ve sonrasındaki çalışma noktalarının eğimini gösteren şekiller Şekil 4-6'da verilmiştir.



Şekil 4-6: Yük ucuna kapasitans eklemenin etkisi.

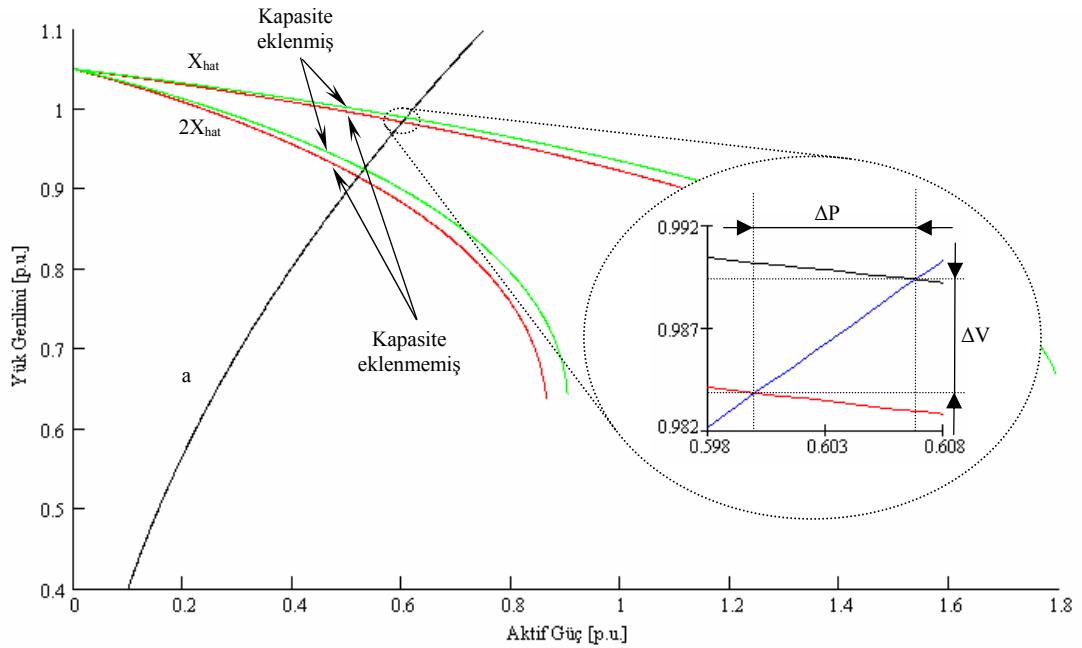
Hat reaktansının ve sisteme giren MSC'lerin her bir farklı değeri için sistem eğrileri farklı yapıda olmaktadır [bakınız: Şekil 2-16 ve Şekil 3-14, Şekil 3-15]. Bu da her yük için uç geriliminde ve gücünde bir artışa sebep olmaktadır. Aynı şekilde sistem eğrilerinde de yüklenmeden dolayı bir düşüşe sebebiyet vermektedir. Şekil 4-6'daki yük eğrisindeki ve sistem eğrilerindeki farklılık bu durumu göstermektedir. Tester eklenmesinden önce ve sonra elde edilen eğriler Şekil 4-6'da görüldüğünden birbirine daha yakındır. Fakat burada eklemekten dolayı oluşan kaymanın daha iyi gösterilmesi için çok abartılarak çizilmiştir. Yani daha küçük miktardaki reaktif gücün eklenmesiyle sistemin durumunu belirlemek mümkün olabilir.

4.4 $\Delta V/\Delta P$ Ve $\Delta V/\Delta Q$ İNDEKSLERİ

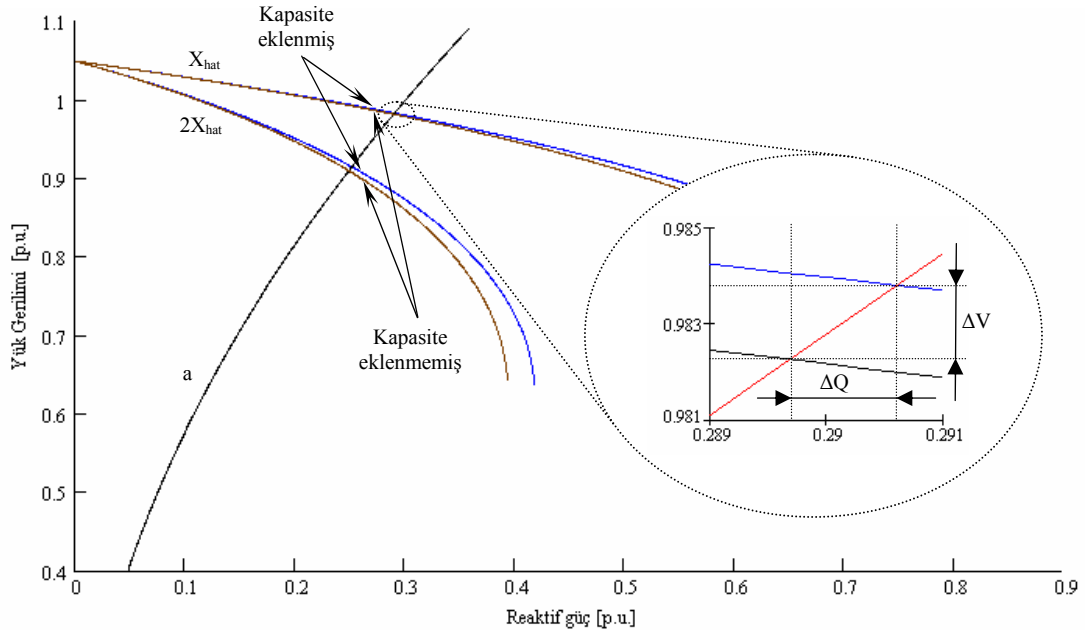
Diğer bir indeks, yine kapasitif yükün, yük ucuna bağlanması ile elde edilebilir. Bu indeks, tester eklenmesi ile üretilen gerilim değişimleri ile, yükteki ard arda gelen aktif ve reaktif güç değişimleri arasındaki oranla belirlenebilir. Testerın sisteme eklenmesi ile hem yük karakteristiğinin hem de sistem karakteristiğinin değişeceği Şekil 4-6'da gösterilmiştir. Fakat bilinmektedir ki yük karakteristiğinde ki değişim

ihmal edilebilir bir seviyededir. Ancak testlerden sonra değişen yükün güç katsayısı sistem eğrisini önemli ölçüde farklılaştırır. Bu durum Şekil 4-7 ve Şekil 4-8'deki P-V ve Q-V eğrilerinden açıkça görülmektedir (ayrıntılar için dairelerin içine bakınız). Bu eğrilerin çıkarılabilmesi için testlerin etkisi bir önceki bölümde izah edildiği gibi sisteme bağlanan çok küçük bir MSC adımı gibi modellenmiştir.

Sisteme ait P-V ve Q-V eğrilerinin değişimi, yük dinamiğinin değişimi daha yavaş olduğu varsayılarak ihmal edilerek sistemin Q-V ve P-V eğrileri her bir durum için çizilecek olursa Şekil 4-7 ve Şekil 4-8 elde edilebilir. Bu eğriler çıkarılır iken kondansatörün etkisi sadece eşdeğer empedans üzerine yansıtılmıştır.



Şekil 4-7: Yükten çekilen güçlerdeki kapasitif tester eklenmesinin etkisi. P-V düzlem.



Şekil 4-8: Yükten çekilen güçlerdeki kapasitif tester eklenmesinin etkisi. Q-V düzlem.

Bu eğrilerin incelenmesi ile $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ indeksleri bir önceki hesaplama tekniğine göre daha sıhhatli bir biçimde belirlenebilir ve bu bilgi ile sistemin çalışma şartları bulunabilir. $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ indisleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

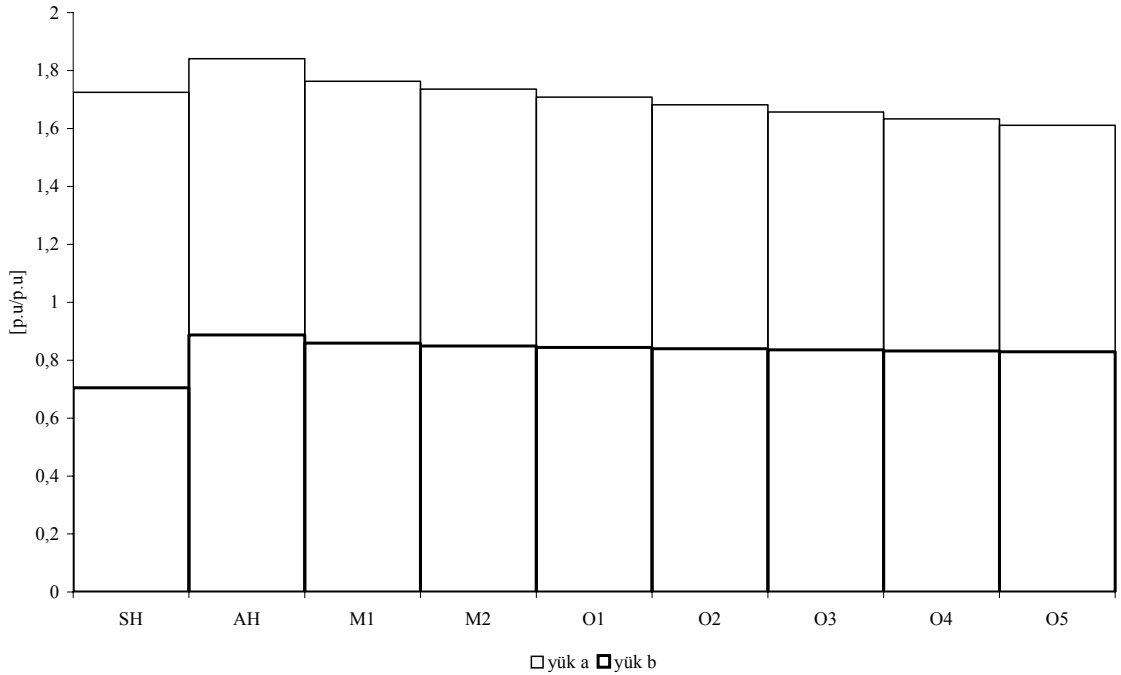
$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{P_{\text{kapasite eklenmiş}} - P_{\text{kapasite eklenmemiş}}} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{Q_{\text{kapasite eklenmiş}} - Q_{\text{kapasite eklenmemiş}}} \quad (4)$$

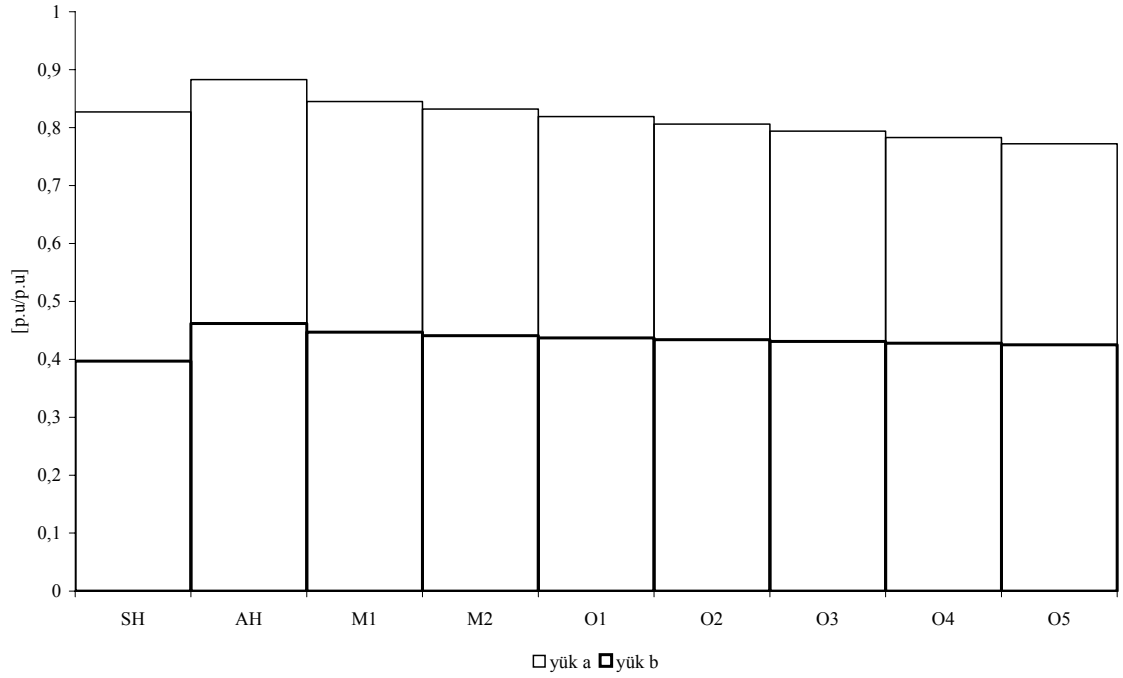
Şekil 4-9'daki grafiksel sonuçlardan ve Şekil 3-10 ve Şekil 3-11'deki eğrilerden görülebilir ki; bu şekilde hesaplanan indeks, sistem şartları hakkında bazı bilgileri sağlayabilir. Her iki yük durumu için hesaplanan indeks değerlerinde arıza sonrası meydana gelen yükselme sistemin eskisine nazaran daha kritik bir noktada çalıştığını göstermektedir. Yük a için indeksin değeri MSC ve OLTC hareketleri ile sistemin gerilim değerinin eski duruma dönüşünü açık olarak göstermektedir. Yük b için ise indeks değeri hiç bir zaman arıza öncesi değerine ulaşmamaktadır. Ancak bilinmektedir ki sistem her iki yük için de arızalı durumda arıza öncesi duruma nazaran daha kritik durumdadır. Fakat bu kritik durum indeksin değerinden anlaşılamamaktadır. İndeksin incelenmesi ile elde edilecek bilgi basit gerilim değişimi ile de elde edilebilecek seviyededir. İndeks bu haliyle gerilim ölçmesi ile

elde edilenden fazla bir bilgi taşımamaktadır. Bununla beraber yük a ve yük b için indeksin mutlak değerindeki değişim faydalı bir bilgi taşımaktadır. Şöyle ki; yük a, yük b ye göre gerilim kararlılığı bakımından daha emniyetli bir bölgede çalıştığı için düzeltici hareketlere karşı çok daha rahatlıkla okunabilen bir cevap vermektedir. Bu bilgi sistemin b yükü için a yüküne nazaran kritik bir bölge de çalıştığını göstermektedir.

Yine Şekil 4-9 ve Şekil 4-10 incelendiğinde yük a birinci OLTC basamağından sonra başlangıç değeri ile aynı seviyeye gelmektedir. Yük b için indekslerin mutlak değerlerinin birbirine çok yakın olduğu hatta başlangıç noktası civarında olduğu görülmektedir. Bu durum bu indekslerin sistemin durumu hakkında yeterli bilgiyi vermediğini göstermektedir. Ayrıca mutlak değerlerdeki azalma sistemin daha iyi bir noktaya taşındığını göstermektedir. Ancak yük a için elde edilen indekslerin mutlak değerleri yük b için elde edilen mutlak değerlerden daha büyüktür, bu durumda bu indeksler ile sistem hakkında yorum yapmamız zorlaşmaktadır.

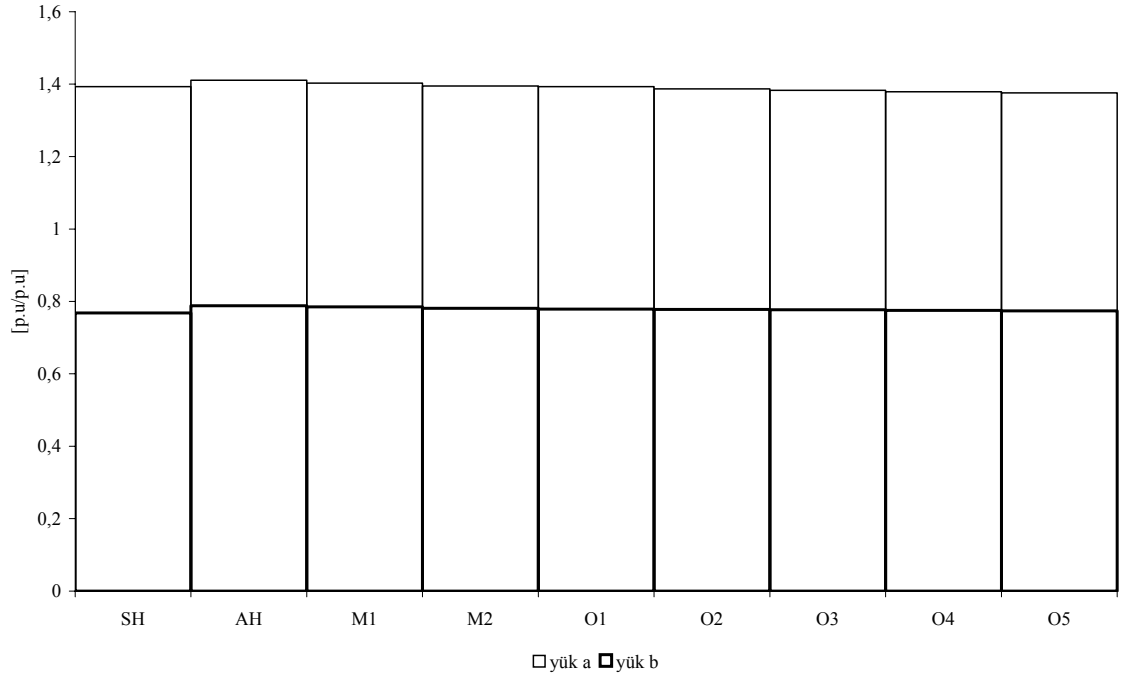


Şekil 4-9: Sabit empedans yük için ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta P$ indikatörleri ($\alpha=2$, $\beta=2$).

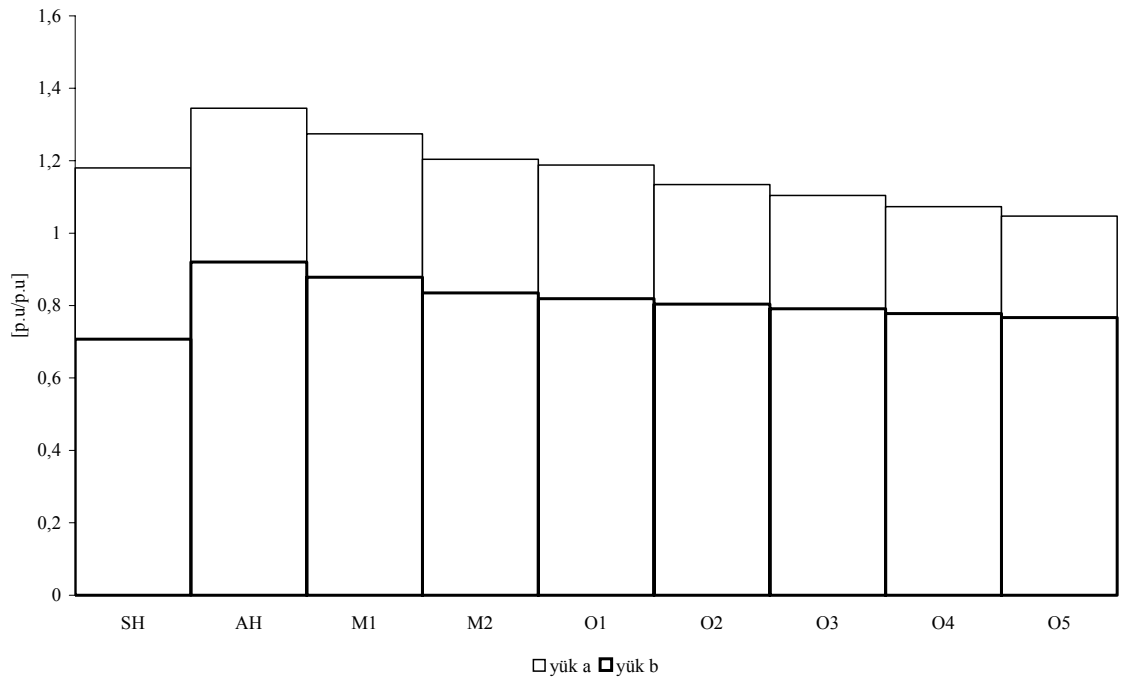


Şekil 4-10: Sabit empedans yük için ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=2$, $\beta=2$).

$\Delta V/\Delta P$ ile karşılaştırıldığında, $\Delta V/\Delta Q$ oranının daha kolay okunabilir olması sistem geriliminin reaktif güce daha fazla bağlı olması ile izah edilebilir. Yükler farklı güç gerilim hassasiyetlerine sahip ise indeks yine benzer sonuçlar gösterir. Farklı gerilim hassasiyetlerine sahip yükler için indeks yeniden hesaplanarak Şekil 4-11 ve Şekil 4-12’de sunulmuştur. İndeksin elde edildiği şebekeye ait detaylı eğriler Şekil 3-14 ve Şekil 3-15’de daha önce sunulmuştu. Bu durumda da sabit empedans yükte elde edilene benzer sonuçlara ulaşılmaktadır.



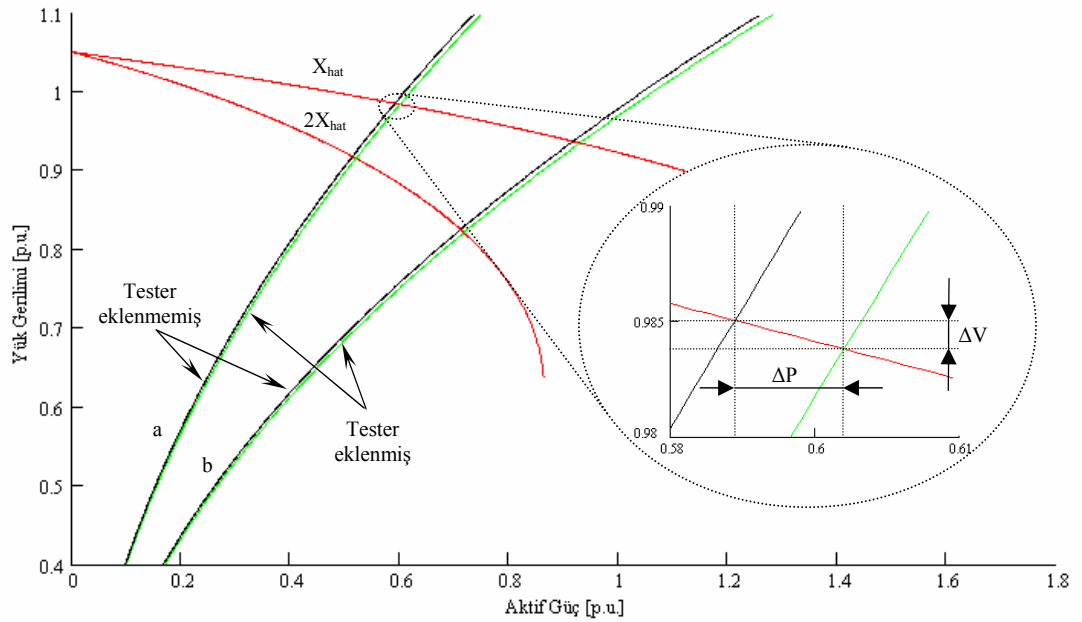
Şekil 4-11: Farklı güç-gerilim hassasiyetleri ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta P$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).



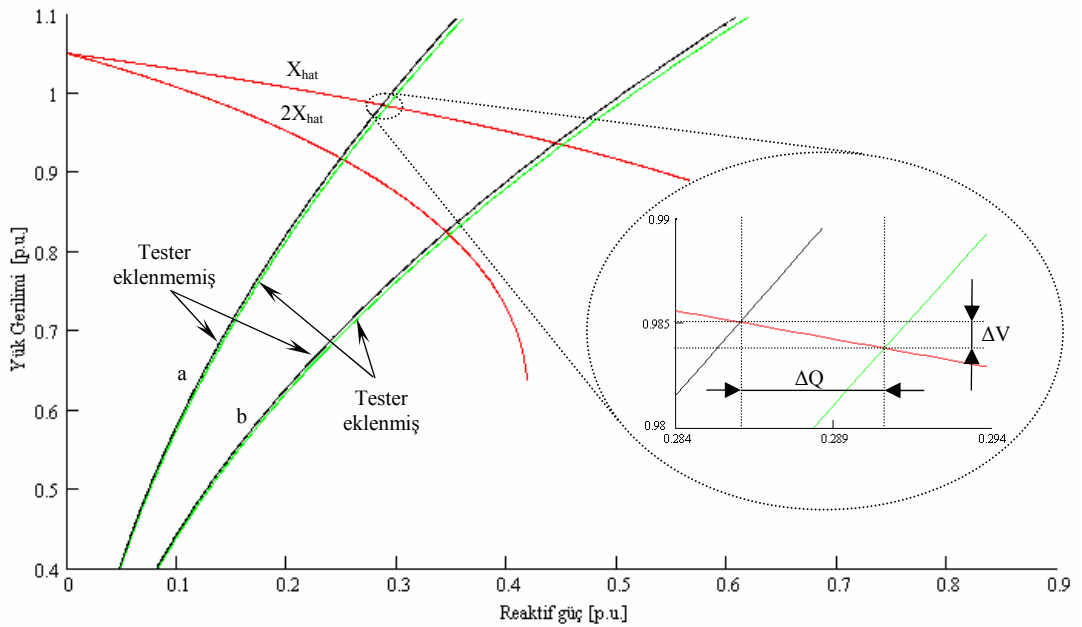
Şekil 4-12: Farklı güç-gerilim hassasiyetleri ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).

Daha önceden bahsedilen farklı α ve β değerli yükler ve aynı aktif ve reaktif güç-gerilim hassasiyetine sahip olan yükler arasındaki ayırım açıklandığı gibi farklı

olmak zorundadır. $\alpha=\beta$ durumu, çok benzemese bile tester ana karakterine başlangıç olması için ilk başta seçilir. Genel durumlarda karşılaşılan daha gerçekçi $\alpha\neq\beta$ durumu daha sonra yapılacaktır.



Şekil 4-13: Sistem ve yükün karakteristik eğrilerinde tester eklemenin etkileri P-V düzlem.



Şekil 4-14: Sistem ve yükün karakteristik eğrilerinde tester eklemenin etkileri Q-V düzlem.

β nin üç olarak alınması $\Delta V/\Delta Q$ indeksini çok daha fazla okunur kılmıştır. Ancak indeks sistemin sıhhati hakkında bütünsel bir bilgi sağlamamaktadır. Çalışma

noktası etrafında sistem eğrilerinin eğimlerinin belirlenmesi sistemin kritik durumda çalışıp çalışmadığını anlamak için en önemli metottur. Bu eğimin belirlenmesi eğrinin neresinde çalıştığımız hakkında yeterli bilgi sağlayacaktır. Eğim bilgisini sağlayacak bir tester konfigürasyonu bölgesel değerlerin ölçülmesinden oluşan kimi bilgilerin elde edilmesi ile tasarlanabilir.

Herhangi bir gerilimde eşit güç-gerilim hassasiyetleri için yük daima aynı güç faktörüne sahip olur. Bu durum üçüncü bölümde verilen denklem (10) kullanılarak Şekil 3-4, Şekil 3-5 ve Şekil 3-6'da gözlenebilir. Üzerinde Çalışma yaptığımız uca yapılan ekleme, gerçek yükün aynı güç faktörüne sahip olan daha uzaktaki yüke, toplam yükün güç faktörü değişmediği için, aynı P-V ve Q-V eğrileri üzerindeki çalışma noktasında değişikliğe neden olur (Şekil 4-13 ve Şekil 4-14).

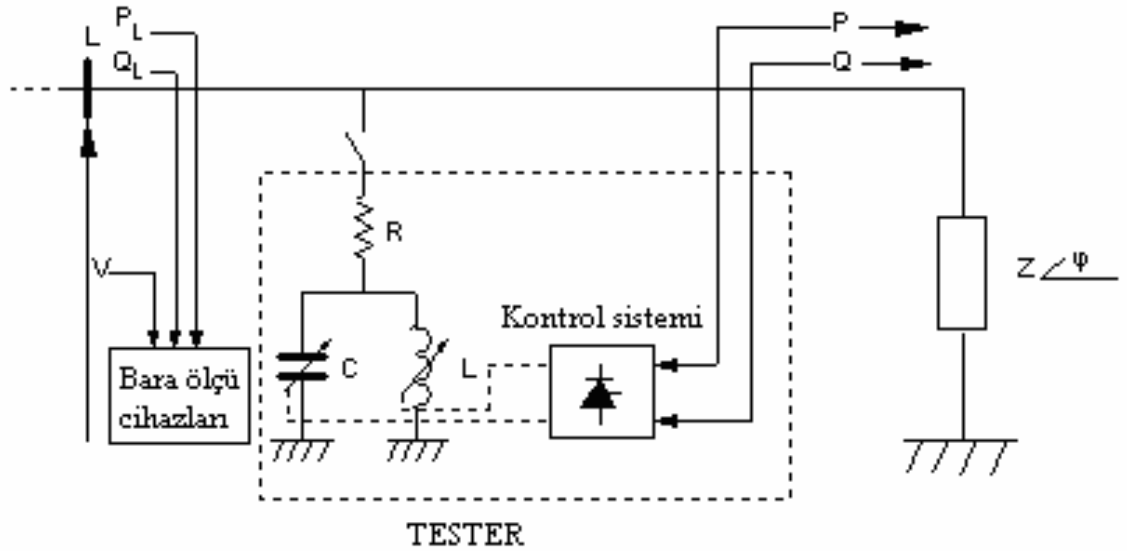
4.5 Sonuç

Bu bölümde sistemin kararlılık durumunu belirlemek için nasıl bir indis kullanılması gerektiği ve bu indisin ne şekilde hesaplanacağı araştırılmıştır. Sisteme eklenecek küçük bir yük ve bu yükün eklenmesine karşı sistemin cevabına bakılarak kararlılık analizi yapılabilecektir. Tester olarak eklenecek büyük modeli için ilk başta bir kapasitif yük kullanılsa da elde edilen sonuç istenildiği gibi olmamıştır. Farklı denemelerden sonra sistem de tester olarak kullanılabilecek yükün ancak yükün güç faktörü ile aynı güç faktörüne sahip küçük bir yükün devreye sokulması ile sıhhatli sonuçlar elde edilebileceği belirlenmiştir. Bununla ilgili indeks çalışmaları bir sonraki bölümde verilmiştir.

5. UYGULAMA

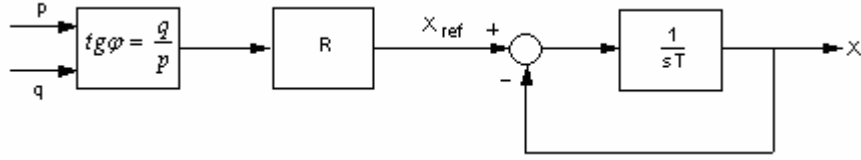
5.1 Giriş

Bu bölümde buraya kadar anlatılanların ışığında geliştirilecek olan bir “tester” ın uygulamaları verilecektir. Tester sistemin P-V ve Q-V eğrilerinin tabiatını değiştirmeden, başka bir değişle kendini mevcut yüke benzetecek şekilde ayarlayabilecek bir yapıda olmalıdır. Böyle bir tester Şekil 5-1’de verilmiştir. Bu cihaz, güç katsayısı ayarlanabilir bir yükten ibarettir. Bu yük sabit direnç ve tristör kontrollü reaktans ile oluşturabilir. Her bir yük durumu için istenilen güç faktörü değerine göre, cihazın yük değeri, uygun bir kontrol sistemi ile ayarlanabilir. Bundan sonra tester’ın karakteristiğinin sistem karakteristiğini etkilemeden gerekli ölçmeler yapılabilir. Gerilim, güç gibi, şartlar arasındaki farklılık ve bunu takiben tester’ın kapanması ve sonradan ortaya çıkan geçici rejimin sonunda ölçülebilir. Bu özellikleri taşıyan bir tester ve bunun devreye bağlanış şekli Şekil 5-1’de sunulmuştur.



Şekil 5-1: Tester konfigrasyonu.

Şekilde L ile gösterilen nokta yük barasını temsil etmektedir. $Z \angle \varphi$ yük empedansını göstermektedir. Yük empedansı bir önceki bölümde izah edildiği gibi sabit empedans yük ile modellenebildiği gibi farklı gerilim hassasiyetlere sahip bir yük olarak da düşünülmektedir. Tester için öngörülen basit bir kontrol stratejisi Şekil 5-2’de gösterilmektedir. Bu, dinamik reaktans modülasyonu olarak düşünülebilir.



Şekil 5-2: Tester reaktans modülasyonu

Şekil 5-2’de verilen kontrol sistemi ile ilk önce verilen sistem de p ve q değerleri okunarak tanφ hesaplanır. Daha sonra sistemin sabit direncine karşın reaktansın sistemde meydana gelen değişimlere göre kendisini basit bir geri besleme devresi ile ayarlaması ile tester’ın sisteme uyumu sağlanır.

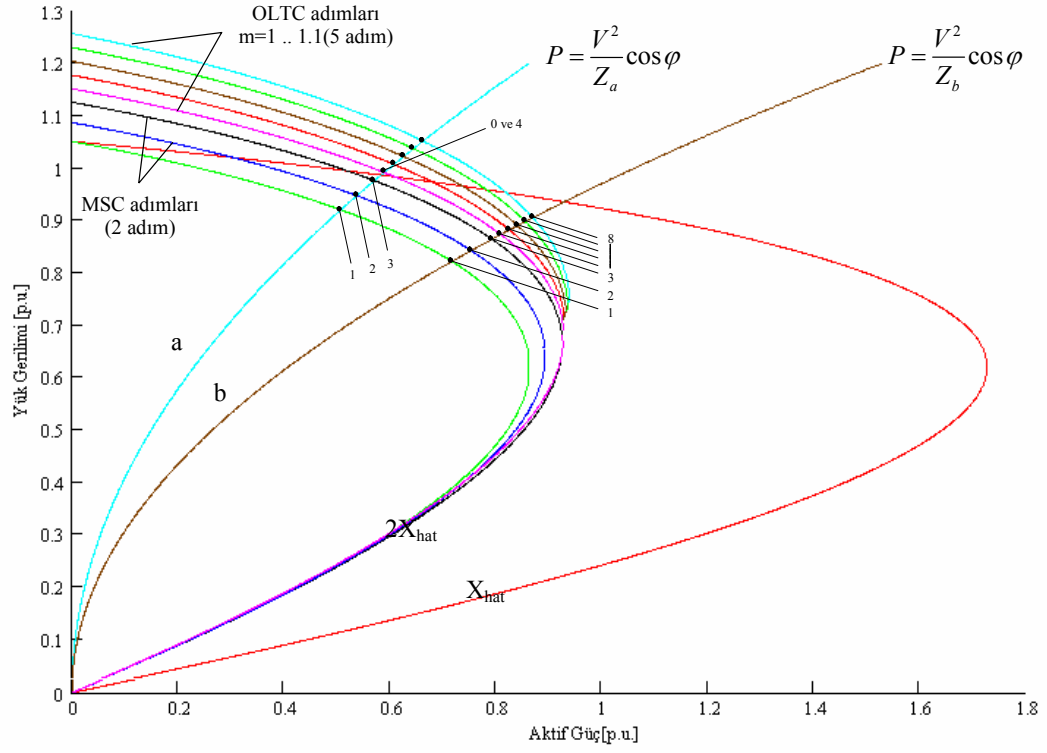
Şekilde verilen basit kontrol stratejisi ile tester sisteminin reaktansı, kendini yük reaktansına uydurur. Bu durumda sistemin sıhhat durumunu gösterecek oranlar şu formüllerle hesaplanabilir.

$$\frac{\Delta V}{\Delta P_Y} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{P_{Y \text{ kapasite eklenmiş}} - P_{Y \text{ kapasite eklenmemiş}}} \quad (8)$$

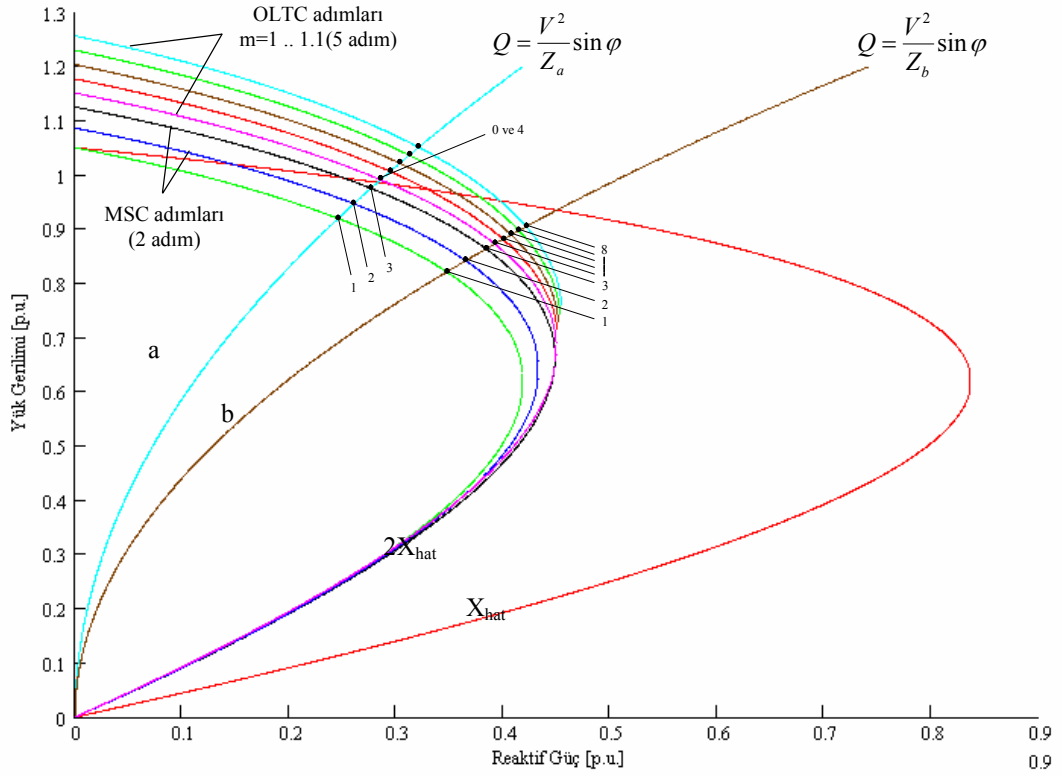
$$\frac{\Delta V}{\Delta Q_Y} = \frac{V_{\text{kapasite eklenmiş}} - V_{\text{kapasite eklenmemiş}}}{Q_{Y \text{ kapasite eklenmiş}} - Q_{Y \text{ kapasite eklenmemiş}}} \quad (9)$$

Bu oranlar iyi bir yaklaşıklıkla sistemin çalışma noktası civarındaki eğimini belirler. Eğimin magnitudü, çalışma noktası üzerindeki yerini işareti ise eğrinin hangi yarısı üzerinde çalıştığımızı belirler. Pozitif işaret eğrinin alt tarafında, negatif işaret ise üst tarafında çalıştığının işaretidir.

Tester’ın devreye sokulmasıyla oluşan indeks eğrileri basit bir biçimde Şekil 5-5 ve Şekil 5-6’da gösterilmiştir. Şekil 4-10 ve Şekil 4-11’deki durum burada bir kez daha inceleneceği için tekrar Şekil 5-3 ve Şekil 5-4 olarak aşağıya taşınmıştır.



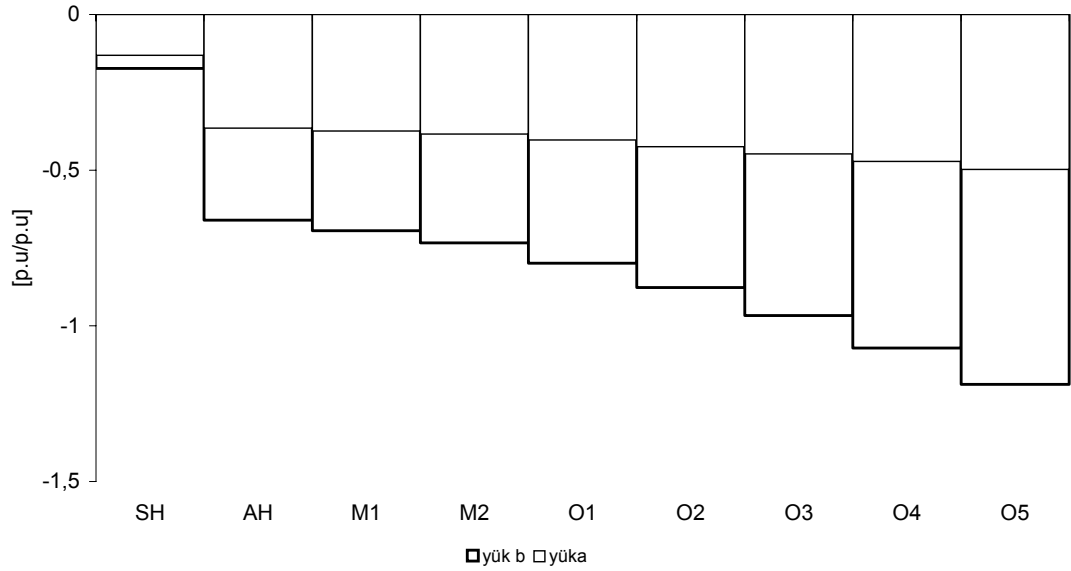
Şekil 5-3: Sabit empedans yükler için P-V eğriler; MSC ve OLTC adımları ile birlikte gösterimi.



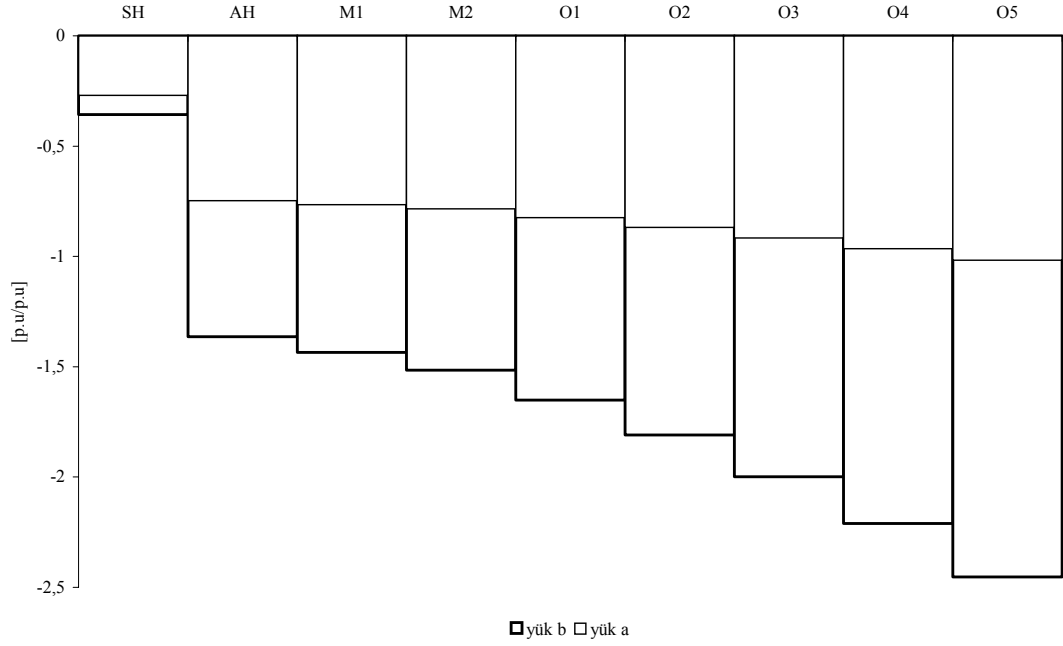
Şekil 5-4: Sabit empedans yükler için Q-V eğriler; MSC ve OLTC adımları ile birlikte gösterimi.

İndeks her bir çalışma durumunda sisteme öngörülen yükün sokulması ile hesaplanabilir. Bu şekilde hesaplanan değerler $\alpha=\beta=2$ için toplu halde Şekil 5-5’de sunulmuştur. İndekste görülebilen yüksek oranlı değişimlerin sistem topolojisinde değişimler olduğunu göstermektedir. Yük a için değişiklikler küçük olmasına rağmen okunabilecek değerdedir. Bu durumda MSC ve OLTC’lerin devreye girmesinden sonra gerilim seviyesi başlangıç değerlerine dönmeye rağmen indeksin mutlak değeri hala yüksektir. Bunun sebebi sistemin artık limit değerlerine daha yakın çalışması veya eğrinin eğiminin daha büyük bulunması ile ilgilidir.

Yük b için indeksin daha büyük değerlere ulaşması sistemin devrilme noktasına daha yakın çalışmakta olduğunu göstermektedir. Çalışma noktası eğrinin alçak gerilim çözümü kısmına hareket eder ise bu durum indeksin işaretindeki değişikliklerden fark edilebilir. En önemlisi, herhangi bir çalışma durumunda sistem limit değerlerine yaklaşıklık, mutlak değer olarak ölçülebilir. Şekillerden de görüleceği gibi yük b için OLTC hareketi, $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ ’nun mutlak değerinde oldukça yüksek bir artışa sebep olmaktadır.



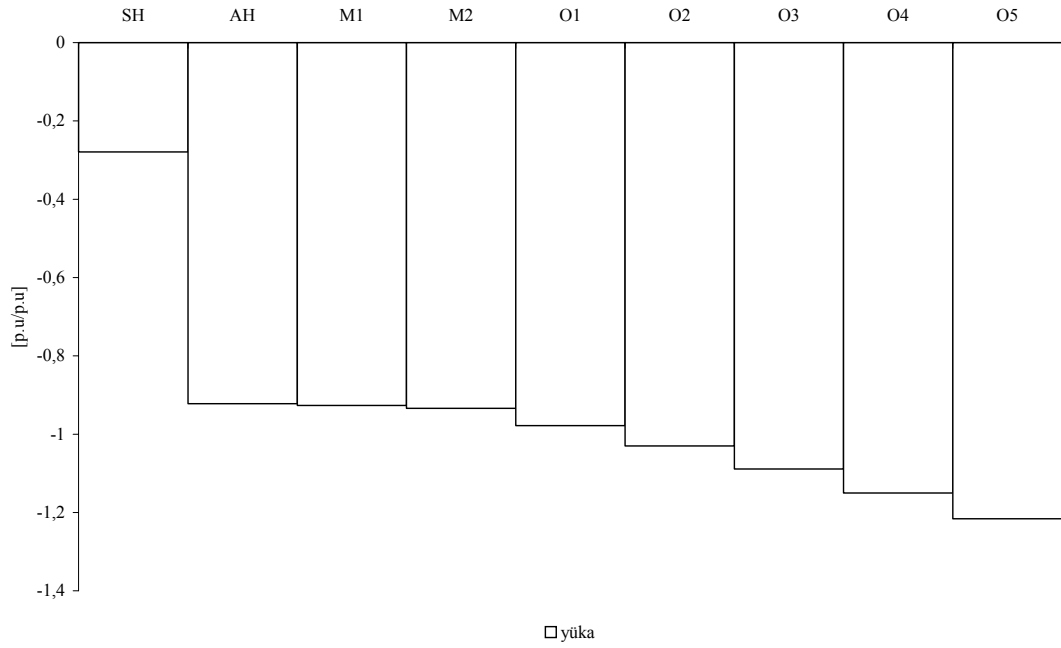
Şekil 5-5: Sabit empedans yük ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta P$ indikatörleri ($\alpha=2$, $\beta=2$).



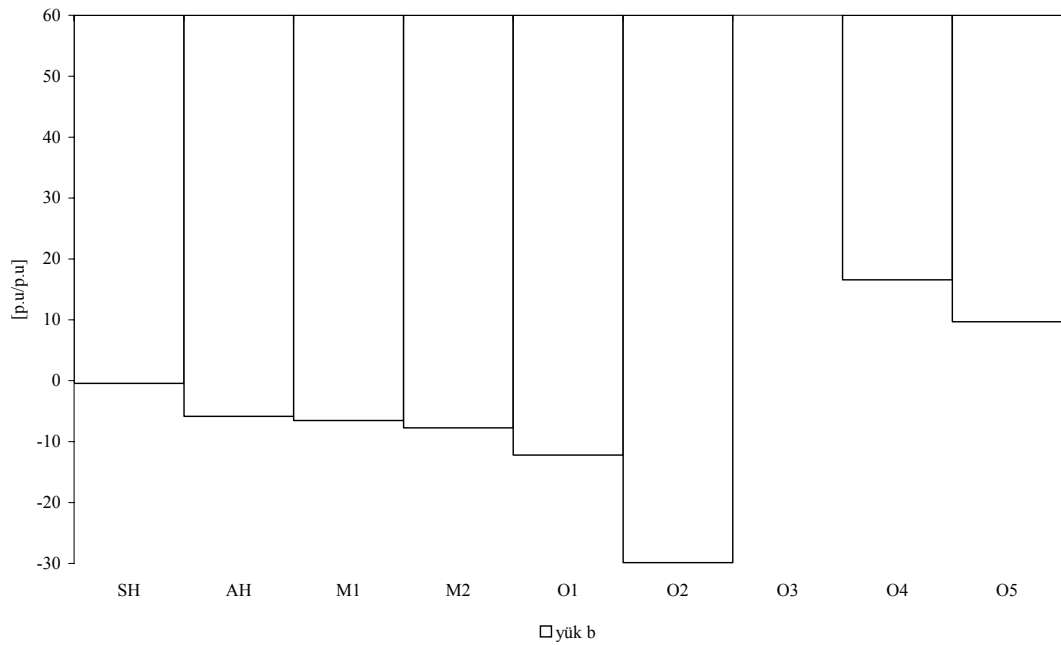
Şekil 5-6: Sabit empedans yük ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=2$, $\beta=2$).

Yüklerin, farklı güç-gerilim hassasiyetlerine sahip olduğu durum, yani $\alpha \neq \beta$ olduğu zaman, gerilim seviyesine göre yük güç faktörünün değişik değerleri için eğrilerin nasıl hesaplandığı bir önceki bölümde izah edilmiştir. Bu durumda, test cihazının reaktansı, çalışma noktasındaki yükün sahip olduğu güç faktörü ile aynı değere set edilebilir. Test cihazının devreye sokulmasından sonra, gerilim seviyesinde ufak bir değişiklik olur. Bu da aynı zamanda güç faktöründe küçük değişiklikler anlamına gelir. Şekil 5-2’de görülen kontrol hareketlerine göre, yük güç faktörünü karşılamak için tester, reaktansı modüle etmeye devam eder. Fakat, sistem karakteristiğinde oluşan farklılıklar ihmal edilebilir. Bu da çalışma noktasındaki eğrinin eğiminin iyi bir yaklaşımla hala hesaplanabileceği anlamına gelir. Yük karakteristiğine paralel olarak devreye sokulan tester neticesinde elde edilebilecek sonuçları $\alpha=1.2$, $\beta=3$ için Şekil 5-7 ve Şekil 5-8’de yük a ve b için gösterilmiştir. 3.OLTC basamağından sonra Şekil 3-15’de görüldüğü gibi yük b için transfer edilen reaktif gücün sınırına varılır. 2. Ve 3.OLTC basamaklarının eklemesinin arasında $\Delta V/\Delta Q$ ’nun mutlak değerinde ani bir artış olduğu Şekil 5-8’de açıkça görülmektedir. Bunu işaretteki değişiklik izler. Bu değişiklik hem operatörlerin hem de bölgesel hareketlerin gerçekleştirilmesiyle ve talebe karşı gelecek şekilde reaktif gücün bölgesel olarak ihtiyaç kadar eklenmesiyle kısmen kontrol edilebilir.

Daha iyi anlaşılmayı sağlamak için, $\Delta V/\Delta P$ indeksi de her iki yük için farklı gerilim hassasiyetlerine göre hesaplanarak Şekil 5-9'da gösterilmiştir.



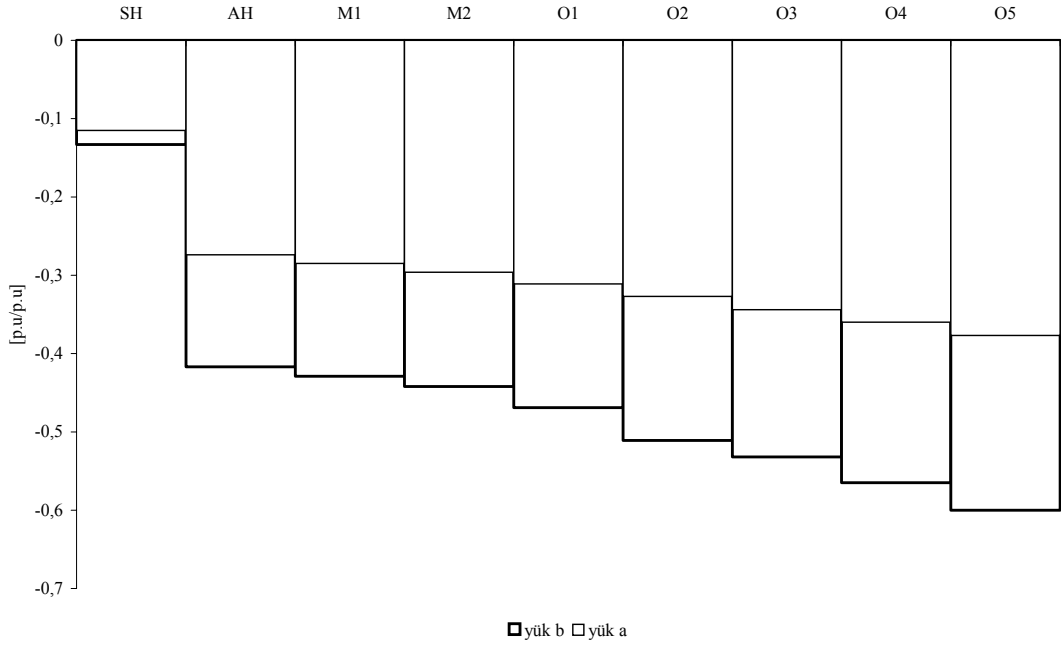
Şekil 5-7: Farklı yük güç-gerilim hassasiyetleri ve yük a için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).



Şekil 5-8: Farklı yük güç-gerilim hassasiyetleri ve yük b için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).

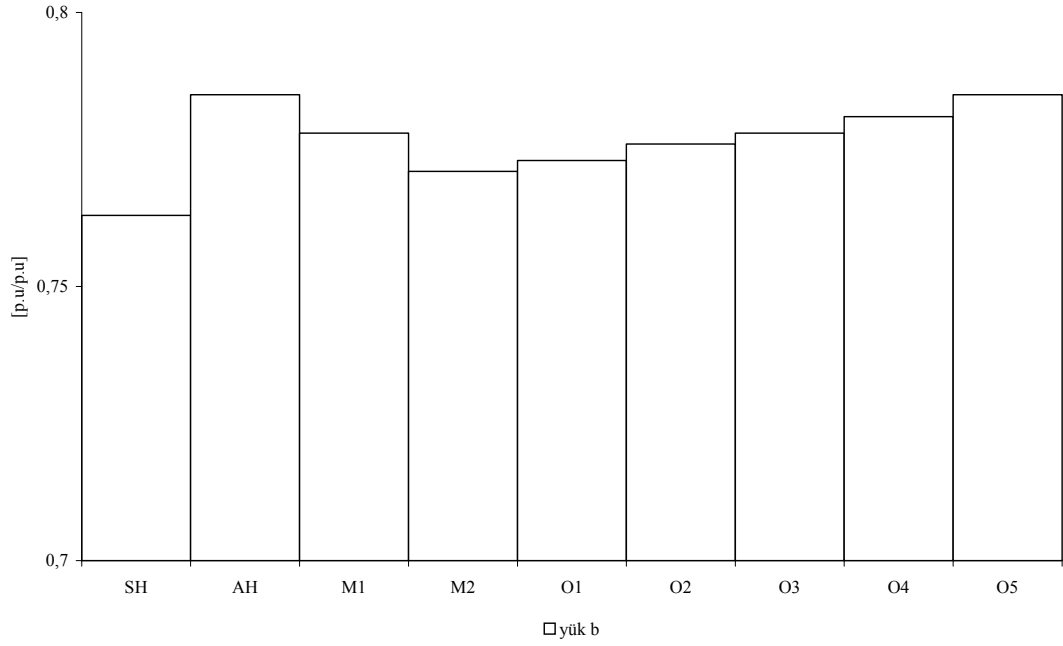
Şekil 5-8 ve Şekil 5-9'da üretilen reaktif güçte, limitlere ulaşmanın sistemin Q-V eğrilerinin alt kısımlarında çalışmasına neden olduğu gösterilmiştir. Bu, şu

anlama gelir ki; her iki eğrinin eğimlerinin işaretlerindeki değişim, OLTC hareketinin kombinasyonundan dolayı, çalışma noktasının hareket ettiği zaman belirlenebilir. Bu OLTC hareketi Thevenin eşdeğeri iv) ve v) denklemlerinin çözümünden elde edilen bu eğrilerden yük talebini başlangıç seviyelerine getirmek ister. Bu değişiklik tester devreye sokulduktan sonra Şekil 5-10 ve Şekil 5-11’de $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleriyle gösterilmiştir.

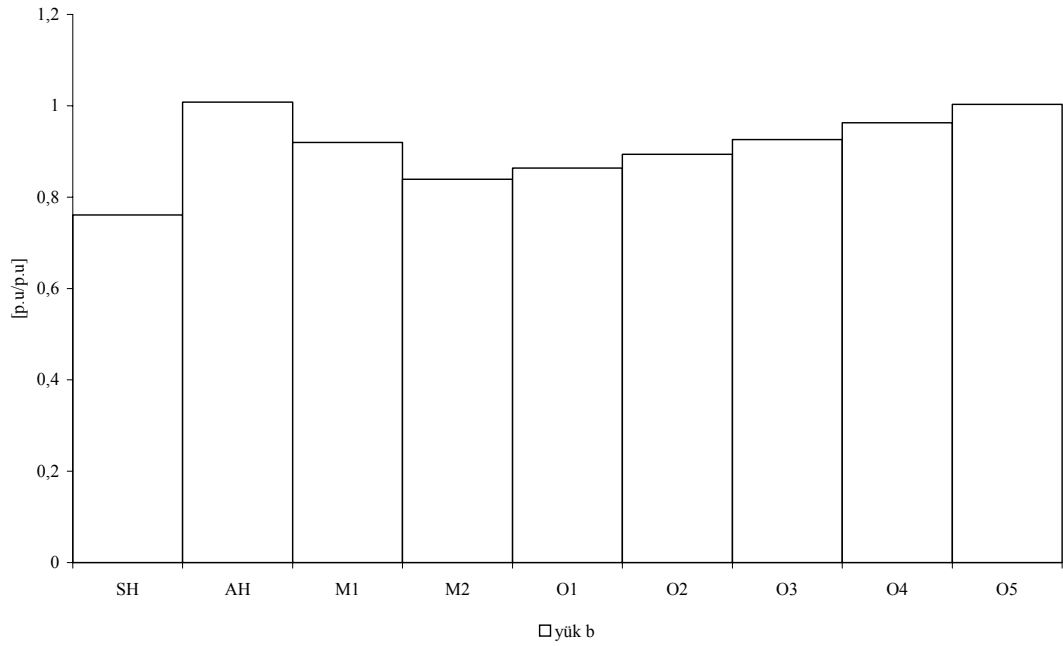


Şekil 5-9: Farklı yük güç-gerilim hassasiyetleri ve yük a ve b için $\Delta V/\Delta P$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).

İndeksin işaretinin her iki yük içinde negatif olması aktif yük için çalışma noktasının sistem eğrisinin üst tarafında gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5-10: Jeneratör reaktansı göz önüne alınarak farklı yük güç-gerilim hassasiyetleri ve yük b için $\Delta V/\Delta P$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).



Şekil 5-11: Jeneratör reaktansı göz önüne alınarak farklı yük güç-gerilim hassasiyetleri ve yük b için $\Delta V/\Delta Q$ indikatörleri ($\alpha=1.2$, $\beta=3$).

Şekillerden görülmektedir ki indeksin işareti pozitifdir dolayısıyla sistem alçak gerilim çözümünde bir sonuca ulaşmıştır. MSC tarafından gerçekleştirilen düzeltici hareketler, sistemi eğri üzerinde daha yüksek bir çalışma noktasına doğru taşıyabilirken OLTC adımları sistemi daha da zorlamaktadır.

5.2 Sonuç

Bir önceki bölümde nasıl bir tester sorusunun cevabı aranmış ve sonuç olarak yük ile aynı karakterde fakat yükün çok küçük bir miktarındaki ve aynı güç katsayısına sahip bir başka yükün tester olarak kullanılabileceğine karar verilmişti. Bu bölümde böyle bir yük devreye eklenmiş ve sistemin bu yüke verdiği cevap ile değerlendirme yapılmaya çalışılmıştır. Testeri sistemde bulunan yükün karakteristiğine uyumlu hale getirebilmek için Şekil 5-1’de görülen küçük bir kontrol devresi eklenerek yükteki değişimler izlenmiş ve testerin kendisini bu değişimlere adapte etmesi sağlanmıştır.

Şekil 5-5 ve Şekil 5-6’daki indeksin işaretinden görülmektedir ki sabit empedanslı yüklerde sistem hem a hem de b yükü için P-V ve Q-V eğrinin üst tarafında çalışmaktadır. Fakat b yükü daha büyük bir yük olduğu için b yükünün indeksinin büyüklüğü de a yükünün indeks büyüklüğünden daha büyük bir değer almıştır. Yine burada sistemde bulunan MSC ve OLTC’lerin sistemin gerilimine pozitif bir etki yaptığı da görülmektedir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur ki, bu elemanların her bir adımından sonra indekslerin mutlak değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Mutlak değerlerin büyümesinin anlamı eğri üzerindeki çalışma noktasının eğiminin büyüdüğünü göstermekte ve bu da sistemin kritik noktaya yakınlığının bir ifadesi olmaktadır. İşte bu noktada artık sistemin yüklemelere karşı daha hassas olduğu açıktır.

Şekil 5-7, Şekil 5-8 ve Şekil 5-9 gerilim hassasiyetli yükler için indeksleri gösteren şekillerdir. Şekil 5-7, a yükü için sistemin reaktif gücünü gösteren indekslerden oluşmaktadır. Buradan görülmektedir ki, sistem tüm durumlar için eğrinin üst kısmında kendine bir çalışma noktası bulmaktadır. Fakat indeksin mutlak değerinin sürekli artması sistemin her bir MSC ve OLTC adımından sonra düşüm noktasının gerilimini daha iyi bir değere taşısa bile reaktif güç bakımından sistemi kritik noktaya daha da yakınlaştırdığını göstermektedir. Şekil 5-8 incelendiği zaman yük b için aynı iyimserlikte yorum yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir. İndeks değerlerinden görüldüğü gibi sistem arıza sonrasında bile Q-V eğrinin üst kısmında kendine bir çalışma noktası bulabilirken MSC ve OLTC lerin devreye alınmasında problemler ile karşılaşmaktadır. İndeksin mutlak değerinin çok büyümesi sistemin Q-V eğrinin devrilme noktasına doğru sürüklendiğini

göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ikinci OLTC’de çok büyüyen indeks değerinin anlamı; sistemin, devrilme noktası sınırlarına dayandığını gösterirken üçüncü OLTC adımıyla ortaya çıkan süreksizlik sistemin artık devrilme noktasında çalıştığını göstermektedir. Yine üçüncü OLTC adımıyla sonra indeks değerleri pozitif olmakta, bu da sistemin artık eğrinin alt kısmında yani alçak gerilim çözümünde çalıştığını göstermektedir ki bu durum çökmeye çok yakın olan bir durumun göstergesidir. Şekil 5-9’da a ve b yükü için aktif güç indeksleri verilmiştir. Burada görülmektedir ki hem a hem de b yükü eğrinin üst kısmında çalışır iken MSC ve OLTC adımları da sistemin gerilimini yükseltmeye çalışmaktadır. Fakat indeksin mutlak değerindeki artış özellikle b yükü için sistemin her bir adımdan sonra kritik noktaya biraz daha yakınladığını göstermektedir.

Sonuç olarak söylenebilir ki, b yükü için reaktif güçten dolayı ikinci OLTC adımıyla sonra sistem çökmeye gideceği için Transformatörlerin OLTC’lerinin b yükü için en fazla ikinci adımının devreye alınmasına müsaade edilmeli ve bu adımdan sonra OLTC lerin devreye alınmasına engel olunmalıdır.

6. SONUÇ

6.1 Souçlar Ve Gelecek Çalışma

Güç sistem mühendislerinin en önemli problemlerinden biri olan gerilim kararlılığı analizleri bu çalışmanın temelini oluşturmuştur. Çalışmanın giriş bölümünde izah edildiği gibi ilk önce gerilim kararlılığı problemlerine genel yaklaşımlar incelenmiş, bilahare P-V ve Q-V eğrilerin gerilim kararlılığı problemlerinde nasıl kullanıldığı araştırılmıştır.

Eğer bir sistemin P-V ve Q-V eğrisi biliniyor ve sistemin yük modelleri belirli ise bu sistemin gerilim kararlılığı analizlerini yapmakta mevcut birçok araç olduğu ve bunların bir çok başarılı uygulamalarının olduğu bilinmektedir. Ancak bu metodlarda çok fazla dataya ihtiyaç duyulmaktadır. Güç sistemlerinin değişen tabiatı bu dataların kolaylıkla elde edilmesini mümkün kılmamaktadır. Bu çalışmanın temel amacı sistem hakkında yeteri kadar bilgi elde edilemediği durumlarda gerilim kararlılığını belirleyebilmek için izlenmesi gereken yöntemi belirlemektir. Bu aşamada yeni bir yaklaşım sergilenerek sistem hakkında yeteri kadar bilgi yokken sistemin kararlılığına karar vermek için olabilecek indisler incelenmiştir. Bunun için sistem eğrisinin eğiminin belirlenmesi hedef alınmıştır. Eğrideki değişim incelenerek sistemin hangi noktada çalıştığına karar verilmiştir.

Yukarıda belirtilen sistem eğrisinin eğimini belirlemek için yükün çok küçük bir oranı kadar bir test elemanını ekleyerek sistem büyüklüklerindeki değişim incelenmiş ve eğim $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ oranı ile belirlenmeye çalışılmıştır. Devreye eklenecek bu küçük test yükünün nasıl olması gerektiği üzerinde bazı tartışmalar yapılmış ve çeşitli denemelerden sonra sistem ile aynı karakteristiklere sahip bir yükün sisteme eklenmesi ile en sıhhatli sonuca ulaşılabileceğine karar verilmiştir.

Yapılan tüm çalışmalarda sistemde var olduğu düşünülen iki ayrı yük dikkate alınarak analizler yapılmaya çalışılmıştır. Yine bu iki yükün önce sabit empedanslı yükler olduğu dikkate alınarak hareket edilmiş ve daha sonra bu yüklerin gerilime bağlı lineer olmayan yükler olduğu varsayılarak sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Burada a ve b ile verilen iki yük şartında b yükü a yükünden daha büyük bir yükü simule etmektedir. Bu sebep ile b yükü için her zaman sınır şartlarına daha yakın ve

daha kritik değerler ile karşılaşılmıştır. Radial g sisteminin iki iletim hattından birinin kaybı, olası bir arıza durumu olarak ele alınmış ve gerilim seviyesini tekrar arıza öncesi seviyeye getirmek için, aynı sistemdeki bölgesel hareketlerin etkileri P-V ve Q-V eğrileri ile gösterilmiştir.

Kapasitör eklenmesiyle oluşan gerilim ve g üretimindeki değişiklerle ilgili, sistemin durum indikatrlerini elde etmek için çeşitli metodolojilerden bahsedilmiştir. Sistem topolojisinde üretilen bir değişimin belirlenmesinde bu indikatörlerin güvenilir olduğu gösterilmiştir, fakat olması mümkün kritik gerilim şartları hakkında önemli bir bilginin elde edilemeyeceği görülmüştür. Temelde bu sebepten dolayı kapasitör eklenmesi P-V ve Q-V eğrilerinin eğimlerindeki gerilim ve güçteki değişikliklerle ilgilenmeye izin vermediği görülmüştür.

Yukarıda değinildiği gibi güç sistemlerinde kullanılan güç sistem düzenleyicilerinin sistemde nasıl bir etkiye sebep olduğu araştırılmıştır. Bunun için sisteme iki kademe MSC ve beş kademe OLTC ekleme imkanı olan iki ayrı cihaz eklenmiş ve bu cihazların davranışları incelenmiştir. Buradaki amaç MSC ve OLTC'lerin sistem cevaplarını bulmak ve sistemde meydana gelen herhangi bir olağanşt durumda güç sistem operatörlerinin nasıl bir yol izlemeleri gerektiğine ışık tutulmasıdır.

Sonuç olarak büyük bir g sisteminde yer alan bölgesel bir yükün oluşabilecek herhangi bir olağanşt durumdan nasıl etkileneceğine sistemin st kısmıyla ilgili bilgiler olmadan karar verilmeye çalışılmıştır. Yine bu sistemde ki MSC ve OLTC gibi cihazların devreye alınmasının sisteme nasıl etki ettiği incelenmiş ve bu elemanların nasıl tepkiler verdiği gösterilmiştir. Ayrıca hangi durumlarda bu elemanların devreye alınıp alınmaması gerektiğine nasıl karar verilmesi gerektiği belirlenmiştir.

6.2 İleri alışma nerileri

- Geliştirilen tester sistemin farklı yük modelleri içinde analizleri ileri bir çalışma olarak gerçekleştirilebilir.
- Testerın farklı restorasyon cihazlarıyla birlikte kullanılması analiz edilebilir

- Testerın daha büyük yük şartlarında kullanılabilirliği denenebilir.
- Testerın kompakt bir röle sistemi haline getirilerek ticari hale getirilmesi planlanmaktadır.
- Testerın fonksiyonları tam dinamik simölasyonlar ile teyid edilebilir.
- Saha denemeleri ileride gerçekleştirilecektir.

KAYNAKLAR

-
- 1 Eşiyok, E., Hocaoglu, A.T., Dumanlı, M., “Güç Sistemlerinde Yapay Sinir Ağları ile Yük Tahmin Analizi”, EMO 6. Ulusal Kongresi, Eylül 1995, pp.69-72
 - 2 Pal, M.K., “Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.1, February 1992, pp.243-249.
 - 3 El-Sadek, M.Z., Dessouky, M.M., Mahmoud, G.A., Rashed, W.I., “Load Representation for Steady-State Voltage Stability Studies”, Electric Power Systems Research, Vol.43, 1997, pp.187-195.
 - 4 Griffiths, H., Hocaoglu, M.H., Hocaoglu, A.T., “Topraklama Sistemlerinin Performans Analizinde Arıza Seviyesi Kontrolü ve Güvenlik Kriteri İçin Yeni Yaklaşımlar”, EMO 7. Ulusal Kongresi, Eylül 1997, pp.524-527.
 - 5 CIGRE' Task Force 38-02-10, Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena, CIGRE Report, 1993.
 - 6 Weedy, B.M., Cox, B.R., “Voltage Stability of Radial Power Links”, Proc. IEEE, Vol.115, No.4, April 1968, pp.528-536.
 - 7 Xu, W., Mansour, Y., Hydro, B.C. “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.1, February 1994, pp.479-493.
 - 8 Thomas, R. J., Tiranuchit, A., “Voltage Instabilities in Electric Power Networks”, IEEE proceedings 8th. Southeast Symposium on System Theory, 1986, pp.359-363.
 - 9 Deuse, J., Stubbe, M., “Dynamic Simulations of Voltage Collapses”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.3, August 1993, pp.894-904.
 - 10 Custem, T.V., Vournas, C.D. “Voltage Stability in Transient and Mid-Term Time Scales”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.1, February 1996, pp.146-154.
 - 11 Pal, M.K., “Voltage Stability: Analysis Needs, Modelling Requirement and Modelling Adequacy”, IEEE proceedings-C, Vol.140, No.4, July 1993, pp.279-286.

-
- 12 Canizares, C.A., "Program Manual; UWPFLOW, Continuation and Direct Methods to Locate Fold Bifurcations in AC/DC/Facts Power Systems", Canada, 1999.
 - 13 Sinha, A.K., Hazrika, D., "A Comparative Study of Stability Indices in a Power System", Electrical Power and Energy System, Vol.22, 2000, pp.589-596.
 - 14 Ekwue, A.O., Wan, H.B., Cheng, D.T.Y., Song, Y.H., "Voltage Stability Analysis on the NGC System", Electric Power Systems Research Vol.47, 1998, pp.173-180.
 - 15 Carpentier, J., Girard, R. and Scano, E., "Voltage Collapse Proximity Indicators From an Optimal Power Flow", Proceedings of the 8th Power System Computing Conference, Helsinki 1984, pp.671-678.
 - 16 Warland, L, Holen, A.T., "Estimation of Distance to Voltage Collapse: Testing an Algorithm Based on Local Measurements", 14th. PSCC, Sevilla, June 2002, pp.1-7.
 - 17 El-Keib, A.A, Ma, X., "Aplication of Artificial Neural Networks in Voltage Stabiltiy Assesment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.4, November 1995, pp.1890-1896
 - 18 Mori,H., "Decentralized Power System Voltage Control Using Artificial Neural Networks", IEEE ISACS, San diego, CA.May 1992, pp.1701-1704.
 - 19 Chang, C.S., Sutanto, D., and Lachs.W., "Automatic Control Of Voltage Instability by an Expert System Utilizing Pattern Recognition Techniques", Proc. Of the Tenth Power System Computation Conference, Graz, Austria, August 1990, pp.1057-1064.
 - 20 Liu,C.W., Chang,C.S., Su,M.C., "Neuro-Fuzzy Networks for Voltage Security Monitoring Based on Synchronized Phasor Measurments", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.2, May 1998, pp.326-332.
 - 21 Momoh, J.A, El-Hawary, M.E., "Electric Systems, Dynamics and Stability with Artificial Intelligence Applications", Marcel&Decker, USA, 2000.
 - 22 Hocaoglu, A.T., Hocaoglu, M.H., "Investigation of Stored Energy Levels through Lyapunov Function in a One-Generator and Infinite Bus System", UPEC'98, pp.45-48, 1998

-
- 23 Pavella, M., Murthy, P.G., "Transient Stability of Power Systems", John Wiley&Sons, England 1994.
 - 24 Vu, K., Begovic, M.M., Novosel, D., Saha, M.M., "Use of Local Measurements to Estimate Voltage Stability Margin", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.3 August 1999, pp.1029-1035.
 - 25 Vu, K.T., Novosel, D., "Voltage Instability Predictor (VIP)- Method and System for Performing Adaptive Control to Improve Voltage Stability in Power Systems", United States Patent US 6,219,591 B1, 17 April 2001.
 - 26 Vu, K.T., Julian, D.E., Gjerde, J.O., Saha, M.M., "Applications and Method for Voltage Instability Predictor (VIP)", United States Patent US 6,249,719 B1, 19 April 2001.
 - 27 Harford, W., "Method and Device for Assessing the Stability of an Electric Power Transmission Network", European Patent Application, EP1 217 709 A1, 26.06.2002.
 - 28 El-Sadek, M.Z., Mahmoud, G.A., Dessouky, M.M., Rashed, W.I., "Tap Changing Transformer Role in Voltage Stability Enhancement", Electric Power Systems Research, Vol.50, 1999, pp.115-118.
 - 29 El-Sadek, M.Z., Mahmoud, G.A., Dessouky, M.M., Rashed, W.I., "Combined Use of Tap-Changing Transformer and Static VAR Compensator for Enhancement of Steady-State Voltage Stabilities", Electric Power Systems Research, Vol.45, 1998, pp.47-55.
 - 30 Cusum, T.V., Vournas, C., "Voltage Stability of Electric Power Systems" Kluwer Academic Publisher, 1998, USA.
 - 31 Taylor, C.W., "Power System Voltage Stability", Mc Graw Hill, USA, 1993.
 - 32 Repo, S., "On-Line Voltage Stability Assessment of Power System- An Approach of Black-Box Modelling", PhD Thesis, Tampere University of Technology, Finlandiya, 2001
 - 33 IEEE std 493-1997, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", 1997.
 - 34 Bollen, M.H.J., "Understanding Power Quality Problems", IEEE Press Marketing, USA, 2000.

-
- 35 CIGRE Working group 38.01, "Planning Against Voltage Collapse," *Electra*, March 1987, pp.55-75.
 - 36 Pal, M.K., "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics" *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.7, No.1, February 1992, pp.243-249.
 - 37 Weedy, B.M., "Electric Power Systems" Third Edition Revised, John Wiley & Sons, 1987 (earlier edition 1967, 1972, and 1979).
 - 38 Hill, D.J., Lof, P.A. and Andersson, G., "Analysis of Long Term Voltage Stability," Tenth Power System Computing Conference, Graz Austria, Adequacy", July 1990, pp.1252-1259.
 - 39 IEEE committee Report "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-101, No.7, July 1982, pp.1894-1898.
 - 40 Cusum, T.V., "Dynamics and Static Aspects of Voltage Collapse" *Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security*, EPRI EL-6183, January 1989, pp.6-55-6-79.
 - 41 Tamura, Y., "A Scenario of Voltage Collapse in a Power System with Induction Motor Loads with a Cascaded Transition of Bifurcations," *Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena II: Voltage Stability and Security*, Deep Creek Lake, Maryland, 4-7 August 1991, pp.143-146.
 - 42 IEEE Committee Report, "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience", IEEE Publication 90th., 0358-2-PWR
 - 43 Cate, E.S., Hemmaplardh, K., Manke, J.W. and Gelopoulos, D.P., "Time Frame Notion and Time Response of the Models in Transient, Mid-Term and Long-Term Stability Programs," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-103, No.1, January 1984, pp.143-151.
 - 44 Taylor, C.W., "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability" *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.7, No.2, April 1992, pp.480-488.
 - 45 Clark, H.K., "Voltage Stability: Criteria, Planning Tools, Load Modelling", EPRI/NERC Forum on Operational and Planning Aspects of Voltage Stability, Breckendridge, Colorado, 14-15 September 1992.

-
- 46 Sekine, Y., Takahashi, K., Ichida, Y., Ohura, Y., Tsuchimori, N., "Method of Analysis and Assessment on Power System Voltage Phenomena, and Improvements Including Control Strategies for Greater Voltage Stability Margins", CIGRE, 1992, pp. 38-206.
- 47 McInnis, D., "South Florida Blackout," Florida Power & Light Report.
- 48 CIGRE Working Group 14-07 and IEEE Working Group 15.05.05, "Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations Having Low Short Circuit Capacities," Part I: AC/DC Interaction Phenomena, CIGRE, June 1992.
- 49 Pal, M.K., "Discussion of an Investigation of Voltage Instability Problems", IEEE Trans. on Power systems, Vol.7, No.2, May 1992, pp.600-611.
- 50 Barbier, C. and Barret, J.P., "Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System," *Revue Generale de l'electricite*, Vol.89, pp.672-690, October 1980.
- 51 IEEE System Dynamic Performance Subcommittee, Power System Engineering Committee, "Standard Load Models for Power Flow and Dynamics Performance Simulation" IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.3, August 1995, pp.1302-1313.
- 52 Cusum, T.V., "Voltage Collapse Mechanisms: A Case Study," Proceedings: Bulk power system voltage phenomena II: Voltage stability and security, Deep Creek Lake, Maryland, pp.85-101, 4-7 August 1991.
- 53 Padiyar, K.R. "Power System Dynamics Stability and Control" John Wiley & Sons, Singapore, 1996.
- 54 Weedy, B.M. and Cox, B.R., "Voltage Stability of Radial Power Links", IEE Proceedings, Vol.115, pp.528-536, April 1968.
- 55 Xu, W. and Mansour, Y., "Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.1, February 1994, pp.479-493.
- 56 Concordia, C. and Ihara, S., "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No.4, April 1982, pp.969-977.

57 IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance (Chairman: W.W.Price), "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.2, May 1993, pp.472-482.

58 IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance (Chairman: W.W.Price), "Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.3 August 1995, pp.1302-1313,.

59 Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-hill, New York, 1994.

60 Concordia, C., "Voltage Instability", Electrical Power & Energy Systems, Vol.13, No.1, February 1991, pp.14-20.

61 Ohtsuki, H., Yokoyama, A. and Sekine, Y., "Reverse Action of On-Load Tap Changer in Association with Voltage Collapse", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.6, No.1, February 1991, pp.300-306.

62 Borghetti, A., Caldon, R., Mari, A., Nucci, C.A., "On Dynamic Load Models For Voltage Stability Studies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol2, No.1, February 1997, pp.293-303.

63 IEEE Task Force: "Voltage Stability Assessment: Concepts. Practices and Tools", IEEE/PES, Power System Stability Subcommittee Special Publication, Final Document, August 2002.

64 Griffiths, H., Caldon, R., Mari, A. and Turri, R., "Investigation into Local Dynamic Indicators of Power System Voltage Stability", Proc. of the 29th Universities Power Engineering Conference (UPEC), Galway, September 1994, pp779-782.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Turan Hocoğlu, 1967 yılında Antakya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini burada tamamladıktan sonra, 1984 yılında Antakya Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü’nü bitirdi. 1985 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği (akşam) bölümüne kayıt yaptırdı. 1990 yılında mezun oldu. Bu tarihten itibaren İstanbulda bir asansör firmasında mühendis olarak çalışmaya başladı. 1992 yılında askerlik görevi nedeniyle çalıştığı firmadan ayrıldı. Askerlik dönüşü İstanbul’da elektrikli ev aletleri üretimi yapan özel bir fabrikada imalat müdürülüğü görevini yaptı. 1994 yılında EMO İstanbul Şubesi müdürü olarak göreve başladı. Aynı yıl Eylül döneminde GYTE Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans çalışmalarına başladı. 1985 yılında GYTE’ne araştırma görevlisi olarak atandı. 1996 Temmuz ayında GYTE tarafından tez konusu üzerinde araştırma yapmak üzere bir yıl süreile görevli olarak University of Wales-Cardiff’e (İngiltere) gönderildi. 1997 yılında yüksek lisansını tamamladı ve aynı yıl GYTE’de doktora çalışmasına başladı. 1999 yılında GYTE’deki araştırma görevliğinden ayrılarak TSE Kalite Kampusü Elektronik Laboratuvarında göreve başladı ve 2000 yılında Laboratuvar müdürlüğü görevine atandı. Evli ve iki çocuk babası olan Ahmet Turan Hocaoglu; halen TSE Kalite Kampusü Elektronik Laboratuvarı Müdürü olarak görev yapmaktadır.