

46553

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y.Ö. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTON MERKEZİ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞININ

YENİ BİR YAKLAŞIMLA İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Mehmet Ali YALÇIN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Şubat 1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Temmuz 1995

Tez Danışmanı : Prof. Dr. H. Nusret YÜKSELER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Emin TACER

Prof. Dr. A. Oğuz SOYSAL

TEMMUZ 1995

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın hızla artması sonucunda yeni üretim merkezleri kurmak kaçınılmaz olmaktadır. Ancak çeşitli faktörler nedeniyle üretim merkezlerini her zaman büyük tüketicilerin yakınına kurmak olanaklı değildir. Bunun sonucunda da büyük miktarlarda ki enerjiyi uzak mesafelerden taşıma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum pek çok problemle birlikte kararlılık sorununu da gündeme getirmektedir. Fakat son yıllarda Amerika, Avrupa ve Japonyada gelişen bazı olaylar, klasik kararlılık kavramının dışında yeni bir problemi gündeme getirmiştir. Enerji sistemi içinde, yük baralarında, gerilimin ardışıl bir biçimde ve hızla azalması ve bunun sistemin diğer yük baralarına da yayılması şeklinde karakterize edilen ve önceleri gerilim çığı ya da gerilim çökmesi şeklinde anılan olaylar daha sonraları " Gerilim Kararlılığı" başlığı altında geniş çapta incelenmeye başlamıştır.

Bu çalışmada, farklı işletme büyüklüklerinin ve hat düzenlerinin, gerilim kararlılığına olan etkilerinin, yük akışı analiz yöntemleri göz önüne alınarak, yeni bir yaklaşımla incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım sırasında yakın ilgilerini gördüğüm danışman hocam, sayın Prof.Dr.H.Nusret YÜKSELER ' e, teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul, 1995

Y.Müh. Mehmet Ali YALÇIN

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 ELEKTRİKSEL YÜKLER VE İLETİM HATLARI	4
2.1. Sabit Empedans Yükleri	4
2.2. Sabit Akım Yükleri	5
2.3. Sabit Güç Yükleri	6
2.4. İletim Hatları	7
2.4.1. Orta Uzunlukta Hatlar	8
2.4.2. Uzun İletim Hatları	8
2.4.3. Seri veya Paralel Bağlı Devreler için Hat Sabitleri	9
BÖLÜM 3 SÜREKLİ HAL GERİLİM KARARILILIĞI	11
3.1. P-V Eğrilerinin Elde Edilmesi	12
3.2. P-V Eğrileri Üzerine Bazı Yorumlar	15
3.2.1. Güç Faktörünün Etkileri	15
3.2.2. Hat Uzunluğunun Etkileri	16
3.2.3. Hat Kayıp Faktörünün Etkileri	16
3.2.4. Hat Başı Geriliminin Etkileri	17
3.2.5. Kullanılan Paralel Hat Sayısının Etkileri	18
3.2.6. Hat Sonundaki Kapasitif Kompanzasyonun Etkileri	19
3.2.7. Hat Sonundan Sabit Reaktif Güç Çekilmesinin Etkileri	20
3.2.8. Seri Kompanzasyonun Etkileri	21
3.2.9. Şönt Kompanzasyonun Etkileri	24
3.2.10. Seri ve Şönt Kompanzasyonun Birlikte Kullanım Etkileri	27
3.3. Kritik Değerlerin Doğrudan Belirlenmesi ve Farklı Hat Modelleri İçin Yapılan İncelemeler	28
3.3.1. Kritik Değerlerin Belirlenmesi	28
3.3.2. Göz Önüne Alınan Hat Modelleri ve Yapılan İncelemeler	31

BÖLÜM 4	DİNAMİK GERİLİM KARARLILIĞI	41
4.1.	Dinamik Yük Modelleri	41
4.2.	Temel Denklemler	44
4.3.	Simülasyonun İşleyişi	47
4.4.	Gerilim Kararlılığının Temel Geçici Mekanizması	49
4.5.	Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler ve Korumanın Esasları	50
4.5.1.	Temel Durumlar	50
4.5.2.	Gerçek Uygulamalar	53
4.6.	Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler	57
4.6.1.	Yükün Çeşidi	57
4.6.2.	Motor Mekanik Yükünün Yüzdesi	58
4.6.3.	Motor Mekanik Yükünün Karakteristiği	58
4.6.4.	Motorun Rotor ve Mekanik Yükünün Ataleti	59
4.6.5.	Yük Kısa Devre Seviyesi	59
4.6.6.	Generatör Dinamiklerinin Etkisi	60
4.6.7.	İletim Hattının Uzunluğu	61
4.7.	Modellere Göre Dinamik Yüklerin Bozucu Etkilere Cevabı ..	61
BÖLÜM 5	N BARALI BİR SİSTEMDE GERİLİM KARARLILIĞI	64
5.1.	Ayrık Yük Akışı	68
5.1.1.	Newton Yük Akışı Yönteminin Genel İfadeleri	69
5.1.2.	Yük Akışı Çözümü	70
5.1.3.	Ayrık Yük Akışı Yönteminin Uygulanması	73
5.2.	Geliştirilen Yöntemin İncelenmesi	77
5.2.1.	4 Baralı Örnek Sistem	77
5.2.2.	4 Baralı Örnek Sisteme ait Yük Akışı	78
5.2.3.	Uygulanan Yöntem : N baralı Sistemin 2 Baralı Sisteme İndirgenerek İncelenmesi	79
5.2.3.1.	Problemin Formülasyonu	79
5.2.3.2.	Genel Akış Şeması	80
5.2.3.3.	Yöntemin 4 Baralı Örnek Sisteme Uygulanarak Açıklanması.	80
5.3.	İncelenen Sistemler	90
5.3.1.	11 Baralı Sistem	90
5.3.2.	İndirgenmiş TEK Kuzeybatı Anadolu (KBA) Sistemi	92
5.3.3.	11 Baralı Sistem İçin İncelenen Durumlar	93
5.3.3.	KBA Sistemi İçin İncelenen Durumlar	102
SONUÇLAR ve ÖNERİLER		109
KAYNAKLAR		116

Ek A	P-V Eğrilerinin Elde Edildiği Analitik İfadeler.	123
Ek B	P_{crit} , V_{crit} , δ_{crit} İfadelerinin Çıkartılması	125
Ek C	Kayıp Hat için İfadelerin Çıkartılması	129
Ek D	Hat Modelleri İçin A, B Sabitlerinin Belirlenmesi ...	132
Ek E	Asenkron Motorun Hareket Denkleminin Elde Edilmesi ...	136
Ek F	Hat Modelleri İçin Kritik Değerlere İlişkin Eğriler	137
Ek G	Dinamik Yüklerin Hat Modellerine Göre Etkileri	167
Ek H	Programlar	192
ÖZGEÇMİŞ		207

Notasyon Listesi

V	:	Gerilim,
S	:	Görünür Güç
P	:	Aktif Güç
Q	:	Reaktif Güç
δ	:	Yük Açısı
$\cos\phi$	:	Güç faktörü
Z	:	Empedans
R	:	Omik Direnç
X_L	:	Endüktif Reaktans
X_c	:	Kapasitif Reaktans
P_N	:	Nominal Güç
γ	:	Propagasyon Sabiti
α	:	Zayıflama Sabiti
β	:	Faz Sabiti
A, B, C, D	:	Hat Sabitleri
V_r	:	Alıcı Uç Gerilimi
V_s	:	Gönderici Uç Gerilimi
I_r	:	Alıcı Uç Akımı
I_s	:	Gönderici Uç Akımı
f	:	Frekans
ω	:	Açısal Frekans
ω_0	:	Açısal Frekans (temel frekansta)
l	:	Hat Uzunluğu
K_s	:	Seri Kompanzasyon Yüzdesi
K_d	:	Şönt Kompanzasyon Yüzdesi
θ	:	Hat Empedansının Açısı
Z_0	:	Karakteristik Empedans (kayıpsız hat için)
Z_0'	:	Karakteristik Empedans (kayıplı hat için)
δ_{crit}	:	Kritik Yük Açısı
V_{crit}	:	Kritik Gerilim
P_{crit}	:	Kritik Güç
SIL	:	Hattın Doğal Yüğü (Surge Impedance Loading)
r_1	:	Stator Bir Faz Sargısının Direnci
r_2'	:	Rotor Bir Faz Sargısı Direncinin Statora İndirgenmiş Değeri
X_2	:	Stator Bir Faz Sargısının Kaçak Reaktansı

X_2'	:	Rotor Bir Faz Sargısı Kaçak Reaktansını Statora İndirgenmiş Değeri
s	:	Kayma
P_{ek}	:	Asenkron Motorun Şebekeden Çektiği Aktif Güç
Q_{ek}	:	Asenkron Motorun Şebekeden Çektiği Reaktif Güç
I_k	:	Atalet Momenti
H	:	Atalet Sabiti
Y_{BARA}	:	Bara Admitans Matrisi
Q_{mak}	:	Generatör Baralarından Çekilebilecek Maksimum Reaktif Güç Sınırı
Q_{min}	:	Genaratör Baralarından Çekilebilecek Minimum Reaktif Güç Sınırı
ε	:	İterasyon Sonuçlandırma Kriteri

İndisler ve Kısaltmalar

crt	:	Kritik
c	:	Kapasitif Büyüklüğe Ait
s	:	Gönderici Uç (sending end)
r	:	Alıcı Uç (receiving end)
TEK	:	Türkiye Elektrik Kurumu
KBA	:	Kuzey Batı Anadolu
TCR	:	Tristör Kontrollü Reaktör

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa No
2.1. Sabit empedanslı yükün uç gerilimi değişimine karşı cevabı	5
2.2. Sabit akımlı yükün uç gerilimi değişimiyle etkileşimi	6
2.3. Sabit empedanslı yükün uç gerilimi değişimine karşı cevabı	6
2.4. Orta uzunluktaki bir hattın nominal π devresi yardımıyla gösterilimi . .	8
2.5. Uzun iletim hattının şematik gösterilimi	8
2.6. Uzun bir iletim hattının eşdeğer π devresi yardımıyla gösterilimi	9
2.7. Seri bağlı iki kapılı devre	9
2.8. Paralel bağlı iki kapılı devre	10
3.1. İletim hattının iki kapılı devre olarak gösterilimi	12
3.2. Göz önüne alınan örnek iletim hattı	13
3.3. Örnek iletim hattına ilişkin P-V eğrisi	14
3.4. Farklı güç katsayıları için P-V eğrileri	15
3.5. Farklı hat uzunlukları için P-V eğrileri	16
3.6. Farklı hat kayıp faktörleri için P-V eğrileri	17
3.7. Farklı hatbaşı gerilimleri için P-V eğrileri	17
3.8. Örnek devrenin yeniden düzenlenmiş hali	18
3.9. Paralel çalışan hatlar için P-V eğrileri	19
3.10. Şönt kapasiteli iletim hattı	20
3.11. Farklı reaktif güç kompanzasyon seviyeleri için P-V eğrileri	20
3.12. Sabit ancak farklı değerlerdeki reaktif güç talebi için P-V eğrileri . . .	21
3.13. Seri kompanzasyonun A, B sabitlerine etkileri	22
3.14. Bir iletim hattında seri kompanzasyonun a) yapılmaması b) yapılması durumları için P - δ eğrileri	23
3.15. Farklı yüzdelerde seri kompanzasyon yapılması durumunda elde edilen P-V eğrileri	24
3.16. Uzun bir iletim hattının eşdeğeri ve çeşitli yük durumlarında gerilim dağılımı	25
3.17. Yüksüz durumdaki şönt kompanzasyonlu bir hattın gerilim profili . . .	26
3.18. Farklı yüzdelerde şönt kompanzasyon yapılması durumunda elde edilen P-V eğrileri	26
3.19. Yarı iletken anahtarlama şönt reaktörlerle yapılan kompanzasyonun prensip şeması ve gerilim değişimi	27
3.20. Seri ve şönt kompanzasyonun birlikte uygulanması durumunda elde edilen P-V eğrileri	28
3.21. Farklı kompanzasyon konumlandırılmaları için göz önüne alınan hat modelleri	32
3.22. İncelenen modellerin kritik güç değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi	34
3.23. İncelenen modellerin kritik gerilim değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi	35

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
3.24. İncelenen modellerin kritik yük açısı değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi	36
3.25. İncelenen modellerin kritik güç değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi	37
3.26. İncelenen modellerin kritik gerilim değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi	38
3.27. İncelenen modellerin kritik gerilim değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi	39
4.1. Sabit güç yükünün adım cevabı	42
4.2. Kontrollü omik yükündinamiğinin P-V eğrisi üzerinde yorumlanması ..	43
4.3. Asenkron motorun eşdeğer devresi	44
4.4. Asenkron motorun a) PV eğrileri b) devir sayısı moment karakteristiği	45
4.5. Dinamik benzetişime ilişkin akış şeması	48
4.6. a) Örnek sistem, b) P-V + Yük karakteristik eğrileri	49
4.7. Farklı bara gerilimleri ve farklı arıza temizleme süreleri için asenkron motorun P-Q eğrileri ve P-V eğrilerine göre durum	51
4.8. Kompanzasyon yapılmaması ve farklı süreler sonunda kompanzasyon uygulanması durumları için P-Q eğrileri	54
4.9. Yari iletken anahtarlamalı statik VAR kompanzasyonu	56
4.10. Bozucu etki sonrası farklı yüzdeli karma yüklerin gerilim cevapları ...	57
4.11. Asenkron motor yükünün farklı yüzdeleri için gerilim cevapları	58
4.12. Farklı mekanik yükler için asenkron motor yükünün gerilim cevapları ..	59
4.13. Motor atalet sabitinin farklı değerleri için asenkron motor yükünün gerilim cevapları	59
4.14. Farklı yük kısa devre seviyeleri için asenkron motor yükünün gerilim cevapları	60
4.15. Farklı yapıdaki Generatör baraları için asenkron motor yükünün gerilim cevapları	60
4.16. Farklı uzunluktaki iletim hatlarına bağlı asenkron motor yükünün gerilim cevapları	61
5.1. Ayrık yük akışına ilişkin akış şeması	74
5.2. Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması	77
5.3. Dört baralı örnek sisteme gönderilen bara ve hat akımları	81
5.4. Dört baralı sistemin orjinal ve değiştirilmiş durumdaki bara numaralandırılması	85
5.5. İndirgenmiş iki baralı sisteme ait devreler	87
5.6. Değiştirilmiş 11 baralı sistem	90
5.7. İndirgenmiş KBA sistemi	92

TABLO LİSTESİ

Tablo	Sayfa No
3.1. Şekil 3.22 ' ye ilişkin veri tablosu	34
3.2. Şekil 3.23 ' ye ilişkin veri tablosu	35
3.3. Şekil 3.24 ' ye ilişkin veri tablosu	36
3.4. Şekil 3.25 ' ye ilişkin veri tablosu	37
3.5. Şekil 3.26 ' ye ilişkin veri tablosu	38
3.6. Şekil 3.27 ' ye ilişkin veri tablosu	39
4.1. Dinamik yüklerin bozucu etkilere göre iyilik sırası	62
5.1. Gerilim kararlılığı metodlarının genel sınıflandırılması	64
5.2. Bara tipleri	69
5.3. Dört baralı örnek sisteme ilişkin hat dataları	77
5.4. Dört baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük dataları	77
5.5. Kritik bara yüklerinin farklı yüzdelerinde hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (Generatör reaktif güç limitleri mevcut).	88
5.6. Kritik bara yüklerinin farklı yüzdelerinde hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (Generatör reaktif güç limitleri hesaba katılmıyor)	89
5.7. Değiştirilmiş 11 baralı sisteme ilişkin hat verileri	91
5.8. Değiştirilmiş 11 baralı sisteme ilişkin generatör ve yük verileri	91
5.9. İndirgenmiş KBA sistemine ilişkin hat verileri	92
5.10. İndirgenmiş KBA sistemine ilişkin generatör ve yük verileri	93
5.11. Değiştirilmiş 11 baralı sistem	94
5.12.a. Besleme hatları tek hat (her bir bara için ayrı)	94
5.12.b. 8-13 besleme hattı tek hat	95
5.12.c. 9-14 besleme hattı tek hat	95
5.12.d. 11-16 besleme hattı tek hat	95
5.12.e. 11-16 hariç bütün besleme hatları tek hat	96
5.13.a. Salınım barası 12. bara	96
5.13.b. Salınım barası 13. bara	97
5.13.c. Salınım barası 14. bara	97
5.13.d. Salınım barası 15. bara	97
5.14.a. Tüm bağlantı baralarında $\cos\phi=1$	98
5.14.b. Tek tek bağlantı baralarında $\cos\phi=1$	98
5.14.c. Tüm bağlantı baralarında $\cos\phi=0.866$ (ileri)	98
5.14.d. Tek tek bağlantı baralarında $\cos\phi=0.866$ (ileri)	99
5.15.a. Sistem yükü % 10 azaltılmış	99
5.15.b. Sistem yükü % 10 artırılmış	99
5.16.a. 9-14 uzun hattına şönt kompanzasyon uygulanması	100
5.16.b. 9-14 uzun hattına seri kompanzasyon uygulanması	100

5.17.a.	Hat kapasitelerinin iki katına çıkarılması durumu	101
5.17.b.	Generatörler için reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumu	101
5.17.c.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik güçlerin gerçek kritik güçlere oranları	102
5.17.d.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik gerilimlerin gerçek kritik gerilimlere oranları	102
5.17.e.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik yük açılarının gerçek kritik yük açılara oranları	102
5.18.	KBA sistemi	103
5.19.	Batı kaynakları %50 azaltılmış doğu kaynakları %100 arttırılmış	103
5.20.	1-10 hattı % 75 şönt kompanze edilmiş	104
5.21.a.	Tüm yükler için $\cos\phi=1$	104
5.21.b.	1. bara için $\cos\phi=1$	105
5.21.c.	2. bara için $\cos\phi=1$	105
5.21.d.	3. bara için $\cos\phi=1$	105
5.21.e.	4. bara için $\cos\phi=1$	106
5.22.a.	4-5 iletim hattının tek hat olması durumu	106
5.22.b.	4-5 iletim hattının açık olması durumu	107
5.22.c.	1-10 iletim hattının açık olması durumu	107
5.23.a.	Generatörler için reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumu	108
5.23.b.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik güçlerin gerçek kritik güçlere oranları	108
5.23.c.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik gerilimlerin gerçek kritik gerilimlere oranları	108
5.23.d.	Reaktif güç sınırlarının kaldırılması durumunda hesaplanan kritik yük açılarının gerçek kritik yük açılara oranları	108

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, farklı hat işletme düzenlerinin ve elektriksel büyüklüklerin gerilim kararlılığına olan etkileri, yüklerin statik ve dinamik etkilerini de kapsayacak şekilde, ve yük akışı analizlerinin uygulamalarına dayalı olarak incelenmiştir. Öncelikle, yükler gerilim kararlılığı açısından bir sınıflandırılmaya tabi tutularak genel yapıları incelenmiştir. Esas çalışma ise üç ana grupta toplanmıştır.

Birinci grupta, iki baralı bir sistem için, statik anlamda incelemeler yapılmıştır. Önce iki bara arasına bağlı paralel hatlar için, statik gerilim kararlılığı açısından önemli bir gösterge olan ve hat sonundan çekilen güç ile hat sonu geriliminin genliğinin değişimini gösteren P-V eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerin elde edildiği analitik ifadeler yardımıyla; güç katsayısının, paralel hat sayısının, hat başı geriliminin, hat kayıplarının, hat uzunluğunun, reaktif güç kompanzasyonunun, seri ve şönt kompanzasyonların, P-V eğrilerini nasıl etkilediği ve eğri üzerindeki kritik gerilim ve güç noktasının değişimleri örnek bir hat üzerinde incelenmiştir. Daha sonra ise yine örnek hat üzerinde, çeşitli nokatalarda seri ve şönt kompanzasyonlar uygulanarak altı değişik hat işletim modeli elde edilmiştir. Bu arada P-V eğrileri üzerindeki kritik noktaları veren ifadeler doğrudan elde edilerek, altı farklı hat işletim modelinde değişik yüzdelerde seri ve şönt kompanzasyonlar uygulanmış ve bunlara ilişkin kritik değerler doğrudan hesaplanarak bu hat modelleri için statik gerilim kararlılığı açısından bir iyilik sırası belirlenmeye çalışılmıştır.

İkinci grup çalışmalarda ise önce dinamik yük elemanları ve dinamik gerilim kararlılığı esasları incelemiş ve dinamik yük elemanı olarak seçilen asenkron motorun uç gerilimi değişimi ile, çeşitli koşullarda etkileşimleri gözlenmiştir. Daha sonra ise, örnek alınan altı hat modelinin herbirine asenkron motor yükü bağlı iken hatlardan birinin açması şeklinde bir bozucu etki uygulanmış ve farklı kompanzasyon yüzdeleri altında, hatların, dinamik yük elemanlarıyla birlikte dinamik gerilim kararlılığına etkileri incelenmiştir. Bu şekilde, bir hat işletim modelinin statik anlamda kritik değerleri belirlenirken, hatta dinamik yük elemanı bağlı olması durumundaki etkileri de irdelenerek çeşitli kıyaslamalar yapılmıştır.

Son grup çalışmada ise statik gerilim kararlılığı açısından, N-baralı sistemlerin incelenmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Buna göre sistemin herhangi bir yük durumu için yük akışı yapılarak, salınım barası ve gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen baranın dışındaki tüm baralardaki güçler eşdeğer admitanslara çevrilerek bara admitans matrisine katılmış, ve $n \times n$ lik Y_{BARA} 2×2 'ye indirgenerek, sistem, bahsedilen iki bara arasında indirgenmiştir. Bu şekilde elde edilen iki baralı sistemin ilk grup çalışmalarda belirlenen formüllerle kritik değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra ilgili baranın yükü artırılarak, yük akışı ıraksayana kadar kritik değerler hesaplanmaya devam edilmiştir. Bu yöntem, önce 11 baralı bir sisteme daha sonrada ülkemizden bir örnek olarak Kuzey Batı Anadolu Sistemine uygulanarak çeşitli işletme koşullarında denenmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF VOLTAGE STABILITY ON POWER TRANSMISSION SYSTEMS WITH A NEW APPROACH

Electric energy, which is superior to other types in its production, transmission, distribution, and consumption, today has a very wide potential of use. On the other hand the demand for it is increasing in time. It is not always possible to install power stations near the big consumers. Due to natural, environmental, economical, political and resource factors, the transmission of the energy produced away from the big consumer to these centers has some problems in it.

Among the design and management problems faced during the transmission on great amounts of energy over the long distances, stability has great importance. Stability analyses comprise the investigation of the problem that synchronous generators feeding the system will remain in synchronism or not following the disturbances such as faults, short circuits, line switching, loading and load reducing. Although in literature a great deal of research in this field has been report and lots of books and papers have been published, particularly in recent years some problems faced in the high-capacity transmission systems have led to the necessity of considering the case from various aspects.

In the cases reported in America, Europe and Japan, the voltage at some load buses has been observed to reduce abruptly and sequentially and this phenomenon to pass to other load buses. The places and dates of some typical cases of this phenomenon are (CARSON W.Taylor, Power System Voltage Stability, 1992) :

America :

- New York, September 1970
- Mississippi, July 1987
- Baltimore, July 1990

Europe :

- Belgium, August 1982
- Sweden, December 1983
- France, Dec. 78, Jan. 87, Feb. 90, Nov. 90
- England, May 1986

Japan :

- Tokyo, July 1987

This type of voltage reduction was first named voltage avalanche or voltage collapse and then it was studied widely under the title of voltage stability.

It is well known that there is strong relations between true power (P) and load angle (δ), reactive power (Q) and load voltage magnitude ($|V|$). In this context classical stability analysis can be based on the investigation of $P - \delta$ relation, and the voltage stability analysis on the investigation of $Q - |V|$ relation. The voltage stability can be defined as the ability of the system to maintain the bus voltage magnitudes within the specified limits whether under the steady-state or the transient conditions.

In these study, first electric loads is classified from the viewpoint of voltage stability into three categories :

- 1) Constant impedance loads (heaters, lighting devices etc.),
- 2) Constant current loads (applications of electrochemistry and electrometallurgy)
- 3) Constant power loads (controlled resistive loads, induction motors)

In this section the characteristics of loads and their responses to voltage variations are examined. It is also possible to classify the methods to analyse voltage stability as fallows:

- 1) Steady-State (Static) Methods;
 - a) Load-Flow Feasibility Methods,
 - Maximum Power Transfer,
 - Load-Flow Feasibility,
 - Multiple Load-Flow Solutions
 - b) Steady-State Stability Methods;
 - Eigen Values of Linearized Dynamics (λ),
 - Jacobien Matrix (J),
 - Singuler Value of Jacobien Matrix $\nu(J)$,
 - Sensitivity Matrices
- 2) Dynamic Methods
 - Extended Transient Stability Studies

In the present study load-flow feasibility method is applied.

The essential work is carried out in three areas. The first study is performed on a two-bus system. Primarily P - V curves showing the variation of the receiving end voltage magnitude with the true power at the receiving end for the parallel lines between two buses (keeping sending end voltage magnitude constant). On these curves two different voltage values are observed to correspond to a same power value. The higher - value one of the two points imply the steady -state and the other one is the insatiabile points.

The most interesting point on the curves is the singularity point for which there exist only one voltage value versus power. The voltage at this particular point is referred to as " Critical Voltage, V_{crit} " ; and the power as " Critical Power, P_{crit} " ; these values define the boundaries of steady-state voltage stability.

It is seen that load power factor and A, B constants of the transmission line exist in analytical expression of the P-V curves. Hence it is possible to examine the factors effecting the shape and critical points. For this end, the effects of power factor, reactive power compensation at the receiving end and the series or shunt compensation applied to the transmission line on P-V curves are investigated. The expression for critical values on the P-V curves are obtained directly by using singularity property of the Jacobien matrix and then per-unit values of these expressions in terms of surge impedance loading of a lossy line (pu-SIL).

Later, how these critical values are influenced by the increase in the percentage of series and shunt compensation, which are considered to be at various locations, thus producing six different operation modes, is calculated. The results obtained are given in tables and graphics, and using these outputs an goodness sorting in terms of steady-state voltage stability is obtained for six operation modes of transmission lines.

In the second section of the study, electric loads are considered as dynamic elements. There are two types of dynamic load elements; induction motors have fast transient characteristics, controlled resistive loads and Under Load Tap Changers (ULTC) have slow transient characteristics. Induction motors are taken as typical dynamic load models due to their simple structure modeling and the easiness in the understanding of their principles of operation. In the calculation of dynamic responses (true and reactive power) of these elements to voltage variations an algorithm is developed, which is in brief as follows :

- 1) Voltage at each bus is determined by load-flow analysis,
- 2) From the calculated bus voltage, the powers consumed by induction motor loads at that bus are obtained,
- 3) Slip (s) is found at time t by solving the following steady state and dynamic equations;

$$P_{ek} \cdot (1 - s_k) - P_{mk} = 0$$

$$\frac{ds_k}{dt} = \frac{1}{I_k \cdot \omega_o^2} \cdot \left(\frac{P_{mk}}{1 - s_k} - P_{ek} \right)$$

where,

- I_k : moment of inertia of induction motor k,
- s_k : slip of induction motor k,
- P_{ek} : electrical input power of induction motor k,
- P_{mk} : mechanical of induction motor k.

4) By applying a disturbing effect at time t_0 , such as :

- a) disconnection of a transmission line,
- b) step increase of mechanical load,
- c) switching of shunt capacitor,

the procedure of the previous steps from 1 to 3 is repeated for a desired period, by increasing time as $t + \Delta t$

While this procedure applying, it is supposed that the transient phenomena of generators and transmission lines are suppressed earlier than those of loads.

Thus variations of voltages at buses at which induction motor loads are connected, of true and reactive powers consumed by motors, and of mechanical powers and slips of motors are traced. Although the method is developed for an N - bus system, applications are performed on the two-bus system considered in the first section of the study. Here one of the two parallel lines of the two-bus system is assumed tripped at time t_0 as the disturbing effect. In this way, first how the dynamic loads are affected by voltage variations and then how the loads connected to the example transmission lines give rise to sequential voltage drops, and the principles to avoid from voltage collapses are investigated. Also, considering the line models of the first section of the study where dynamic loads are connected in each mode and applying this system a line-trip as disturbing effect analysis is performed. Thus, for different series and shunt compensation percentages and taking into account the dynamic load effects, the considered six different operational mode are evaluated in terms of dynamic voltage stability.

Thus, series and shunt compensation effects applied at different points on the transmission line are assessed for both static and dynamic loads.

In the third section, reducing an N - bus system to a two-bus system, critical values of power, voltage and load angle are obtained for static load effects. The steps taken in this section are as follows :

- 1) performing a load-flow analysis, the voltage and power profiles for all system buses are determined,
- 2) for all the buses of the system, except the k th bus considered in terms of voltage stability and the slack bus (chosen as n th bus), using bus voltages determined by load-flow analysis, the power of each bus is converted to an equivalent shunt admittance,
- 3) shunt admittances thus determined, taking care of their current signs are included in the original bus admittance matrix (Y_{bus}),
- 4) in this newly obtained bus admittance matrix, some column and row manipulations are made so that the first and k th diagonal elements, and the second and n th diagonal ones are interchanged,

- 5) the last bus admittance obtained at step 4 is reduced to a 2×2 matrix. This matrix is the reduced form of the N - bus system between the k th and n th buses,
- 6) from the reduced 2×2 matrix, A , B constants of the new two-bus system are found. Critical values of power, voltage and load angle are calculated by aid of these constants,
- 7) the procedure 1 through 6 is for a certain load value of the system and k th bus. In this step the load of the k th bus is incremented and returned to the started point and load-flow analysis is repeated. If the values diverge the procedure is stopped, otherwise carried on.

In these load flow analysis Decoupled method is used considering reactive power limitations at generator buses. Thus near the critical point consistent results are reached. Otherwise, it is observed that numerical instability occur near the critical point when the Newton - Raphson method is applied directly, without measures taken to satisfy stability.

The developed method in this section is applied to a 11 - bus system (extended to 16 - bus) and an actual example system from North-West Anatolia (KBA) from Türkiye.

As a general result, the following are the principal causes of voltage stability :

- The load on the transmission lines is too high,
- The voltage source are too far from the load centers,
- The source voltage are too low,
- There is insufficient load reactive compensation.

Important points to be considered in terms of voltage stability are :

- Is series and / or shunt compensation is applied, critical values in view point of voltage stability, should be examined not only for static loads but also for dynamic loads.
- Reactive power should be generated as possible as near the consumption centers, and reactive power control devices used should have fast response times.

However, it is not well appreciated that maintaining a good voltage profile does not automatically guarantee voltage stability, and voltage stability need not to be associated with low voltages, although frequently it is. Other results obtained are given in the " results and offers " section.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bir enerji sisteminin planlanması, işletimi ve kontrolü önemli ölçüde kararlılık kavramları ile yönlendirilir. Klasik anlamda kararlılık, bir bozucu etkiye (kısa devreler, açma-kapama olayları, büyük miktarlarda yük almalar gibi) maruz kalan sistemin, bu etki kalktıktan sonra, tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [1], [2].

Kararlılık konusunda önemli ölçüde araştırmalar yapılmasına karşılık, gerilim kararlılığına ancak son yıllarda artan bir ilgi uyanmıştır. Özellikle Amerika (New York 1970, Missisipi 1987, Baltimore 1990...), Avrupa (Belçika 1982, Fransa 1978-87-90, İngiltere 1986...) ve Japonya' da (Tokyo 1987) enerji sistemlerinde meydana gelen bazı olaylar sonucunda [3], bu konuda kapsamlı araştırmalar başlatılmıştır [4]. Gerilim kararlılığı, bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli işletme limitleri içinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Gerilim kararsızlığının birincil nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları veya kontrolör davranışları altında, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyiştir. Bu durum, bir bölgede gerilimin ardışıl olarak düşmesi (gerilim çığı) ve sonunda sistemin tümünde gerilim çökmesine neden olacak şekilde sistem içine yayılması biçiminde karakterize edilebilir.

Bilinen klasik kararlılık incelemelerinde, aktif güç - yük açısı ($P-\delta$) ilişkisinin önemine karşılık, gerilim kararlılığı açısından, reaktif güç - gerilim genliği ($Q-|V|$) ilişkisi ön plana çıkmaktadır [5]. Uzun mesafelerden büyük miktarlarda güç nakledilmeye başlanması ile bu ilişkinin ayrıntılı olarak incelenmesi ihtiyacı doğmuştur.

Gerilim kararlılığı konusunda yapılan çalışmalar, sürekli hal ve geçici hal incelemeleri olmak üzere iki temel grupta toplanabilir. Geçici hal gerilim kararlılığının incelendiği metodlarda, sadece yüklerin dinamiklerinin göz önüne alındığı çalışmaların yanında, bir kısım çalışmalarda yükleri, gerilim ve frekansa bağlı ancak esasta statik karakteristikli olarak gözönüne alan, bunun yanında iletim hatlarını ve generatörlerin dinamiklerini de içeren ayrıntılı gösterilimlere yer verilirken [6], [7], diğer bir kısım

geçici hal çalışmalarında ise, hem yüklerin, hemde iletim hatları ve generatörlerin dinamikleri de hesaba katan daha karmaşık yapıda incelemeler gerçekleştirilmiştir [8], [9].

Sürekli hal metodları için ilk grupta, kararlılık limitine bir yaklaşım olarak, Newton-Raphson yük akışı analizlerinin yakınsaması önerilmiştir. Kararlı bir başlangıç işletim noktasından itibaren, yük sonlu adımlarla artırılmış ve her noktada sistemin durumu yük akışı çözümü ile belirlenmiştir [10]. İşlemler NR metodunun ıraksadığı noktaya kadar sürdürülmüştür. Yük akışına dayalı diğer metodlar; yük akışının çoklu çözümlerine ve denge noktalarına ait analizler [11], [12] ve maksimum güç teoremi uygulamaları olarak ele alınmaktadır [4].

Lineerleştirilmiş dinamiklerin özdeğerleri, (λ) belirli bir güç injeksiyonu için kararlılık marjininin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır [4]. Diğer bir gösterge olarak da Jakobiyen matrisin kendisi kullanılmıştır [13]. Başka bir metodda ise, global bir gerilim kararlılığı indeksi olarak, yük akışı denklemlerinin Jakobiyen matrisinin minimum tekil değeri $\sigma(J)$ kullanılmıştır. Gerilimin kritik değerine yaklaşması durumunda bu indis sifıra gitmektedir [14]. Jakobiyen matrise dayalı bir başka metod da ise, indirgenmiş Jakobiyen matrisin en küçük özdeğerleri ve özvektörleri kullanılarak modal analiz gerçekleştirilmiştir. Herbir özdeğer, gerilim / reaktif güç moduyla ilgili olarak, gerilim kararsızlığına yakınlığın bir ölçütünü vermektedir. Özvektörler ise, hem modun şeklini tanımlamakta hem de, moda katılan sistem elemanları ve generatörler hakkında bilgi sağlamaktadır. Metodun özellikle büyük sistemler için iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [15].

Sürekli hal gerilim kararlılığı incelemelerinin toplanadığı grupta farklı bir küme oluşturan çalışmalarda ise duyarlılık gösterge olarak kullanılmıştır. Burada ya gerilimin yüke duyarlılığı, veya üretimin yüke duyarlılığı ya da gerilim duyarlılığının özel bir baradaki aktif ve reaktif güçlere uygulanması gerçekleştirilmiştir. Yine duyarlılığa bağlı bazı çalışmalarda, reaktif güç üretim limitleri de hesaba katılarak, gerilim kararlılığı açısından kritik nokta civarında emniyet bölgeleri saptanması şeklinde sistem için bir güvenilirlik ölçütü belirlenmeye çalışılmıştır [16]. Sağlıklı bir sistemde duyarlılık sayısı küçük değerlerde iken, güç talebi maksimum noktaya yaklaştığında ise, belirgin bir şekilde artarak teorik olarak maksimum noktada sonsuza gidecektir [17], [18].

Bazı metodlarda ise, $(V_L - V_L^+)$ yük gerilimi kararlılık marjini ya da yük reaktif güç marjini $(Q_L - Q_L^+)$ indeks olarak kullanılmıştır. '+' indisi kaynaktan yüke sürülebilecek maksimum güce karşılık gelen değerleri temsil etmektedir [19],[20].

Bu çalışmada, öncelikle, iki baralı sistemler için, yük akışına dayalı olarak belirlenen, P-V eğrileri ve kritik değerler yardımıyla, çeşitli işletme zorunluluklarından ortaya çıkan hat modellerinin farklı işletme koşullarından (güç faktörü, hat kayıp faktörü, seri kompanzasyon, şönt kompanzasyon ...) etkilenmeleri incelenerek, farklı hat modellerinin birbirlerine olan üstünlükleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun ardından, yine aynı hat modelleri için, hat sonuna dinamik yük elemanları bağlı olması durumunda, bozucu etkiler karşısında farklı hat modellerinin etkileri incelenerek, statik ve dinamik gerilim kararlılığı bakımından modellerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu amaçla, ikinci bölümde, gerilim kararlılığı açısından elektriksel yüklerin sınıflandırılarak incelemesi yapılmış ve farklı uzunluktaki iletim hatlarının eşdeğer devreleri gözden geçirilmiştir. Üçüncü bölümde, sürekli hal gerilim kararlılığı konusu ele alınarak, güç faktörü, hat uzunluğu, hat başı gerilimi, kayıp faktörü, seri ve şönt kompanzasyonlar gibi çeşitli çalışma koşullarının, statik gerilim kararlılığını karakterize eden P-V eğrileri ve çeşitli hat modelleri için kritik değerler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dördüncü bölümde ise, asenkron motorlar örnek dinamik yük elemanı şeklinde göz önüne alınarak dinamik gerilim kararlılığının esasları incelenmiş ve farklı iletim hattı modellerine dinamik yük elemanı bağlı iken bozucu etkiler açısından modellerin etkileşimleri incelenmiştir.

Bu çalışmaların ardından, beşinci bölümde ise, yeni bir yaklaşım olarak, sürekli hal gerilim kararlılığı açısından N-baralı sistemlerin incelenmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Buna göre sistemin herhangi bir yük durumu için, generatörlerin reaktif güç üretim sınırları da göz önüne alınarak, doğal kararlı yapısı bilinen ayırık yük akışı yapılmış ve tüm baraların gerilim ve güçleri belirlenmiştir. Bu gerilim ve güçler kullanılarak, salınım barası ve gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen baranın dışındaki tüm baralardaki güçler eşdeğer admitanslara çevrilerek uygun yön işaretleriyle bara admitans matrisine katılmıştır. Daha sonra $[n \times n]$ lik bara admitans matrisi (Y_{BARA}), $[2 \times 2]$ 'lik bir matrise indirgenerek, sistemin, ilgilenilen yük barası ile salınım barası arasındaki bir eşdeğeri belirlenmiş olmaktadır. Bu şekilde elde edilen indirgenmiş sistemin, iki baralı sistem için belirlenen formüllerle kritik değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra ilgili baranın yükü artırılarak, yük akışı ıraksayana kadar kritik değerler hesaplanmaya devam edilmiştir. Bu yöntem, önce 11 baralı bir sisteme daha sonrada ülkemizden bir örnek olarak Kuzey Batı Anadolu Sistemine uygulanarak çeşitli işletme koşullarında denenmiştir.

Yöntemin, sonlu adım artırımlarıyla yük akışı analizi yapıldığı yöntemlere göre, oldukça hızlı ve doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

BÖLÜM 2

ELEKTRİKSEL YÜKLER ve İLETİM HATLARI

P- δ ilişkisinin ön planda olduğu klasik kararlılık bakımından senkron generatörlerin önemine karşılık, gerilim kararlılığı açısından da elektriksel yükler aynı derecede önemlidir. Gerilim değişimine karşı davranışları bakımından yükler üç ana grupta toplanabilir [21] :

- 1) Sabit empedans yükleri,
- 2) Sabit akım yükleri,
- 3) Sabit güç yükleri.

Ayrıca bir yük, karakteristiğine bağlı olarak, gerilim değişimlerine karşı, zaman içinde farklı gruplarda da bulunabilir. Buna, esas karakteristiği sabit güç grubuna giren asenkron makinaların, ani gerilim değişimlerine karşı ilk anda sabit empedans karakteristiği göstermesi örnek olarak verilebilir. Bu durum özellikle gerilim kararlılığının dinamik davranışları bakımından önemli bir özelliktir.

2.1. Sabit Empedans Yükleri

Aydınlatma, ısıtma, ark ocakları bu grupta toplanabilecek bazı örneklerdir ve ağırlıklı olarak omik karakterlidirler [22]. Hat sonuna bağlı bir sabit empedans yükünün çektiği güç :

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{V} \cdot \dot{I}^* = \dot{V} \cdot (\dot{V} / Z)^* = |V|^2 / (Z)^* = |V|^2 / (R - jX)$$

$$\dot{S} = |V|^2 \cdot \frac{R + jX}{R^2 + X^2} \quad (2.1)$$

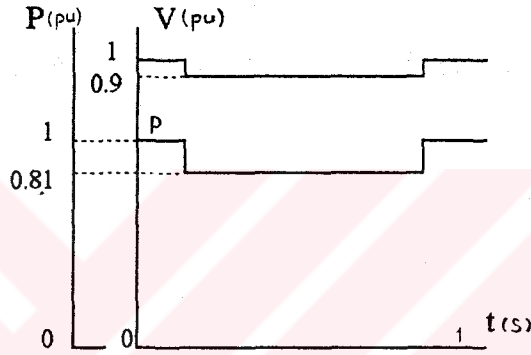
sonucu bulunur. Buradan , $P = |V|^2 \cdot \frac{R}{R^2 + X^2}$, $Q = |V|^2 \cdot \frac{X}{R^2 + X^2}$ şeklinde aktif ve reaktif güçler çekilir.

Gerilimdeki küçük bir değişim ($\Delta|V|$) için aktif güçteki değişim şu şekilde belirlenir :

$$\frac{\Delta P}{\Delta|V|} \cong \frac{\partial P}{\partial|V|} = 2V \cdot \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{2}{|V|} \cdot P \quad \text{ifadesi düzenlenerek;}$$

$$\frac{\Delta P}{P} \cong 2 \frac{\Delta|V|}{|V|} \quad (2.2)$$

bulunur. Gerilimdeki küçük değişimler için güç değişimi, (2.2) ifadesine göre, yaklaşık iki kat olmaktadır. Gerilim kararlılığı açısından bu tür yüklerin etkilerinin olumlu olacağı buradan açıkça görülebilir.



Şekil 2.1. Sabit empedanslı yükün uç gerilimi değişimine karşılık, çektiği gücün değişimi. ($Z = R = 1$ birim, sabit saf omik yük)

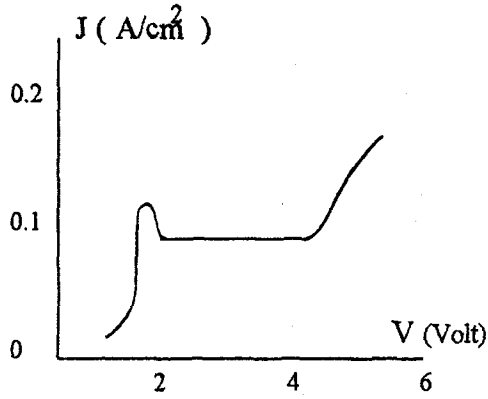
2.2. Sabit Akım Yükleri

Özellikle, metalurji ve elektrokimya alanlarında, metal parlatma, metal kaplama, elektroliz uygulamalarında kullanılan tekniğin esası sabit akım çekmeye dayalıdır [23] . $I = \text{sabit}$ koşulu ile yukarıdaki ifadelere benzer şekilde, $P = V.I.\cos\phi$ güç ifadesini kullanarak gerilimdeki küçük değişimler için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \cong \frac{\partial P}{\partial V} = I.\cos\phi = \frac{P}{V} \quad , \quad \text{ifade düzenlenerek}$$

$$\frac{\Delta P}{P} \cong \frac{\Delta V}{V} \quad (2.3)$$

sonucu bulunur. Bu ifadeye göre, gerilimdeki küçük değişimler için güç yaklaşık olarak aynı oranda değişmektedir.

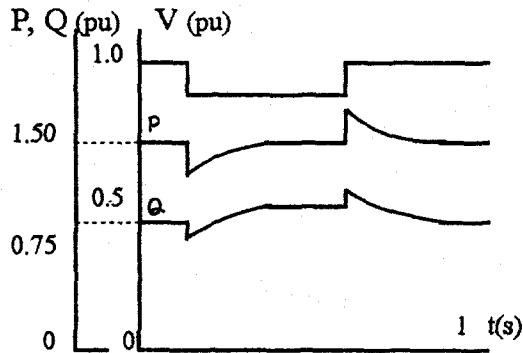


Şekil 2.2. Sabit akımlı yükün uç gerilimi değişimiyle etkileşimi

2.3. Sabit Güç Yükleri

Kontrollü empedans yükleri ve asenkron motorlar bu grubu oluştururlar. Özellikle, elektrik enerjisinin her sektörde yaygın olarak kullanımı ile birlikte, büyük küçük elektrikli ev aletlerinden değişik güçlerdeki endüstriyel kullanımlara kadar, asenkron motorlar elektriksel tahrik mekanizması olarak yaygın bir kullanım sahası bulmuşlardır. Bunun nedenleri, maliyetinin diğer motorlara göre düşük ve bakımının az olması, kolay temin edilebilmesi, gelişen kontrol teknolojilerine uygunluğu gibi tüketiciler açısından etkili tercih faktörleridir. Bu çalışmada, sabit güç yükü olarak, asenkron motorlar esas alınacaktır.

Asenkron motor yüklerinin gerilim değişimine karşı cevapları, çektikleri aktif gücün gerilim değişimini adım artımı (veya azalması) ile izleyip daha sonra başlangıç değerine dönmeye çalışması şeklindedir.



Şekil 2.3. Sabit güç yükünün uç gerilimi değişimine karşılık, cevabı.
($S_{\text{baz}} = 100 \text{ MVA}$)

Gerilimdeki küçük değişimler için bu durum şekil 2.3 ' te karakterize edilmiştir. Buna göre, gerilimin ani olarak azalmasıyla aktif güç ve reaktif güçte meydana gelen ani azalmalardan sonra, aktif güç nominal değerine dönmeye çalışırken, reaktif güç nominal değerinin üstüne çıkmakta, şayet nominal gerilim değerine geri dönülürse, her iki gücün de nominal değerlerine döndüğü gözlenmektedir.. Burada aktif gücün sabit değerine dönmeye çalışması, asenkron makinanın lineer bölgedeki ifadeleri yardımıyla açıklanabilir [22],[24]. Fakat, sürekli değişimi izlemek için ve özellikle yükün, paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı olması gibi büyük bir bozucu etkiye maruz kalması durumunda, dinamik simülasyon gerekli olmaktadır. Böylelikle, uç geriliminin değişimiyle, makinanın aktif güç, reaktif güç, mekanik mil gücü ve kayma gibi çeşitli büyüklüklerinin değişimlerini izlemek ve bu değişimlerin, iletim sisteminde ardışıl bir gerilim düşümüne neden olarak, sistemde gerilim çökmesi sürecini nasıl tetiklediğini gözlemlemek mümkün olacaktır [25].

Bu amaçla, asenkron motor yükünün gerilim değişimine karşı cevapları, bu cevapları etkileyen faktörleri ve korumanın esasları dinamik gerilim kararlılığı kısmında ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.4. İletim Hatları

İletim hatları da, iletim sistemlerinde gerilim kararlılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Sürekli hal kararlılığı kısmında özellikle bu durum üzerinde yapılan çalışmalar sergilenecektir. Burada, çalışma sırasında kullanılacak olan hat modeli kısaca tanıtılacaktır.

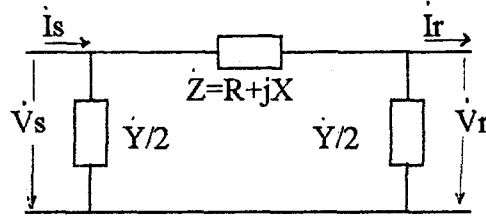
Bilindiği üzere iletim hatlarını,

- 1) Kısa hatlar (80 km kadar),
- 2) Orta uzunluktaki hatlar (80-250 km arası),
- 3) Uzun hatlar (250 km üstü)

şeklinde sınıflandırmak mümkündür [26]. İletim sistemleri açısından orta uzunluktaki hatlar ve özellikle gerilim kararlılığı bakımından uzun hatlar büyük önem arz etmektedirler. Gözönüne alınan her iki sınıf hat için (π) devresi kullanılacaktır. Orta uzunluktaki bir hat için toplu parametrelerin kullanıldığı nominal π devresi gözönüne alınırken, uzun iletim hatlarında dağıtılmış parametrelerin geçerli olduğu eşdeğer π devresi kullanılacaktır. Bu nedenle bu devrelerin elektriksel büyüklükler açısından bağıntılarını belirlemek gereklidir [27].

2.4.1. Orta Uzunluktaki Hatlar

Nominal π devresiyle göz önüne alınan bu hatlar açısından, hattın toplam şönt kapasitesi yarıya bölünerek modelin iki ucuna konulmaktadır.



Şekil 2.4. Orta uzunluktaki bir hattın nominal π devresi yardımıyla gösterilimi

Burada, R , X omik ve endüktif bileşenler olmak üzere Z hattın empedansını, Y ' de hattın toplam şönt kapasitesini göstermektedir. Hat başı ve hat sonu gerilim ve akım değerleri arasında;

$$\dot{V}_s = (1 + Z \cdot Y/2) \cdot \dot{V}_r + \dot{Z} \cdot \dot{I}_r \quad (2.4.a)$$

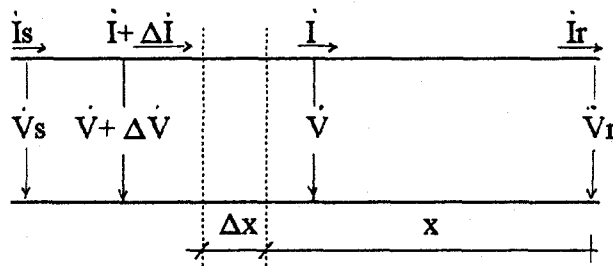
$$\dot{I}_s = Y \cdot (1 + Z \cdot Y/4) \cdot \dot{V}_r + (1 + \dot{Z} \cdot Y/2) \cdot \dot{I}_r \quad (2.4.b)$$

bağıntıları yazılabilir. Böylece orta uzunlukta ve simetrik yapıda bir hat için sabitler;

$\dot{A} = \dot{D} = 1 + \dot{Z} \cdot Y/2$, $\dot{B} = \dot{Z}$, $\dot{C} = Y \cdot (1 + \dot{Z} \cdot Y/4)$ şeklinde belirlenmektedir.

2.4.2. Uzun İletim Hatları

Burada iletim hattının parametrelerinin toplu değil, hat boyunca düzgün olarak dağıldığı kabul edilerek tam çözüm yapılır. Çözüm için göz önüne alınan şekil aşağıda verilmiştir [28].



Şekil 2.5. Uzun iletim hattının şematik gösterilimi

Burada;

birim uzunluktaki hattın; z : seri empedansını, y : şönt admitansını,

L : hattın toplam uzunluğunu, $\dot{Z} = z \cdot L$: toplam seri empedansı,

$\dot{Y} = y.L$: toplam şönt admitansı , $Z_0 = \sqrt{z/y}$: karakteristik empedansı göstermektedir.

$\gamma = \sqrt{z.y} = \alpha + \beta$: propagasyon sabiti (α : zayıflama sabiti , β : faz sabiti) olmak üzere hat sonunu hat başına bağlayan ifadeler elde edilir :

$$\dot{V}_s = \cosh(\gamma.L). \dot{V}_r + \sinh(\gamma.L). Z_0. \dot{I}_r \quad (2.5.a)$$

$$\dot{I}_s = (1/Z_0). \sinh(\gamma.L). \dot{V}_r + \cosh(\gamma.L). \dot{I}_r \quad (2.5.b)$$

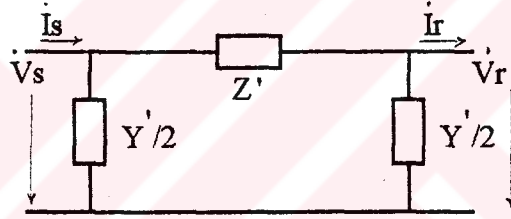
Bu durumda uzun iletim hatları için bu sabitler;

$$\dot{A} = \cosh(\gamma.L) , \dot{B} = Z_0. \sinh(\gamma.L) , \dot{C} = (1/Z_0). \sinh(\gamma.L) , \dot{D} = \dot{A}$$

değerlerini alır. Orta uzunluktaki hatlarda, hat büyüklükleri için toplu parametreler kullanıldığından, nominal π devresi, hattı tam olarak temsil edemez. Uzun iletim hatlarında ise düzgün dağıtılmış parametreler kullanıldığından, devre orta uzunlukta hatlar için kullanıma benzer bir eşdeğer π devresi yardımıyla daha doğru bir biçimde modellenilebilir. Şekil 2.4. 'e benzer olarak devredeki seri empedansa (Z') ve şönt admitansa da (Y') denilirse. Bu durumda,

$$\dot{Z}' = Z_0. \sinh(\gamma.L) = Z. \sinh(\gamma.L) / \gamma.L , \quad \dot{Y}' / 2 = (Y/2). \tanh(\gamma.L / 2) / (\gamma.L / 2)$$

bulunur. Buna göre uzun iletim hattının eşdeğer π devresi şu şekildedir :

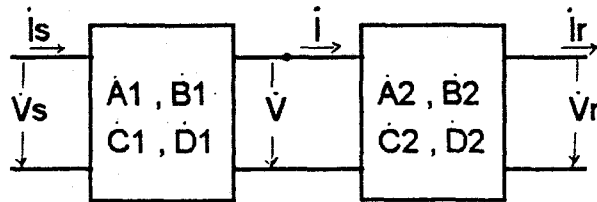


Şekil 2.6. Uzun bir iletim hattının eşdeğer π devresi yardımıyla gösterilimi

2.4.3. Seri veya Paralel Bağlı Devreler için Hat Sabitleri

İki kapılı bir devre için temel olarak, $\dot{V}_s = \dot{A}. \dot{V}_r + \dot{B}. \dot{I}_r$ ve $\dot{I}_s = \dot{C}. \dot{V}_r + \dot{D}. \dot{I}_r$ eşitliklerini sağlayan hat sabitleri farklı değerlerle birbirine seri ya da paralel bağlı devreler için şu şekilde belirlenir.

a) Seri bağlı devreler



Şekil 2.7. Seri bağlı iki kapılı devre

$\dot{V} = \dot{A}_2 \cdot \dot{V}_r + \dot{B}_2 \cdot \dot{I}_r$, $\dot{I} = \dot{C}_2 \cdot \dot{V}_r + \dot{D}_2 \cdot \dot{I}_r$ denklemi

$\dot{V}_s = \dot{A}_1 \cdot \dot{V} + \dot{B}_1 \cdot \dot{I}$, $\dot{I}_s = \dot{C}_1 \cdot \dot{V} + \dot{D}_1 \cdot \dot{I}$ denklemlerinde yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa seri bağlı devreler için,

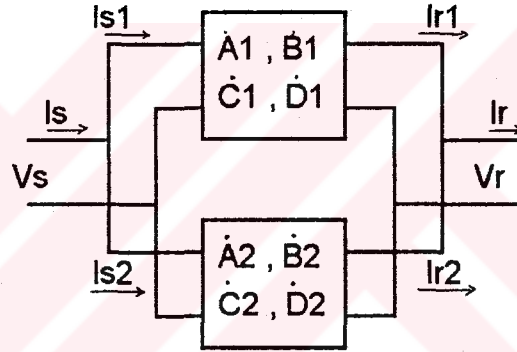
$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 \dot{A}_2 + \dot{B}_1 \dot{C}_2 & \dot{B} &= \dot{A}_1 \dot{B}_2 + \dot{B}_1 \dot{D}_2 \\ \dot{C} &= \dot{A}_2 \dot{C}_1 + \dot{C}_2 \dot{D}_1 & \dot{D} &= \dot{B}_2 \dot{C}_1 + \dot{D}_1 \dot{D}_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

şeklinde sabitler belirlenir. Veya doğrudan seri bağlantıyı göstermek için, elemanlar

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix}$$

şeklinde matrisel olarak ifade edilerek, matrisel çarpım işlemleri sonunda (2.6) ifadesi elde edilir.

a) Paralel bağlı devreler



Şekil 2.8. Paralel bağlı iki kapılı devre

$\dot{V}_s = \dot{A} \cdot \dot{V}_r + \dot{B} \cdot \dot{I}_r = \dot{A}_1 \cdot \dot{V}_r + \dot{B}_1 \cdot \dot{I}_{r1} = \dot{A}_2 \cdot \dot{V}_r + \dot{B}_2 \cdot \dot{I}_{r2}$, $\dot{I}_s = \dot{C} \cdot \dot{V}_r + \dot{D} \cdot \dot{I}_r$,
 $\dot{I}_{s1} = \dot{C}_1 \cdot \dot{V}_r + \dot{D}_1 \cdot \dot{I}_{r1}$, $\dot{I}_{s2} = \dot{C}_2 \cdot \dot{V}_r + \dot{D}_2 \cdot \dot{I}_{r2}$ ve $\dot{I}_s = \dot{I}_{s1} + \dot{I}_{s2}$, $\dot{I}_r = \dot{I}_{r1} + \dot{I}_{r2}$ eşitlikleri kullanılarak,

$$\dot{A} = \frac{\dot{A}_1 \cdot \dot{B}_2 + \dot{A}_2 \cdot \dot{B}_1}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2} , \quad \dot{B} = \frac{\dot{B}_1 \cdot \dot{B}_2}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2} , \quad \dot{C} = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \frac{(\dot{A}_1 - \dot{A}_2) \cdot (\dot{D}_2 - \dot{D}_1)}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2}$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{D}_1 \cdot \dot{B}_2 + \dot{D}_2 \cdot \dot{B}_1}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2} \quad (2.7)$$

şeklinde sabitler belirlenir.

BÖLÜM 3

SÜREKLİ-HAL GERİLİM KARARLILIĞI

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmelerine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de aynı ölçüde artmaktadır. Elektrik enerjisine olan talep artımı ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkeler için yıllık % 8 - 10 civarında iken, bu oran gelişmiş ülkeler için daha yukarılarda seyretmektedir [29]. Sürekli artan bu ihtiyaca cevap verebilmek için yeni üretim tesisleri kurmak kaçınılmazdır. Ancak üretim tesislerini, coğrafi, ekonomik, çevresel, politik, vs. nedenlerle her zaman tüketicilere ve özellikle büyük tüketim merkezlerine yakın kurma olanağı bulunmadığı için, uzak mesafelerden, büyük miktarlarda güç nakledilmesi zorunlu olmaktadır.

Büyük tüketicilerin batıda, büyük enerji üretim merkezlerinin doğuda konumlandığı ve aradaki iletim mesafesinin 1000 km civarında bulunduğu ülkemiz de bu tipik durumun içindedir. Uzun mesafelerden, büyük miktarlarda enerji nakli pek çok problemi de beraberinde getirmektedir. Öncelikle iletim geriliminin belirlenmesi, dolayısıyla iletim hattına ilişkin bütün elemanların boyutlandırılması (iletkenler, direkler, izalatörler); bunun sonucu ortaya çıkacak iletim kayıplarının azaltılması ve iletim kapasitesinin artırılabilmesi için seri kompanzasyon tesisleri kurulması, açma-kapama aşırı gerimlerini sınırlamak için şönt reaktörler kullanılması, arızalara karşı koruma, kontrol-kumanda cihazlarının seçimi, kesici ve ayırıcıların boyutlandırılması, işletme ile ilgili olarak iletimin tek-hat, çift-hat ya da daha fazla sayıda hatla yapılması başlıca problemlerdir.

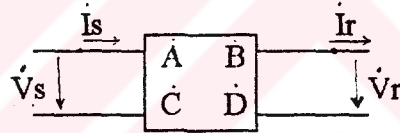
Şüphesiz bunların yanında, üretimde kullanılan senkron generatörlerin, uzun mesafeli iletim sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonrasında senkronizmden kopup kopmayacağı diğer bir deyişle kararlılık problemi bütün bu karmaşık işletimin bir ana problemidir. Diğer önemli problem ise, yine bu tür işletme koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan " Gerilim kararlılığı" sorunudur. Çalışmanın bu kısmı, iletim sistemlerinde, statik gerilim kararlılığının çeşitli yönleriyle incelenmesine yöneliktir.

Gerilim kararlılığının statik yönden incelenmesinde, öncelikle iki baralı bir sistem için, alıcı uç geriliminin genliği $|V_r|$ ile bu uçtan çekilen aktif güç P_r arasındaki ilişkiyi; gönderici uç geriliminin genliği, iletim hattının sabitleri ve hat sonundan çekilen güce ilişkin güç katsayısı cinsinden analitik olarak ifade etmek ve bu ifade yardımıyla hat sonu için P-V eğrilerini elde etmek mümkündür.

Elde edilen bu eğri üzerinde, sistemin alıcı ucundaki gerilim-güç profili izlenebilir ve kritik nokta belirlenebilir. Daha önemlisi, bu eğriler yardımıyla, kaynak geriliminin değişik değerlerde sabit tutulması, iletim hattında değişik yüzdelerde seri yada şönt kompanzasyon yapılması, yine iletim hattının tek ya da çok hattan oluşması, hat sonunda farklı güç katsayılı yüklerin olması gibi çeşitli işletim durumlarının yanısıra, yük altında kademe değişiminin etkisi ve kısmen yüklerin dinamik davranışlarının etkilerini incelemek mümkün olmaktadır.

3.1. P-V Eğrilerinin Elde Edilmesi

İletim hattını, iki kapılı bir devre olarak gözönüne alarak, A-B-C-D devre sabitleri, gönderici uç gerilimi ve alıcı uç güç faktörü cinsinden hat sonu gerilimi ile aktif güç arasındaki ifade elde edilebilir.



Şekil 3.1. İletim hattının iki kapılı devre olarak gösterilmesi

$\dot{V}_s, \dot{I}_s$: Gönderici uç gerilimi ve akımı,

$\dot{V}_r, \dot{I}_r$: Alıcı uç gerilimi ve akımı,

$\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$: iletim hattının sabitleri olmak üzere,

$\dot{A} = a_1 + ja_2, \dot{B} = b_1 + jb_2, \dot{C} = c_1 + jc_2, \dot{D} = d_1 + jd_2,$

$\dot{V}_r = V_{r1} + jV_{r2}, \dot{V}_r^* = V_{r1} - jV_{r2}, |\dot{V}_r|^2 = V_{r1}^2 + V_{r2}^2,$

$\dot{S}_r = P_r + jQ_r = \dot{V}_r \dot{I}_r^*,$

bilinen eşitlikleri ve

$$\dot{V}_s = \dot{A} \dot{V}_r + \dot{B} \dot{I}_r \quad (3.1)$$

ifadesi kullanılarak gerekli işlemler ve düzenlemeler yapılırsa aşağıdaki analitik ifade elde edilir. Yapılan tüm ara işlemler Ek A' da verilmiştir.

$$|A|^2 |V_r|^4 + [2.P_r.(A_1.B_1 + A_2.B_2) + 2.Q_r.(A_1.B_2 - A_2.B_1) - |V_s|^2].|V_r|^2 + |B|^2.(P_r^2 + Q_r^2) = 0 \quad \dots (3.2)$$

$x = |V_r|^2$ dönüşümü yapılarak (3.2) ifadesi,

$$a.x^2 + b.x + c = 0 \quad (3.3)$$

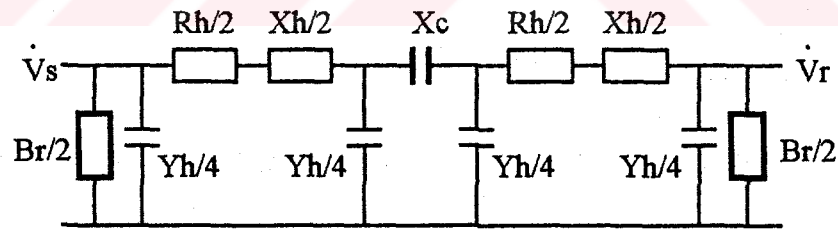
şeklinde iyi bilinen 2. dereceden bir denkleme dönüştürülür. Denklemin çözümü,

$$x_{1,2} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4.a.c}}{2.a} \quad (3.4)$$

şeklinde yine iyi bilinen bir ifadedir. Gerilime ilişkin gerçek kök $|V_r|_{1,2} = \pm \sqrt{x_{1,2}}$ belirlenirken şüphesiz (+) kök kullanılmaktadır.

Bu analitik ifadenin çözümü ile, hat başı gerilimi belirli bir değerde sabit tutulurken, sabit bir güç katsayısı altında hat sonundan çekilen gücün sıfırdan itibaren artırılarak sürekli değişimine karşılık, hat sonu geriliminin genliğinin değişiminin gözlemlendiği P-V eğrisi olarak adlandırılan eğri elde edilir.

Bu konuda yapılacak incelemeler için gerekli sayısal veriler, Keban-Kayseri-Gölbaşı (Ankara) hattı esas alınarak Türkiye Elektrik Kurumundan (TEK) alınmıştır.

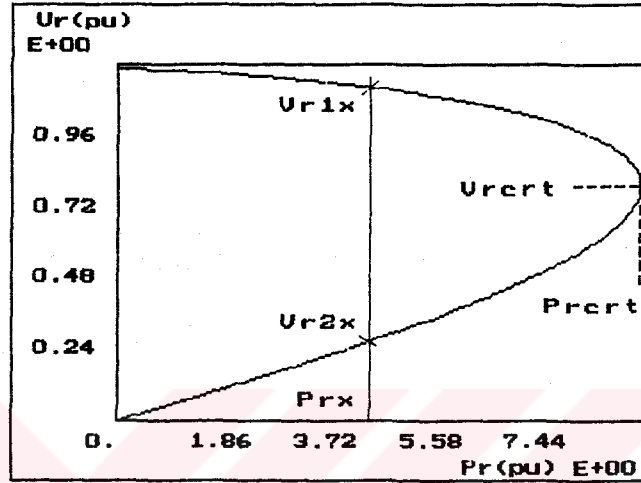


Şekil 3.2. Göz önüne alınan örnek iletim hattının modellenmesi

Örnek iletim hattına ilişkin datalar şu şekildedir [30]:

Uzunluk	L(km)	: 550
Gerilim	U_{FF} (kV)	: 380
Frekans	f(Hz)	: 50
Ömik direnç	r(Ω /km)	: 0.0173
Reaktans (ωL)	x(Ω /km)	: 0.157
Şönt kapasite (ωC)	y(1/ Ω km)	: 6.9×10^{-6}

Seri kompanzasyon $K_s(X_c/\omega L)$: 0.0-0.25-0.50-0.75-0.95
 Şönt kompanzasyon $K_d(B_r/\omega C)$: 0.0-0.25-0.50-0.75-0.95
 SIL (kayıplı hattın doğal yükü) : 953 MW
 S_{BAZ} (baz güç) : 100 MVA
 X_c : seri kompanzatorün reaktansı , B_r : şönt reaktörün admitansı



Şekil 3.3. Örnek iletim hattına ilişkin P-V eğrisi ($\cos\phi=1$ için)

Analitik çözümde (3.4) ifadesinden ve şekil (3.3) ten açıkça görüleceği gibi, eğri üzerinde her bir güç (P_r) değerine karşılık iki gerilim değeri ($|V_{r1}|$, $|V_{r2}|$) bulunmaktadır. Bu duruma örnek olmak üzere, şekil 3.3 ' te rastgele seçilmiş bir P_{rx} gücüne karşılık bir üst $|V_{r1x}|$ bir de alt $|V_{r2x}|$ hatsonu gerilim değerleri gösterilmektedir. Üst bölge normal çalışma bölgesini yansıtmaktadır. Alt gerilim bölgesi ise, bir sistem için yük akışı analizlerinin nümerik kararsızlığı nedeniyle veya sistemde gerçekten bir gerilim kararsızlığı olması durumunda gerilim çökmesi sonucu, aynı güce karşı gerilimin normal değeri yerine alt değerine ulaşıldığı bölgedir. Böyle bir durumda, aynı gücü düşük bir gerilimle sağlamaya çalışmak şüphesiz normal olmayan bir çalışma şeklidir. Yüktün gerilim değişimine olan duyarlılığına bağlı olarak, dinamik davranışları sonucu sistemden ya aşırı akımlar çekilecektir ya da gerilim dalgalanmaları oluşacaktır.

Eğri üzerinde en ilginç nokta ise, aynı güce karşılık sadece bir tek gerilim değerinin bulunduğu, başka bir deyişle üst ve alt gerilim değerlerinin birbirine eşit olduğu, kritik uç noktasıdır. Bu noktadaki gerilim ($|V_{rcrit}|$) ve güç (P_{rcrit}) teorik olarak ulaşılacak en uç değerlerdir. Gerçekte bu kritik değerler, gerilim kararlılığı açısından taşınabilecek maksimum güç sınırını belirler. Kritik güce karşılık gelen kritik

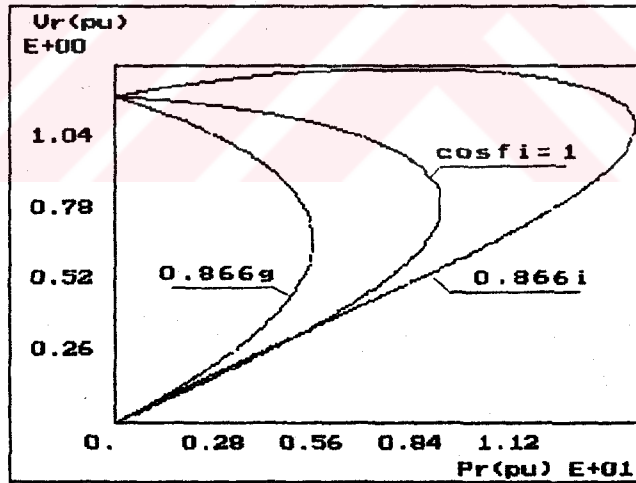
hat sonu gerilimi civarındaki bölge, kararsızlığa en yakın noktaları içerdiğinden incelemeler açısından en az kritik nokta kadar önemle göz önüne alınması gerekir.

3.2. P-V Eğrileri Üzerine Bazı Yorumlar

Radyal bir iletim hattına ilişkin P-V eğrileri elde edilirken, analitik çözüm içinde kapalı bir biçimde duran bazı büyüklüklerin etkilerini yine bu eğriler üzerinde açıkça görmek mümkündür. Bu etkiler; güç faktörü etkisi, hat uzunluğunun etkisi, hatbaşı geriliminin etkisi, paralel hat sayısının etkisi, hatların çalışma modlarının etkisi, seri ve şönt kompanzasyon tesislerinin etkileri şeklinde ana gruplarda toplanabilir.

3.2.1. Güç Faktörünün Etkileri

Hat sonundan belirli bir güç faktörü ile yük çekilirken, bu güç faktörü sabit tutularak çekilen gücün değeri sıfırdan kritik değerine kadar sürekli artmasıyla P-V eğrisi elde edilmiştir. Farklı güç faktörleri için, $\cos \phi = 1$ kriter alınarak, güç faktörünün ileri ya da geri olması durumunda şekil (3.4) ' de gösterilen eğriler elde edilmiştir.

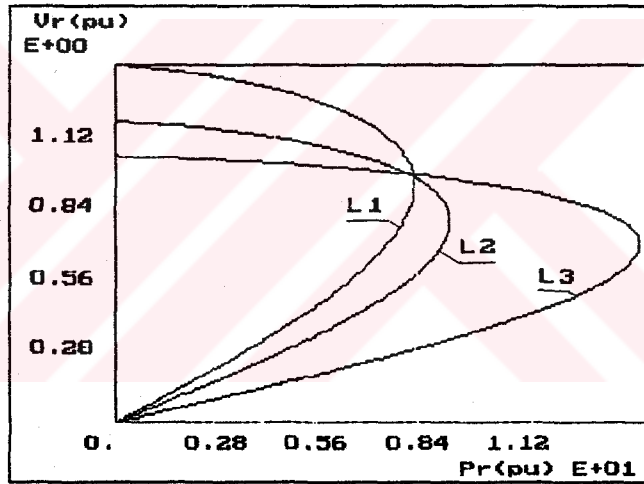


Şekil 3.4. Farklı güç katsayıları için P-V eğrileri

Güç faktörü endüktif (geri) durumdan, kapasitif (ileri) duruma geçtikçe, gerilim kararlılığı açısından kritik güç sınırının arttığı gözlenmektedir. Bu da, enerji iletiminde güç faktörünün birim değere ($\cos \phi = 1$) yakın olmasının gerekliliğini açıkça göstermektedir.

3.2.2. Hat Uzunluğunun Etkileri

Bir iletim hattına ait A-B-C-D sabitleri, hattın omik direnci (r [ohm/km]), hattın reaktansı (x [ohm/km]) ve hattın toprak kapasitesi (y [1/ohm.km]) yardımıyla hesaplanmakta ve bu büyüklükler hat uzunluğuna bağlı olarak değiştiğinden, hat sabitleri de, aynı r , x , y birim değerleri için farklı uzunluklarda farklı değerler almaktadır. P-V eğrilerini belirlemek için kullanılan analitik ifadede hat sabitleri de yer aldığından, eğriler değişik hat uzunlukları için farklılıklar gösterecektir. Örnek sistem dataları kullanılarak; r , x , y değerleri aynı kalmak kaydı ile, $L_1 > L_2 > L_3$ olacak şekilde üç farklı uzunluk için hatların P-V eğrileri şekil (3.5) 'te gösterilmiştir. Kesişme noktası, hatların kilometrik değerleri aynı ve $\cos\phi=1$ olduğundan her üç hattın doğal yüküne karşılık gelmektedir.

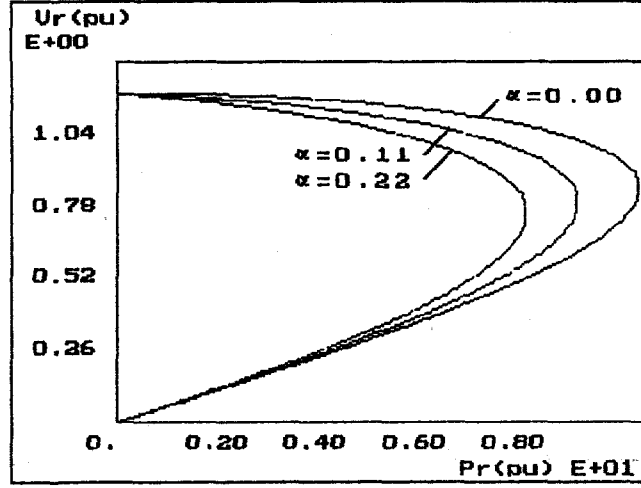


Şekil 3.5. Farklı hat uzunlukları için P-V eğrileri. $L_1=750$ km, $L_2=550$ km, $L_3=250$ km. ($\cos\phi=1$)

3.2.3. Hat Kayıp Faktörünün Etkileri

Kayıp faktörü hattın dizaynından doğan, r : hattın omik direnci, ile ωL : endüktif reaktansı arasındaki oran olup ($\alpha = r / \omega L$), sonuçta iletim için yapılan hat seçimi ile elektriksel büyüklüklere çeşitli yönleriyle etkimektedir. Kayıp faktörünün büyümesi ile gerilim kararlılığının kötü yönde etkilendiği şekil 3.6 'dan görülmektedir. Burada; α sırasıyla, 0, 0.11, 0.22 değerlerini almıştır. $\alpha = 0.11$ hattın orjinal değeridir. Kayıp faktörü için bir başka yön de, iletim hattı direncinin sıcaklıkla değişimidir. Bilindiği gibi metal direnci sıcaklıkla arttığından, iletim hattının gerilim kararlılığı

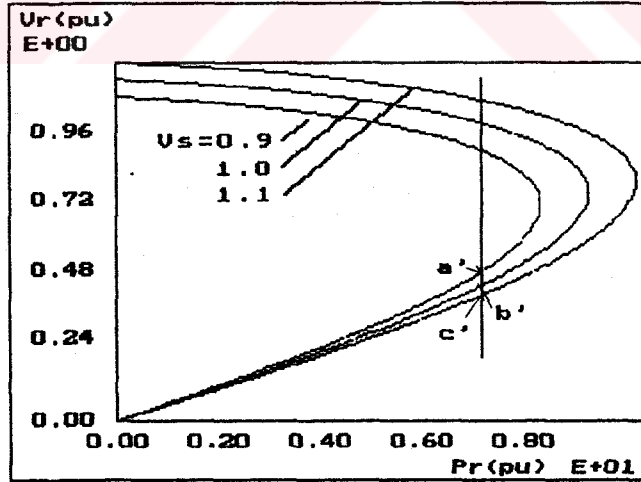
açısından sınırları belirlenirken, çevre sıcaklığı etkisinin de gözönüne alınması gerekebilir [31].



Şekil 3.6. Farklı hat kayıp faktörleri için P-V eğrileri. ($\cos\phi=1$)

3.2.4. Hat Başı Geriliminin Etkileri

Yine analitik çözümden görülebileceği gibi, hatbaşı geriliminin genliğini ($|V_s|$) değiştirerek P-V eğrilerindeki değişim izlenebilir.



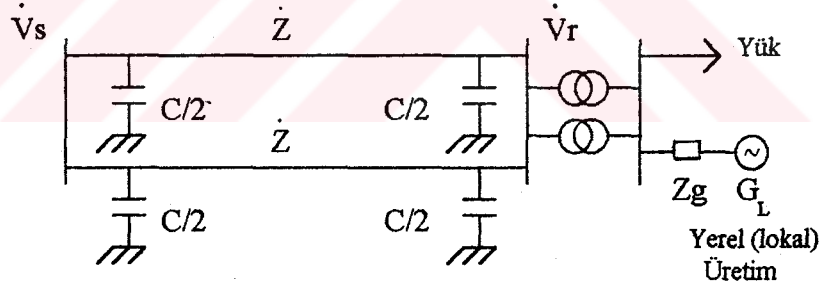
Şekil 3.7. Farklı hat başı gerilimleri için P-V eğrileri. ($\cos\phi=1$)

Hat başı geriliminin genliğinin artırılması ile kritik değerlerin de arttığı şekil 3.7'den görülmektedir. Diğer önemli bir yorum ise şöyle yapılabilir : Örnek olarak hat

başı geriliminin genliği $|V_s| = 0.9$ pu iken herhangi bir nedenle sistemde gerilim kararsızlığı oluşarak gerilim çökmüş ve sistem aynı P_{rx} gücü için, eğri üzerinde (a') noktasındaki gerilime gelmiş olsun. Bu durumda, hat sonu gerilimini büyültmek amacıyla, hat başı geriliminin genliğinin artırılması halinde, şekilden de görüleceği üzere, hat sonu gerilimi daha düşük değerlere (b' ve c' noktaları) indiği gözlenmektedir. Bunun en önemli sonucu, özellikle yük altında kademe değiştiren trafoların, gerilimin azalması durumunda kademelerinin arttırılması, hat sonu geriliminin daha da azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hızlı değişen dinamik durumlarda, kademe değiştiricilerin yavaş cevabı, gerilim kararlılığını sağlamada yetersiz kalmaktadır [32],[33].

3.2.5. Kullanılan Paralel Hat Sayısının Etkileri

Büyük miktarlarda güç iletiminde, kararlılık, güvenilirlik, işletme zorunlulukları gibi çeşitli faktörler nedeniyle, üretim ve tüketim merkezleri arasında iki ya da daha fazla paralel hat tesis etmek zorunlu olmaktadır. Gerilim kararlılığı açısından da, paralel hatların gerilim kararlılığı üzerine etkisi P-V eğrileri yardımıyla açıkça görülebilir. Bu nedenle, paralel işleyen hatlardan birinin devre dışı olması gerilim kararlılığı açısından kritik durumlar sergileyebilir.

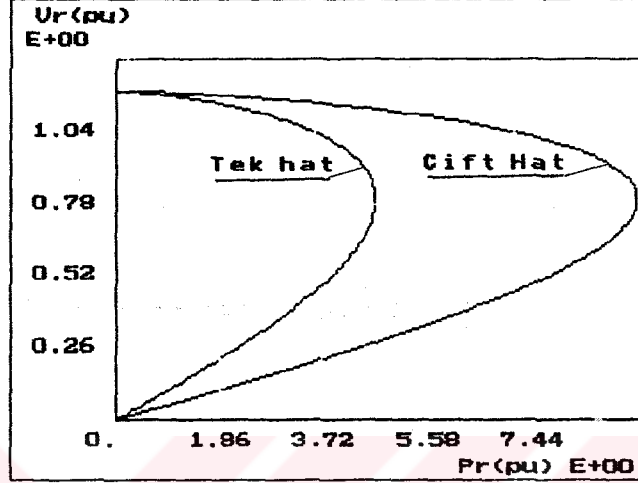


Şekil 3.8. Örnek devrenin, konuyla ilgili olarak yeniden düzenlenmiş hali

Paralel çalışan iki uzun iletim hattından birinin devre dışı çıkması ile oluşacak etki şu şekilde açıklanabilir. Hatlardan biri devre dışı olduğunda, sistemin toplam reaktansı, $Z/2$ 'den Z 'ye çıkar, normal olarak güç faktörünü iyileştiren kapasite $2C$ 'den C 'ye düşer. Böylelikle artan hat kayıpları ($R.I^2$, $X.I^2$) yanında şönt kapasitelerin ürettiği reaktif gücün azalması sonucunda, toplam gerilim düşümü önemli ölçüde artar ve gerilim kararsızlığı oluşma olasılığı doğar.

Şekil 3.9. ' dan görüleceği gibi, paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı kalması durumunda, hat sonundaki kritik gerilimin ($|V_{rcrit}|$) değeri pek fazla

değişmezken, kritik gücün (P_{crit}) değeri ise yaklaşık yarıya düşmektedir. Yükün karakteristiğine bağlı olarak; tek hatla işletme durumunda, bu yükü karşılayacak gerilim değeri kritik değerlere düşebilir, veya yeni P_{crit} değerinin yükün talep ettiği gücün altında olması durumunda doğrudan gerilim karasızlığı oluşabilir, başka bir deyişle sistem çöker.



Şekil 3.9. Paralel çalışan hatlar için P-V eğrileri. ($\cos\phi=1$)

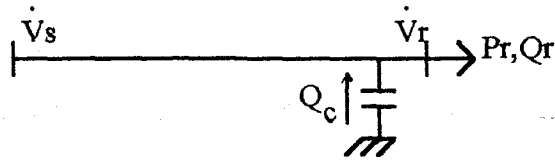
Genellikle, uzun iletim hatlarının sonunda, alıcı uç barasını besleyen yerel üretimler söz konusudur. Şayet bu yerel üretim, yük barasına elektriksel olarak yakınsa, yani bağlantı empedansı Z_g düşüğe, gerilimdeki bir azalma otomatik olarak yerel VAR üretimini arttıracaktır. Bu durum, uzun iletim hattı üzerindeki büyük gerilim düşümlerinden korunmak için, iletim hattından akacak reaktif gücün yeterince küçük kalmasını sağlamaya yetebilir. Ancak, yerel üretim kaynağı içeren daha düşük gerilimli şebekeler, genellikle daha yüksek gerilimli baralardan elektriksel olarak uzaktırlar, yani Z_g büyüktür. Bu durumda gerilimdeki azalma, yerel generatörün VAR çıkışında çok az bir değişikliğe sebep olur, dolayısı ile yüklere yakın yerlerde şönt kapasiteler kullanılarak VAR temini ile gerilimin kararlı kalması sağlanabilir.

3.2.6. Hat Sonunda Kullanılan Şönt Kapasitenin Etkileri

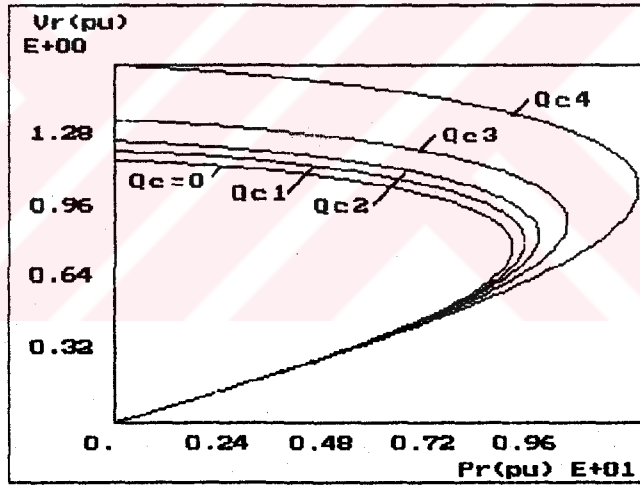
Yük ucuna yakın şönt kompanzasyon başlıca şu amaçlar için kullanılmaktadır :

- 1) Güç faktörünün iyileştirilmesi,
- 2) Gerilim ayarlanması,
- 3) Yük dengelenmesi.

Farklı grup yüklerinin gerilim değişimlerine karşı reaktif güç talepleri farklı olmaktadır. Ancak, özellikle sabit güç grubuna giren yükler, gerilim değişimleri karşısındaki etkilenmeleri en fazla olmaktadır. Dolayısıyla hat sonunda kullanılan şönt kapasiteler, yukarıda sıralanan fonksiyonları yerine getirirken, aynı zamanda gerilim kararlılığı açısından da iyileştirici bir rol oynamaktadırlar [34].



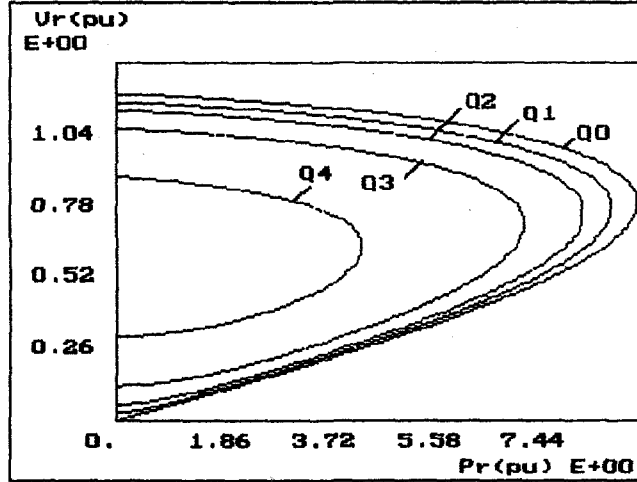
Şekil 3.10. Şönt Kapasiteli İletim hattı



Şekil 3.11. Farklı Reaktif Güç Kompanzasyon Seviyeleri (Q_c) için P-V eğrileri
 $Q_{c1} = 0.5$ pu, $Q_{c2} = 1.0$ pu, $Q_{c3} = 2.0$ pu, $Q_{c4} = 4.0$ pu,

3.2.7. Hat Sonundan Sabit Reaktif Güç Çekilmesinin Etkileri

Burada talep edilen reaktif güç sabit tutulurken, aktif güç (dolayısıyla güç faktörü) ile gerilimin etkileşimleri izlenebilmektedir.



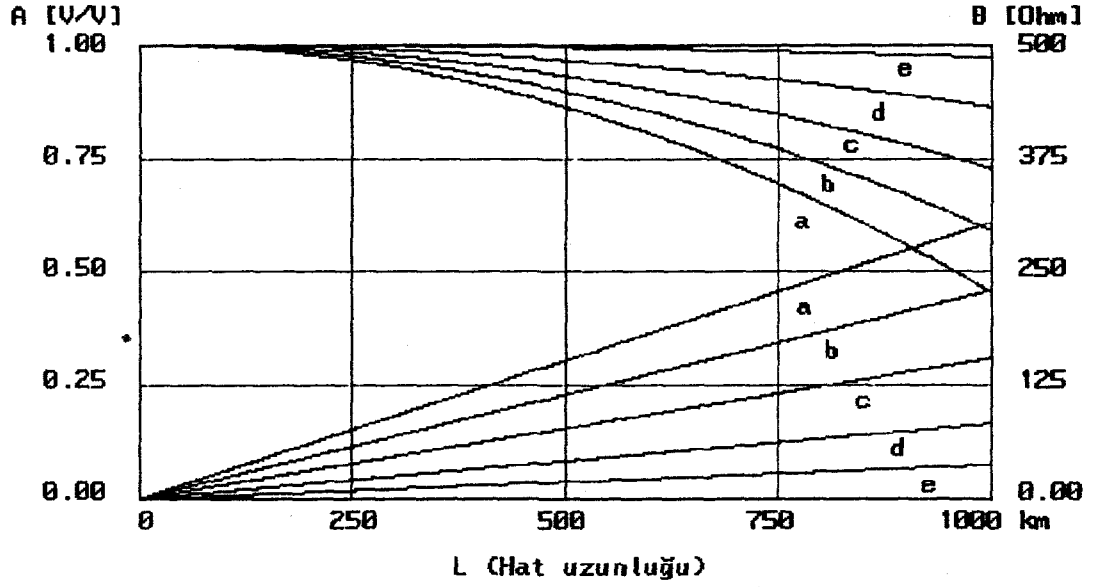
Şekil 3.12. Sabit ancak farklı değerlerdeki reaktif güç talebi durumu için P-V eğrileri ($Q_1 = 0.5$ pu, $Q_2 = 1.0$ pu, $Q_3 = 2.0$ pu, $Q_4 = 4.0$ pu)

3.2.8. Seri Kompanzasyonun Etkileri

Bir alternatif akım devresine bağlı kondansatörün uçlarındaki gerilim, içinden geçen akımdan 90° geri fazda, endüktif reaktansın uçlarındaki gerilim ise içinden geçen akımdan 90° ileri fazda olduğu bilinen bir özelliktir. Buna göre, bir iletim hattında endüktif reaktansın hat gerilimine etkisi, seri bağlanacak bir kondansatör ile kısmen veya tamamen kompanse edilebilir. İletim sistemlerinde bu özellikten yararlanılarak, enerji iletim hatlarının seri reaktanslarının kompanzasyonu gerçekleştirilmektedir [35].

Bu tür bir kompanzasyon ile; taşınabilecek maksimum güç artırılabilir veya belli bir güç transferi için iletim açısı (δ) küçültülebilir ve hattın doğal yükü artar. Bunun yanında, hat reaktansı etkili bir biçimde azaltıldığından, hat aynı sistem yükünde şimdi daha az kapasitif reaktif güç çekecektir, dolayısı ile boşta çalışmada ihtiyaç duyulan şönt indüktif kompanzasyon derecesi de kısmen azaltılacaktır.

İletim hattının alıcı ve gönderici uçları arasındaki transfer reaktansının seri kompanzasyon yapılarak azaltılması sonucunda, diğer etkilerle birlikte gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini görmek açısından, seri kompanzasyon ile hat sabitlerinin değişim etkilerini gözlemek yararlı olacaktır.



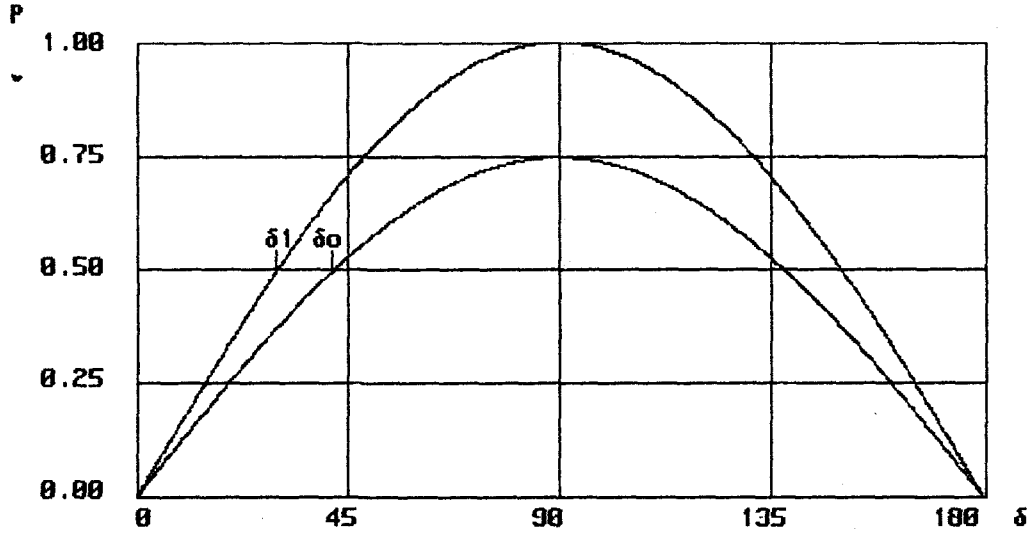
Şekil 3.13. Değişik oranlarda yapılan seri kompanzasyonun A ve B sabitlerine etkileri (a) : Kompanze edilmemiş, (b) : %25, (c) : %50, (d) %75, (e) %95 seri kompanzasyon yapılmasına ilişkin değişimler.

A sabiti, hat sonundan herhangi bir yük çekilmez iken, $A=V_s/V_r$ oranıdır. Başka bir deyişle, $V_r=V_s/A$ oranında, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması ile A sabiti 1'e yaklaşacağından, boşa çalışmada durumunda hat sonu gerilim yükselmesi azalacaktır. B sabiti, hattın iki ucu arasındaki seri empedansa karşılık gelmektedir ve hat üzerinden transfer edilecek gücü belirlemedeki etkisi, hattın seri direnci ihmal edilerek basitçe,

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \sin \delta \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece, seri kompanzasyon yüzdesi artırıldıkça azalan B etkisi ile hattın güç transfer kapasitesi arttırılır.

Şekil (3.14.)' ten görüleceği gibi, aynı güç açısı (δ_0) için taşınacak güç, seri kompanzasyon yapılmamış durumda P_0 iken, kompanzasyon sonrası P_1 'e yükselmektedir. Veya aynı P_0 gücü δ_0 yerine daha küçük bir δ_1 açısıyla taşınmaktadır. Böylece hem normal işletmede taşınabilecek güç artmış olacak, hem de senkronlayıcı güç büyüyeceğinden geçici işletme kararlılığı da iyileşmiş olacaktır.



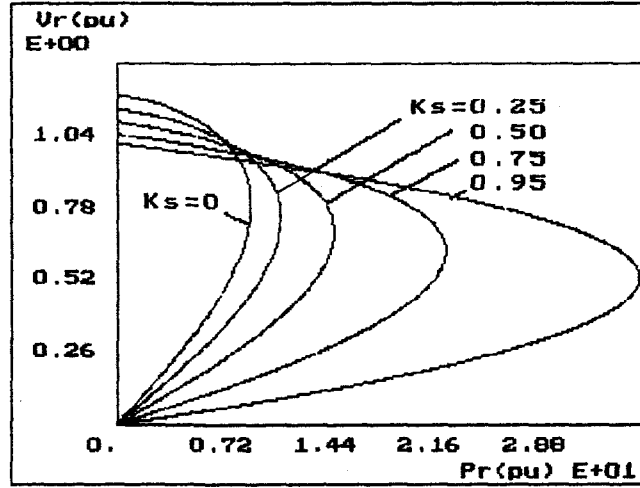
Şekil 3.14. Bir iletim hattında, seri kompanzasyonun a) yapılmaması, b) yapılması durumları için P- δ eğrileri.

Seri kompanzasyon derecesi için pratik bir üst limit % 80' dir [35]. % 100 kompanzasyon yapılması durumunda, en küçük bir bozucu etkide bile çok büyük genlikli arıza akımları akabilecek, bunun yanında devre temel frekansta seri rezonansa da girebileceğinden, transiyent gerilim ve akımları kontrol etmek güç olacaktır.

Seri kompanzasyonun anılan bu temel etkileri yanında, diğer etki ve kullanım alanları şöyle özetlenebilir:

- 1) Paralel çalışan iletim hatlarında yük bölümünün dengelenmesi,
- 2) Değişken büyük güçlerin neden olduğu gerilim dalglanamalarının azaltılması,
- 3) Paralel bağlı kondansatörlere oranla daha düşük bir oranda da olsa güç katsayısının düzeltilmesi.

Bütün bu etkilerin yanında, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması ile gerilim kararlılığının sınırlarının da arttığı gözlenmektedir [36],[37],[38]. Bu etkiyi, yine örnek sistem üzerinde farklı kompanzasyon yüzdeleri için (K_s : 0 - 0.25 - 0.50 - 0.75 - 0.95) P-V eğrileri yardımıyla gözlemlemek mümkündür.

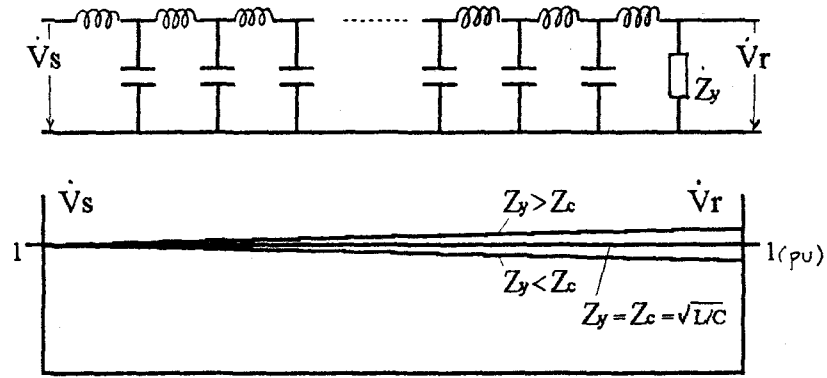


Şekil 3.15. Farklı yüzdelerde seri kompanzasyon yapılması durumunda elde edilen P-V eğrileri

3.2.9. Şönt Kompanzasyon Etkileri

Büyük miktarlarda elektrik enerjisinin ekonomik olarak uzak mesafelere nakledilebilmesi için çok yüksek taşıma gerilimleri seçilmektedir. Böylelikle taşıma akımının küçülmesi ile hat kayıpları azaltılmaktadır. Ancak, iletim hatlarının toprak kapasiteleri nedeniyle akacak olan kapasitif akımlar, dolayısıyla reaktif güç, taşıma gerilimi ve hat uzunluğu ile orantılı olduğundan, endüktif karakterli olan seri hat empedansı nedeni ile gerilim yükselmesine neden olacaktır.

Eğer iletim hattının ucu karakteristik eşdeğer bir empedansa bağlanırsa, hat endüktansındaki reaktif kayıplar, hat kapasitesinin ürettiği reaktif güç ile tam olarak karşılanır, bu durumda hat reaktif güç alışverişi yapmaz. Hat başı ve hat sonu gerilimlerinin genlikleri birbirine eşit olur, fakat aralarında faz farkı vardır. Yük, karakteristik empedans yükünden küçükse ($Z_y > Z_c$), hat bir kondansatör gibi sisteme reaktif güç verir, eğer büyükse ($Z_y < Z_c$) hat sistemden reaktif güç alır.

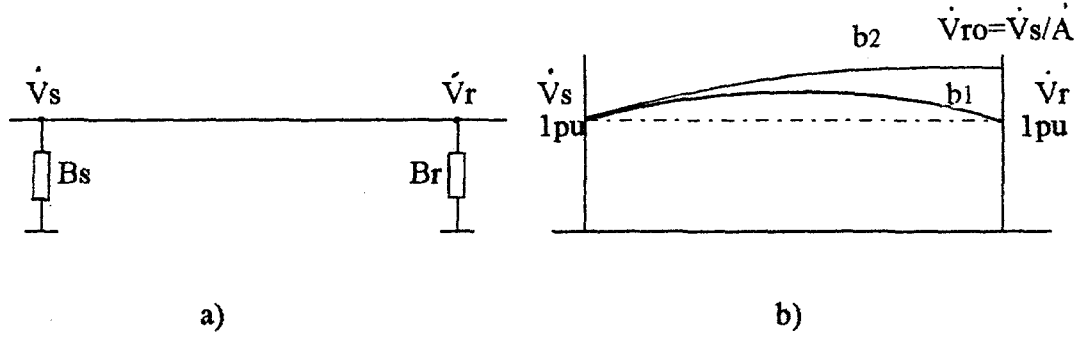


Şekil 3.16. Uzun bir iletim hattının eşdeğeri ve çeşitli yük durumlarında gerilim dağılımı

Şekil 3.16. 'da uzun bir iletim hattında, değişik yük koşulları altında gerilim dağılımı görülmektedir. İletim hattı üzerinde şönt kompanzasyon yapılmaması durumunda, özellikle alıcı uç noktasına bir yük bağlı değil iken, hat sonu gerilimi kararlı halde en yüksek değerine çıkar. Ayrıca, açma kapama olaylarında aşırı gerilimler doğar. Bunların yanında yeterli kompanzasyon yapılmaması durumunda;

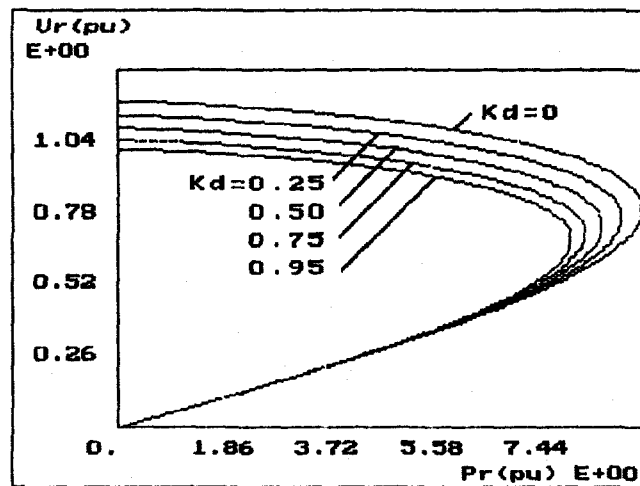
- 1- Hat ve sistemden akacak olan kapasitif akımlar, sisteme bağlı cihazların müsaade edilebilir sınır değerlerinden daha büyük gerilimler meydana getirebilirler,
- 2- Kapasitif akımlar ilave aktif kayıplar oluştururlar,
- 3- İletim hatlarının oluşturduğu kapasitif reaktif gücün bir miktarı, gerilim ayarı için, sisteme bağlı generatörler tarafından alınabilir. Ancak, generatör sistemden reaktif güç alıp, aktif güç verirken, $\cos\phi$ değeri daima 1 'den küçük kalacaktır. Bu da generatörün kapasitesinden tam faydalanamama sakıncasını doğurur [39],
- 4- Yüksek gerilimli iletim hatlarının şönt kapasiteleri, geçici rejimlerde büyük aşırı gerilimlerin meydana gelmesine neden olur.

Bu nedenle ihtiyaçtan fazla reaktif enerjiyi mümkün olduğunca meydana geldiği noktada sarf etmek gerekir. Bunu sağlamak amacıyla uygun yerlere şönt reaktörler konur. Bu reaktörler, genellikle uzun ve yüksek gerilimli iletim hatlarının uçlarına ve doğrudan faz-nötr arasına bağlanır [35].



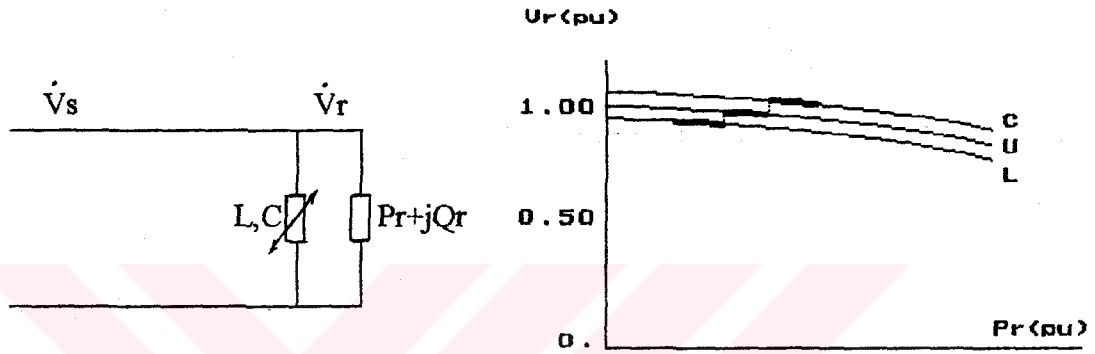
Şekil 3.17. a) Gönderici (Bs) ve alıcı (Br) uçlara şönt reaktör konarak kompanzasyon yapılması , b) yüksüz durumdaki bir hatta, şönt kompanzasyon yapılması (b1) veya yapılmaması (b2) durumları için gerilim profilleri.

Şönt reaktörler genellikle bağlı bulundukları hattın kapasitif reaktif gücünün % 10 - 40 'ını sarf edecek şekilde seçilir [35]. Bu reaktörler üzerindeki gerilimle içlerinden geçen akım arasındaki faz farkı 90° 'ye yakın olduğundan reaktörlerin kendi bağımsız kesicileri tarafından devre dışı bırakılmak istenmesi halinde, kesici kontaktları arasında büyük toparlanma gerilimleri doğacağından, bu tür kesicilerin maliyetleri yüksek olacaktır. Ayrıca, reaktörlerin servis dışı olduğu zamanlardaki yük azalması durumunda tekrar devreye alınmaları anında da aşırı gerilimler meydana gelebilir. Bu sakıncalardan dolayı klasik hat şönt reaktörleri sürekli olarak hatta bağlı tutulur, ancak hatla birlikte servise alınır ve çıkarılabilir. Bu durum çeşitli açılardan olduğu gibi, gerilim kararlılığı açısından da eksiklikler ve sakıncalar içermektedir. Yine P-V eğrileri yardımıyla açıkça görüleceği gibi, şönt kompanzasyon yapılması ile gerilim kararlılığı sınırları küçülmektedir.



Şekil 3.18. Farklı yüzdelerde şönt kompanzasyon yapılması durumunda elde edilen P-V eğrileri

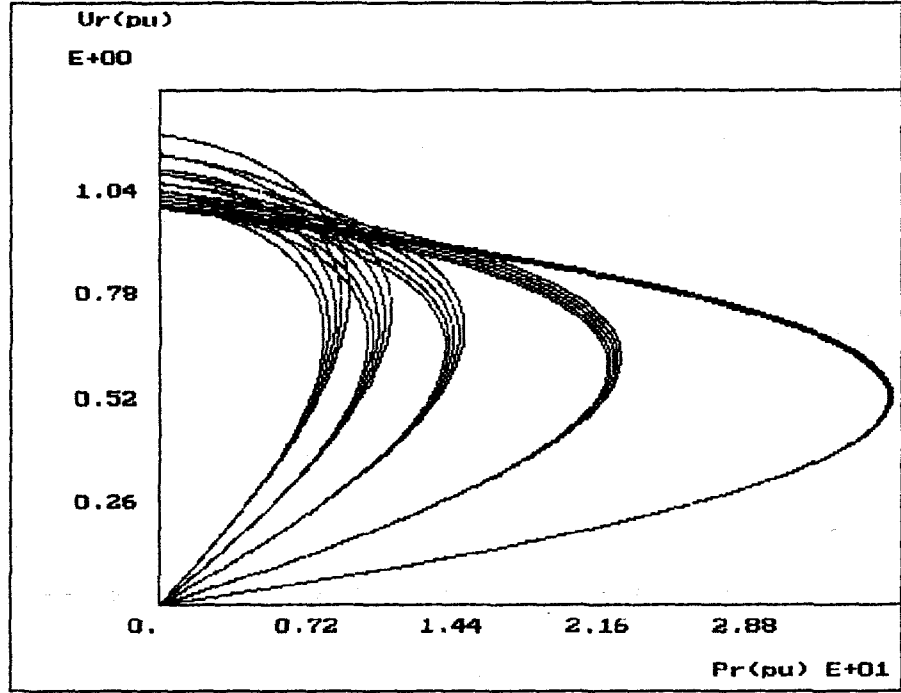
Reaktörlerin sürekli reaktif güç denetimini denetlemek ve kritik durumlarda gerilim kararlılığını iyileştirmek açısından reaktörlerde güç ayarı yapmak kaçınılmaz görülmektedir. Son yıllarda bu yönde yapılan çalışmalar sonucunda, manyetik kuvvetlendiricili veya yarı iletken kontrollü olarak çalışan, kontrol edilebilir reaktörler geliştirilmiştir. Manyetik kuvvetlendiricili tiplerde, reaktör alternatif akımına, kontrol sargısından akıtılan doğru akımla kumanda edilmektedir. Kontrol gücü yaklaşık olarak reaktör gücünün % 1 ' i civarındadır. Yarı iletken kontrollü reaktörlerin prensip olarak çalışmaları şekil 3.19. ' da gösterilmiştir. Böylelikle yük değişimlerinde sürekli (veya kademeli) gerilim ayarı yapmak mümkündür [35].



Şekil 3.19. Yarı-iletken anahtarlama şönt reaktörlerle yapılan kompanzasyonun prensip şeması ve gerilim değişimi. (C: kapasitif çalışma, L: Endüktif çalışma, U : kompanzasyon yapılmaması durumları)

3.2.10. Seri ve Şönt Kompanzasyonların Birlikte Kullanım Etkileri

Uzun iletim hatları için, gereklilikleri ayrı ayrı izah edilen seri ve şönt kompanzasyonun birlikte uygulanma durumları da söz konusudur [40]. Bu durumda genel yapı; seri kompanzasyonla kritik değerler iyileştirilir iken, aynı anda mevcut olan şönt kompanzasyon ise bu iyileştirmeyi azaltmaktadır. Bu durumu en iyi bir şekilde, örnek iletim hattında, seri kompanzasyon yüzdesinin $K_s : 0 - 0.25 - 0.50 - 0.75 - 0.95$ oranlarında artırılırken, her kademede şönt kompanzasyonun da $K_d : 0 - 0.25 - 0.50 - 0.75 - 0.95$ şeklinde artırılmasıyla elde edilen PV eğrileri üzerinde görmek olasıdır. Bu durumda her seri kompanzasyon yüzdesi bir ana grubu oluştururken, şönt kompanzasyon yüzdeleri de her bir grubun alt gruplarını oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3.20. Seri ve şönt kompanzasyonun birlikte uygulanması durumlarında elde edilen PV eğrileri

3.3. Kritik Değerlerin Doğrudan Belirlenmesi ve Farklı Hat Modelleri için Yapılan İncelemeler

3.3.1. Kritik Değerlerin Belirlenmesi

İletim hatları ile ilgili olarak çeşitli durumların göz önüne alınmasıyla elde edilen PV eğrileri üzerindeki kritik noktaya ilişkin değerler, 3.4 ifadesinde P_r gücünün sonlu değer artımlarıyla, bu ifade için hesap yapılamayan (köklerin negatif olduğu) noktaya ulaşılması ile elde edilebilir. Gösterilebilir ki bu nokta, iletim hattı üzerinde Newton metodları ile yük akışı yapılırken, yük akışının Jakobiyen matrisinin tekilliğe ulaştığı noktadır [14],[41]. Bu özellikten faydalanılarak, çeşitli durumlar için kritik değerler doğrudan hızlı bir şekilde belirlenebilir. Gerçekten, şekil 3.19 den de görüldüğü gibi tüm olayları PV eğrileri yardımıyla analiz etmeye çalışmak, özellikle iletim sisteminin karmaşık yapısı nedeniyle açık olamamaktadır. Bu nedenle, bu kısımda kritik değerlerin doğrudan belirlenerek çeşitli uygulanma durumları için değerlendirilmesi yapılacaktır.

Kritik değerler belirlenirken, öncelikle iki baralı bir sistem için hat sabitleri kullanılarak, hat sonundan çekilen güçlere ait ifadelerin elde edilmeleri gerekir. Ayrıntıları Ek B ' de verilen bu analiz özetle şu şekildedir :

$$\begin{aligned} \dot{A} &= a_1 + j a_2, \quad \dot{B} = b_1 + j b_2, \quad \dot{V}_s = \dot{A} \cdot \dot{V}_r + \dot{B} \cdot \dot{I}_r & \text{bilinen eşitlikleri ve} \\ \dot{S}_r &= \dot{V}_r \cdot \dot{I}_r^*, \quad P_r = \text{Re}\{\dot{V}_r \cdot \dot{I}_r^*\}, \quad Q_r = \text{Im}\{\dot{V}_r \cdot \dot{I}_r^*\} & \text{ifadeleri kullanılarak;} \end{aligned}$$

$$P_r = \frac{V_s \cdot V_r (b_1 \cdot \cos \delta + b_2 \cdot \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot V_r^2}{(b_1^2 + b_2^2)} \quad (3.6)$$

$$Q_r = \frac{-V_s \cdot V_r (b_1 \cdot \sin \delta - b_2 \cdot \cos \delta) + (a_2 b_1 + a_1 b_2) \cdot V_r^2}{(b_1^2 + b_2^2)} \quad (3.7)$$

Bu ifadeler yardımıyla alıcı ucu için denge denlemi yazılabilir :

$$f_1(V_s, V_r, \delta) = 0, \quad f_2(V_s, V_r, \delta) = 0 \quad (3.8)$$

İşletme noktasının, aktif ve reaktif güçlerde veya her ikisinde birden olacak değişimlerden etkilendiğini kabul ederek, nominal işletme noktası civarında şu ifade yazılabilir :

$$\Delta f_1 = \frac{\partial f_1}{\partial \delta} \cdot \Delta \delta + \frac{\partial f_1}{\partial V_r} \cdot \Delta V_r \quad (3.9)$$

$$\Delta f_2 = \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \cdot \Delta \delta + \frac{\partial f_2}{\partial V_r} \cdot \Delta V_r \quad (3.10)$$

Maksimum güç transfer kriteri de, (3.9) ve (3.10) jakobiyen denklemlerinin tekliği gözönüne alınarak hesaplanabilir :

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial V_r} - \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial V_r} = 0 \quad (3.11)$$

(3.6), (3.7), (3.8) ve (3.11) bağıntıları yardımıyla;

$$V_s - 2 \cdot V_r (a_2 \cdot \cos \delta + a_1 \cdot \sin \delta) = 0 \quad (3.12)$$

ifadesi bulunur ki, bu ifade gerilim kararlılığı sınırı civarında hat başı gerilimine ve yük açısına bağlı olarak hat sonu geriliminin değerini tesbitini sağlamaktadır. Bu değer kritik değer (V_{rcrit}) olarak ele alınabilmesi için, (3.6), (3.7), (3.12) ifadeleri ve φ güç faktörü açısı olmak üzere, $Q_r = P_r \cdot \tan \varphi$, ifadesi yardımıyla kritik yük açısı (δ_{rcrit}) belirlenir.

$$K_1 = a_1 \cdot (b_2 - b_1 \cdot \tan \varphi) + a_2 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan \varphi)$$

$$K_2 = a_1 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan \varphi) + a_2 \cdot (-b_2 + b_1 \cdot \tan \varphi)$$

olmak üzere,

$$\delta_{rcrit} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{K_2}{-K_1} \right) \quad (3.13)$$

kritik yük açısı belirlenir. Bu ifade, (3.12) bağıntısında kullanılarak;

$$V_{rcrit} = \frac{V_s}{2 \cdot (a_1 \cdot \cos \delta_{rcrit} + a_2 \cdot \sin \delta_{rcrit})} \quad (3.14)$$

hat sonu geriliminin kritik değeri belirlenir. Bundan sonraki adımda, (3.6) ve (3.7) ifadelerinde, V_r yerine (3.14) 'da tanımlanan V_{rcrit} bağıntısı ve δ yerine δ_{rcrit} kullanılmasıyla,

$$K_3 = b_1 \cdot \cos \delta_{rcrit} + b_2 \cdot \sin \delta_{rcrit}$$

$$K_4 = a_1 \cdot \cos \delta_{rcrit} + a_2 \cdot \sin \delta_{rcrit}$$

olmak üzere,

$$P_{rcrit} = \frac{V_s^2 \cdot [2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)]}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4 \cdot K_4} \quad (3.15)$$

ifadesi elde edilerek hat sonundan çekilebilecek gücün kritik değeri belirlenmiş olur.

Radyal bir hat için, kritik gücü hattın doğal gücünün (SIL) bir kesri olarak ifade etmek başka bir deyişle, doğal gücü baz almak uygun bir değerlendirme kriteridir [41], [42], [43]. Bu çalışmada, hattın kayıplı bir hat olduğu göz önüne alınarak, V_N : Hattın anma gerilimi, R : hattın direnci, ωL : hattın seri reaktansı, ωC : hattın şönt kapasitansı, Z_0 : kayıpsız hattın karakteristik empedansı, Z_0' kayıplı hattın karakteristik empedansı, α kayıp faktörü olmak üzere

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}}, \quad Z'_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{j\omega C}} = Z_1 + jZ_2, \quad \alpha = \frac{R}{\omega L}, \quad \text{SIL} = \frac{V_N^2}{Z_0} Z_1$$

bağıntıları kullanılarak, kayıplı bir hat için doğal güç ifadesi elde edilir.

$$\text{SIL} = \frac{V_N^2}{Z_0} \cdot \frac{\left[(1 + \alpha^2)^{1/2} + 1 \right]^{1/2}}{\left[2 \cdot (1 + \alpha^2) \right]^{1/2}} \quad (3.16)$$

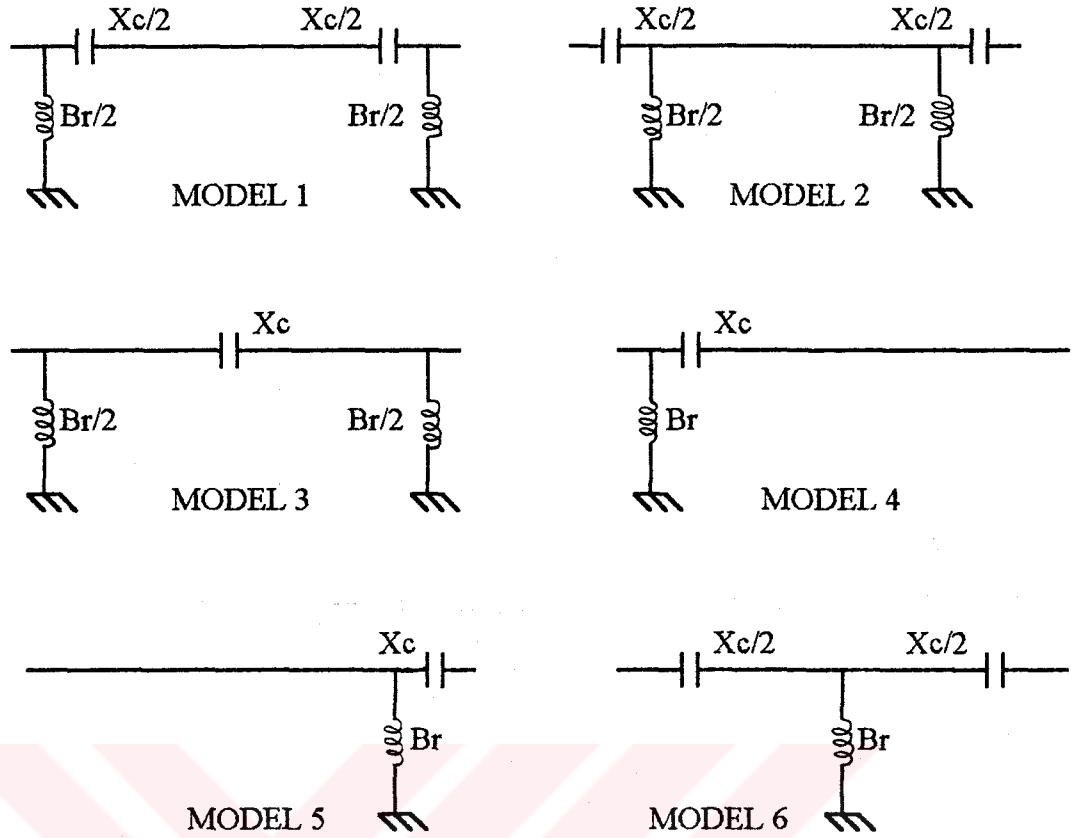
Sonuçta, P_{crit} ifadesini SIL ' a bölerek, kritik gücün birim (pu) değeri doğal güç bazında (ve gerilimden bağımsız olarak) elde edilmiş olur.

$$P_{\text{crit(pu-SIL)}} = \frac{P_{\text{crit}}}{\text{SIL}} = \frac{Z_0 \cdot \left[2 \cdot (1 + \alpha^2) \right]^{1/2} \cdot \left[2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2) \right]}{\left[(1 + \alpha^2)^{1/2} + 1 \right]^{1/2} \cdot (b_1^2 + b_2^2) \cdot 4 \cdot K_4^2} \quad (3.17)$$

Ara işlemlerin ayrıntıları Ek C ' de verilmiştir.

3.3.2. Gözönüne Alınan Hat Modelleri ve Yapılan İncelemeler

Enerji iletim hatlarında çeşitli zorunluluklar nedeniyle gerçekleştirilen seri ve şönt kompanzasyonların, önceki kısımlarda incelenen ve gerilim kararlılığına olan açık etkileri yanında, iletim hattı üzerindeki yerleşim şekillerinin de gerilim kararlılığına olabilecek etkilerini incelemek amacıyla, şekil (3.2) deki hat parametreleri esas alınarak, altı farklı hat modeli ele alınmıştır. Birinci ve ikinci modellerde seri kapasiteler ve şönt reaktörler ikiye ayrılarak farklı biçimlerde hattın her iki ucuna yerleştirilmiştir. Üçüncü modelde şönt elemanlar ilk iki modele benzer yapıda ancak seri kapasitenin tümü hat ortasında konumlandırılmıştır. Dördüncü ve beşinci modellerde ise, seri ve şönt elemanlar hattın sadece başına veya sonuna konmuştur. Altıncı model, üçüncü modelin eşleniği yapıda, seri kapasite ikiye ayrılarak hattın her iki ucuna konurken, şönt reaktör ise hattın ortasına konulmuştur. Bütün modellerin, paralel iki hattan oluştuğu varsayılmaktadır. Modeller ilişkin açık gösterilimler şekil 3.20 ' de verilmiştir.



Şekil 3.21. Farklı kompanzasyon konumları için göz önüne alınan hat modelleri

Göz önüne alınan altı model için, kritik değerlerin hesaplanmasında kullanılacak olan A ve B hat sabitleri; iletim hattının eşdeğer π devresi için elde edilmiş sabitleri ve mevcut seri ve şönt kompanzasyon elemanlarının da yine devreye bağlantı şekillerine göre ile belirlenen sabitleri kullanılarak, gönderici ve alıcı uçlar arasındaki mevcut seri veya paralel elemanların 2. bölümde açıklanan şekilde bağlanmalarıyla, elde edilir. Bağlıntılar matrisel ifadeler olarak düzenlenip elemanların sayısal değerleri yerine konarak hat sabitlerinin sayısal değerleri doğrudan elde edilebileceği gibi, bu çalışmada, hat modellerinin yapısı açıkça belli olduğundan, matrisel işlemler alfasayısal ifadeler halinde altı model için ayrı ayrı düzenlenerek hat sabitlerinin alfasayısal gösterimleri elde edilmiştir. Böylece frekans domeninde, kayıplı bir hat için ifadeler düzenlenerek, seri ve şönt kompanzatorlerin empedans veya admitansları hat parametrelerinin yüzdesi cinsinden belirlenerek hesaba katılmışlardır. Yapılan işlemler ve altı model için elde edilen hat sabitleri Ek D ' verilmiştir.

Sonuçta, farklı altı hat işletim modeli için, değişik seri ve şönt kompanzasyon yüzdeleri altında kritik değerlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Ana incelemeler,

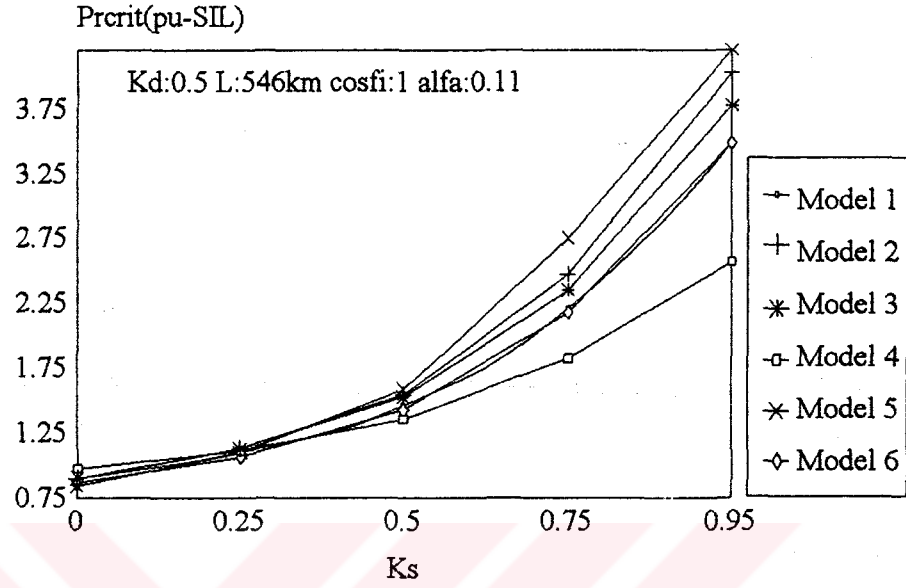
- a) farklı güç faktörleri altında ($\cos\phi=0.866$ geri - $\cos\phi=1$ - $\cos\phi=0.866$ geri) seri kompanzasyon yüzdesinin artırılarak ($K_s=0.00-0.25-0.50-0.75$) kritik değerlerin belirlenmesi;
- b) farklı güç faktörleri altında ($\cos\phi=0.866$ geri - $\cos\phi=1$ - $\cos\phi=0.866$ geri) şönt kompanzasyon yüzdesinin artırılarak ($K_d=0.00-0.25-0.50-0.75$) kritik değerlerin belirlenmesi;
- c) her bir seri kompanzasyon yüzdesinde, farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri için kritik değerlerin belirlenmesi;
- d) farklı hat uzunlukları (0.5L, L, 2L) için, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılarak kritik değerlerin belirlenmesi;
- e) değişik değerli kayıp faktörleri (0, α , 2α) için, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılarak kritik değerlerin belirlenmesi.

şeklinde gerçekleştirilmiştir. Şüphesiz farklı karma yapıda incelemeler de yapılabilir. Ancak yapılan bu incelemelerden görülmüştür ki, bölüm 3.2 ' incelenen temel durumlar tüm modeller için geçerli olmaktadır. Özetle güç faktörünün endüktiften kapasitife yönelmesi, aynı devre parametresine sahip hatlardan daha kısa olanları, kayıp faktörünün küçültülmesi, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması, tüm modeller için statik gerilim kararlılığını iyileştirici etkiler sergilemektedir. Ancak şönt kompanzasyon etkileri incelenirken, şönt kompanzasyonun kritik değerleri olumsuz yönde etkilemesi beklenirken, bu durumun bütün modeller için geçerli olmadığı gibi, bazı modellerde şönt kompanzasyon oranının artırılmasının iyileştirici etki yaptığı saptanmıştır.

Tüm durumları özetler nitelik içeren datalar, iki ana grupta toplanarak, statik gerilim kararlılığı açısından, iletim hatlarının farklı seri ve şönt kompanzasyon yerleşimlerinin etkileri şu şekilde toparlanabilir :

1. grup; belirli bir, güç faktörü ($\cos\phi=1$), hat uzunluğu (L=546 km), kayıp faktörü ($\alpha=0.11$) ve şönt kompanzasyon yüzdesi için ($K_d=0.5$) , seri kompanzasyonun, altı model için, kritik değerlere etkileşimlerini gösteren tablo ve şekilleri içermekte;

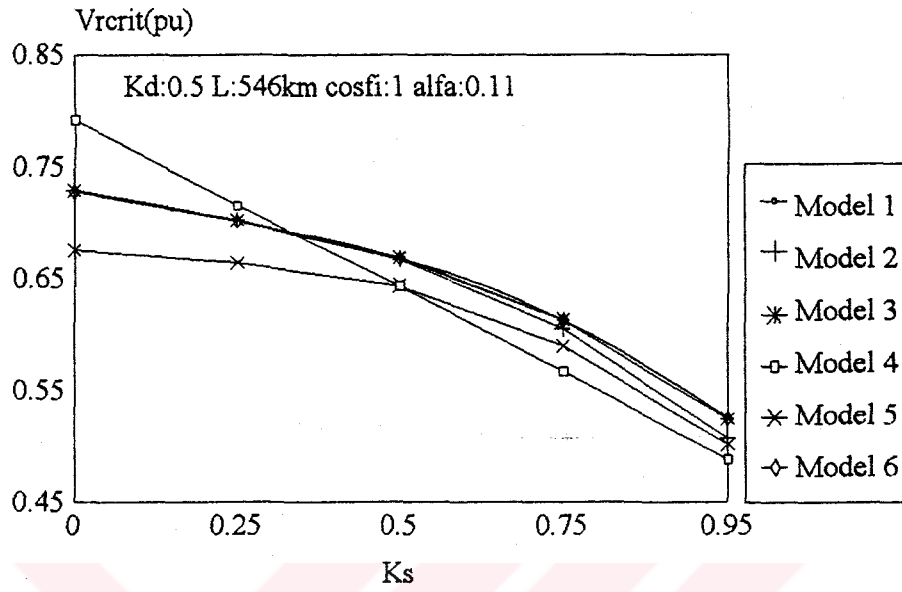
2. grup, 1. gruba benzer tarzda; belirli bir, güç faktörü ($\cos\phi=1$), hat uzunluğu (L=546 km), kayıp faktörü ($\alpha=0.11$) ve seri kompanzasyon yüzdesi için ($K_s=0.5$) , şönt kompanzasyonun, altı model için, kritik değerlere etkileşimlerini gösteren grafik ve tabloları içermektedir.



Şekil 3.22. İncelenen modellerin kritik güç değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi (K_d=0.5, L=546km, alfa=0.1, cosfi=1)

Tablo 3.1. Şekil 3.22 'de değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu Pr_{crit}(pu-SIL) - K_s (%)

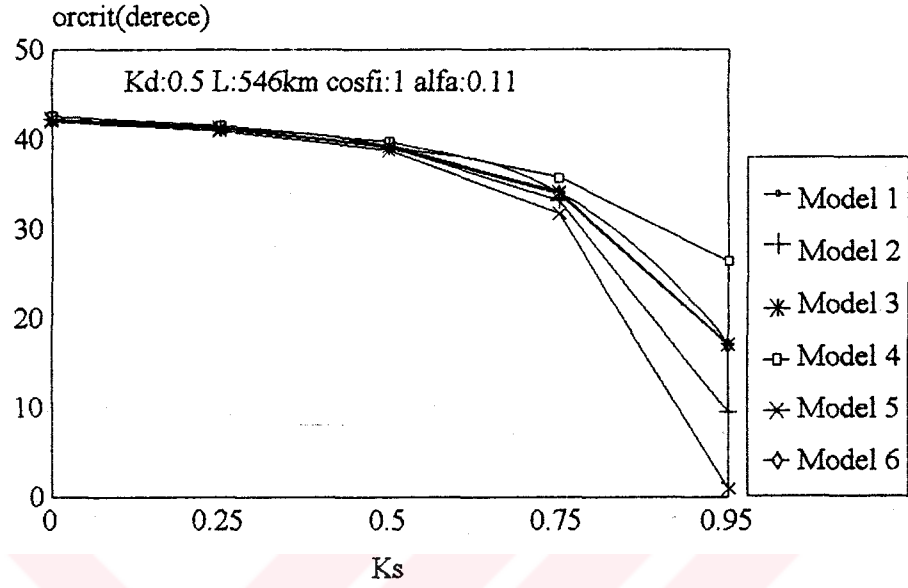
K _s	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	0.905	0.905	0.905	0.979	0.842	0.866
0.25	1.106	1.132	1.130	1.116	1.101	1.069
0.50	1.460	1.544	1.523	1.357	1.585	1.428
0.75	2.212	2.474	2.353	1.826	2.752	2.184
0.95	3.498	4.026	3.776	2.571	4.198	3.484



Şekil 3.23. İncelenen modellerin kritik gerilim değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi ($K_d=0.5$, $L=546\text{km}$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi_i=1$)

Tablo 3.2. Şekil 3.23 'te değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu $V_{crit}(\text{pu}) - K_s (\%)$

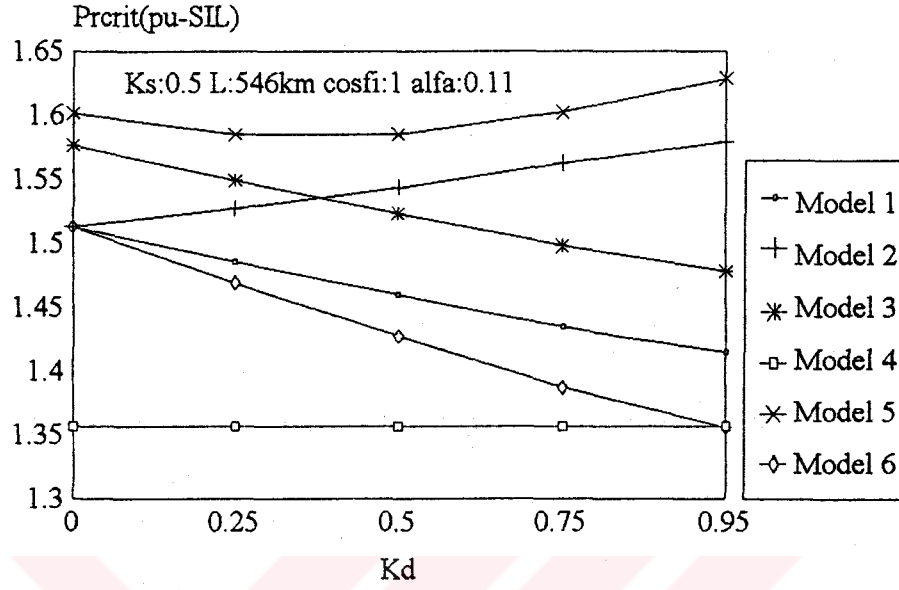
K_s	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	0.729	0.729	0.729	0.792	0.676	0.729
0.25	0.702	0.702	0.703	0.715	0.665	0.702
0.50	0.668	0.667	0.669	0.644	0.644	0.668
0.75	0.613	0.606	0.614	0.568	0.590	0.613
0.95	0.525	0.508	0.525	0.488	0.502	0.525



Şekil 3.24. İncelenen modellerin kritik yük açısı değerlerinin seri kompanzasyonla değişimi ($K_d=0.5$, $L=546\text{km}$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi_i=1$)

Tablo 3.3. Şekil 3.24 'de değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu $\delta_{crit}(\text{derece}) - K_s (\%)$

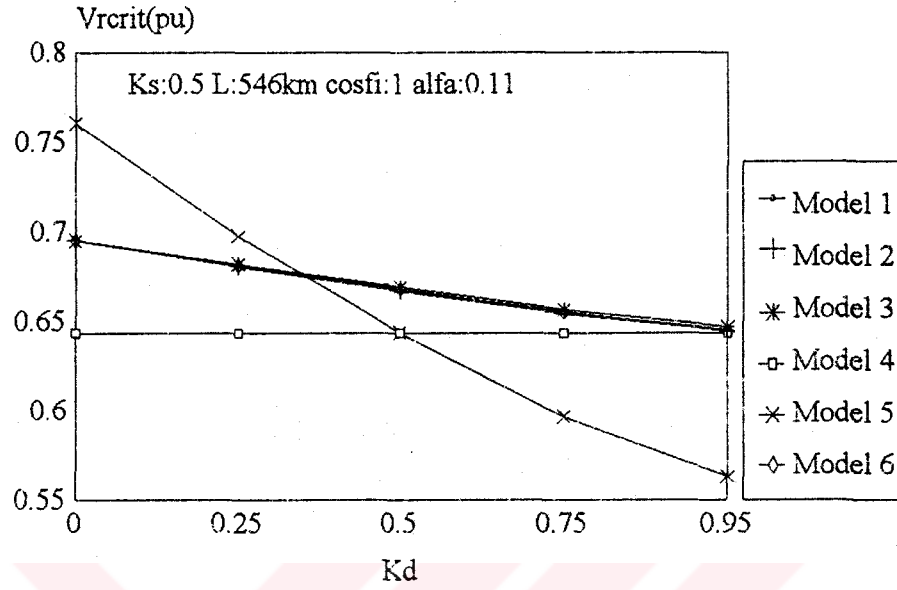
Ks	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	42.31	42.31	42.31	42.61	42.06	42.18
0.25	41.28	41.27	41.28	41.58	41.00	41.15
0.50	39.29	39.18	39.31	39.77	38.82	39.18
0.75	34.11	33.17	34.13	35.78	31.82	33.99
0.95	17.12	9.54	17.14	26.45	01.05	17.01



Şekil 3.25. İncelenen modellerin kritik güç değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi (K_s=0.5, L=546km, alfa=0.1, cos fi=1)

Tablo 3.4. Şekil 3.25 'te değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu Pr_{crit}(pu-SIL) - K_d (%)

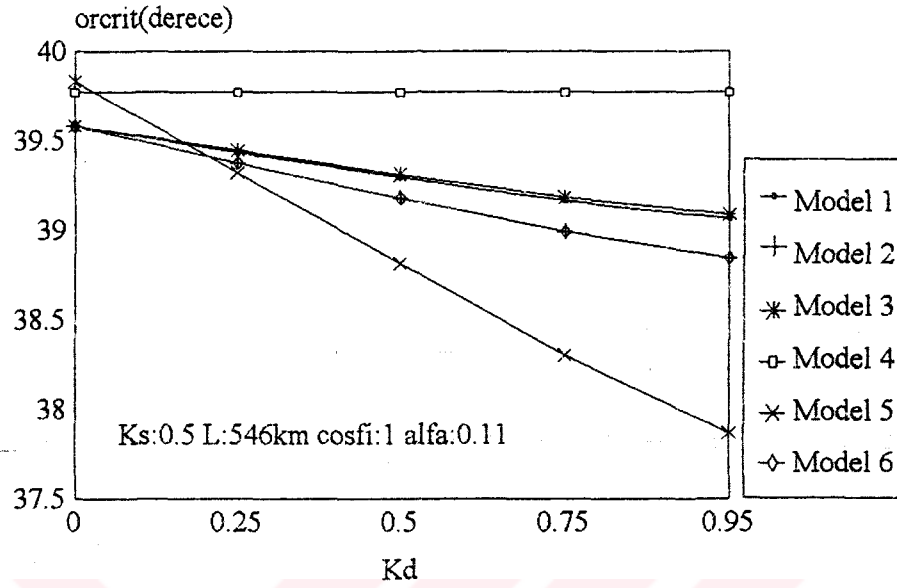
K _d	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	1.513	1.513	1.577	1.357	1.602	1.513
0.25	1.486	1.527	1.549	1.357	1.585	1.469
0.50	1.460	1.544	1.523	1.357	1.585	1.428
0.75	1.435	1.563	1.498	1.357	1.602	1.388
0.95	1.415	1.579	1.478	1.357	1.629	1.357



Şekil 3.26. İncelenen modellerin kritik gerilim değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi ($K_s=0.5$, $L=546km$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1$)

Tablo 3.5. Şekil 3.26' da değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu $V_{crit}(pu)$ - K_d (%)

K_s	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	0.695	0.695	0.695	0.644	0.760	0.695
0.25	0.681	0.681	0.682	0.644	0.698	0.681
0.50	0.668	0.667	0.669	0.644	0.644	0.668
0.75	0.655	0.655	0.657	0.644	0.597	0.655
0.95	0.645	0.645	0.647	0.644	0.564	0.645



Şekil 3.27. İncelenen modellerin kritik yük açısı değerlerinin şönt kompanzasyonla değişimi ($K_s=0.5$, $L=546\text{km}$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1$)

Tablo 3.6. Şekil 3.27 'de değişimi gösterilen kritik değerlere ilişkin veri tablosu $\delta_{crit}(\text{derece})$ - K_d (%)

K_s	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
0.00	39.58	39.58	39.58	39.77	39.83	39.58
0.25	39.44	39.38	39.45	39.77	39.32	39.38
0.50	39.29	39.18	39.31	39.77	38.82	39.18
0.75	39.17	38.99	39.19	39.77	38.30	38.99
0.95	39.06	38.84	39.09	39.77	37.87	38.85

Farklı etkileşimlere ilişkin yorumlar sonuç kısmında ele alınacaktır. Bununla birlikte, elde edilen verilere dayanarak, kompanzasyon oranlarıyla kritik değerlerin iyi yönde etkilenmelerine göre ölçeklenmesi halinde, modellerin statik gerilim kararlılığı açısından üstünlük sıralaması yapılabilir. Burada kritik değerlerin iyi yönde

etkilenmelerinden, kritik güç değerinin artması buna karşılık kritik gerilim ve yük açısı değerlerinin azalması kastedilmiştir.

Sıralama özetle şu şekildedir :

Kritik Gücün (P_{crit}) seri kompanzasyon yüzdesi (K_s) artımıyla etkileşimi için :

Model 5 - Model 2 - Model 3 - Model 1 - Model 6 - Model 4

Kritik gerilimin (V_{crit}) seri kompanzasyon yüzdesi (K_s) artımıyla etkileşimi için :

Model 4 - Model 5 - Model 2 - (Model 3 = Model 1 = Model 6)

Kritik yük açısının (δ_{crit}) seri kompanzasyon yüzdesi (K_s) artımıyla etkileşimi için :

Model 5 - Model 2 - Model 6 - Model 1 - Model 3 - Model 4

Kritik Gücün (P_{crit}) şönt kompanzasyon yüzdesi (K_d) artımıyla etkileşimi için :

Model 5 - Model 2 - Model 3 - Model 1 - (Model 6 = Model 4)

Kritik gerilimin (V_{crit}) şönt kompanzasyon yüzdesi (K_d) artımıyla etkileşimi için :

Model 5 - (Model 4 - (Model 1 = Model 2 = Model 6) - Model 3)

Kritik yük açısının (δ_{crit}) şönt kompanzasyon yüzdesi (K_d) artımıyla etkileşimi için :

Model 5 - (Model 2 - Model 6) - Model 1 - Model 3 - Model 4

sıralamaları yapılabilir. Parantez içinde verilen modeller için etkilerin birbirine çok yakın veya eşit oldukları gözlenmiştir.

Bu durumda, genel etkileşimler sonucu gözlenen en iyi hat modeli 5. model olarak gözükmektedir. En kritik model ise, 4. model olarak belirlenmiştir. Bunun bir ara sonuç olarak vurgulanmasının nedeni, dinamik yük modelleri altında bu hat modellerinin davranışlarını ön plana çıkararak statik ve dinamik davranışları bir yönüyle kıyaslamak içindir.

Herbir hat modeli için ayrıntıları veren grafikler, Ek F ' de verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca, P-V eğrilerinin incelenmesi sırasında ele alınan, hat uzunluğu ve hat kayıp faktörlerinin kritik değerler üzerine olan etkilerinin, seri ve şönt kompanzasyonla değişimlerini de izlemek mümkün olmaktadır.

BÖLÜM 4

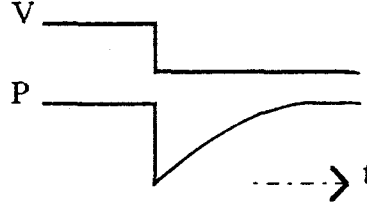
DİNAMİK GERİLİM KARARLILIĞI

Sürekli hal gerilim kararlılığı analizleri, çeşitli işletme koşulları altında, iletilen güç ile hat sonu geriliminin değişimini ve kritik değerlerin (P_{crit} V_{crit}) bu işletme koşullarıyla etkileşimlerini belirlemek ve P-V eğrileri yardımıyla bu değişimleri açıkça izlemek açısından oldukça yararlı olmasına karşılık, yüklerin dinamiğine bağlı olarak hızlı değişen olayların açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Zira statik analizlerde P-V eğrilerini karakterize eden olayların, dakikalardan saatler mertebesine uzanan geniş periyotlar içinde olduğu öngörülmektedir. Oysaki, paralel çalışan iletim hatlarının birinin devre dışı olması ve hat sonundaki yüklerin, ağırlıklı olarak sabit aktif güç çekme eğilimli asenkron motor yüklerinden oluşması durumunda, bu tür yüklerin hızlı transiyent karakteristikleri nedeniyle, yerel olarak ani gerilim çökmeleri görülebilecektir. Buna paralel olarak, koruma düzenlerinin de hızlı değişen böyle olaylara cevap verebilecek nitelikte olması gerekecektir.

Bunlara dayanarak, dinamik gerilim kararlılığı incelenirken; dinamik yük modeli, temel denklemler ve simülasyonun işleyişi ele alınacak, dinamik gerilim kararlılığını etkileyen faktörler ve korunma yöntemleri gözden geçirilecektir. Özellikle iletim hatları açısından, dinamik gerilim kararlılığı etkileşimleri ayrıca incelenecektir.

4.1. Dinamik Yük Modelleri

Klasik yük akışı analizlerinde, her yük düğümündeki aktif ve reaktif güçlerin sabit olduğu kabul edilmektedir [44]. Oysa ki gerçek sistemde bu yükler zamanla değişmektedirler. Bu değişim, normal yük artımı veya azalması şeklinde olabileceği gibi, şekil (4.1) ' den görüleceği üzere, bir baradaki gerilim artışını aynı şekilde izleyen ve daha sonra yaklaşık olarak başlangıç değerine düşen bir güç değişimi, özellikle dinamik simülasyon için tipik bir örnektir. 2. bölümde elektriksel yükler incelenirken, yüklerin karakteristikleri bakımından; sabit empedans, sabit akım ve sabit güç yükleri olarak üç ana gruba ayrıldıkları ve pratikte bir yükün, zaman içinde, bir gruptan başka bir gruba geçebildiği görülmüştü.



Şekil 4.1. Sabit güç yükünün adım cevabı

Şekil 4.1. ' de, ilk anda gerilim azalmasıyla orantılı azalan yük, tipik bir sabit bir empedans yüküdür. Bunun nedeni, motorun kütle ataleti veya kontrolör cevabının gecikmesi olabilir. Daha sonra ise, mekanik motor yükünün öz-kontrollu sabit güç karakteristiği veya kontrolörün sabit güç karakteristiği nedeniyle yük, sabit gücüne dönmektedir [21].

Sabit empedans yükleri, gerilim kararlılığı bakımından paralel hatlardan birinin açması gibi büyük bir bozucu etki altında dahi bir gerilim kararsızlığına yol açmazlar. Zira 2. bölümde açıklandığı gibi, gerilim değerindeki bir birim azalma güç değerinde yaklaşık iki kat azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda, kritik güç değeri azaldığı halde, yükün çektiği güç bu değerın altında kaldığı için, sabit empedans yükleri kararsızlığa yol açmadıkları gibi, sabit güç yükleriyle karma yükler oluşturmaları durumunda, gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

Dinamik yük elemanları ise iki grupta toplanabilir. Motorların hızlı geçici karakteristikli olmalarına karşılık, kontrollu omik yükler veya yük altında kademe değiştiriciler daha yavaş geçici karakteristiklidirler [45]. Başlangıç olarak, kontrollu omik yükün dinamiğini tanıtmak statik ve dinamik yaklaşımlar arasında bir geçiş olması açısından yararlı görülmektedir. Buna göre, örnek iletim hattının sonuna, kontrollu bir omik yük bağlandığı varsayılın. Bu yükün dinamiği birinci mertebeden bir gecikme modeliyle gösterilebilir [46], [47].

$$T_L \cdot \frac{dG}{dt} = P_o - G \cdot V_r^2 \quad (4.1)$$

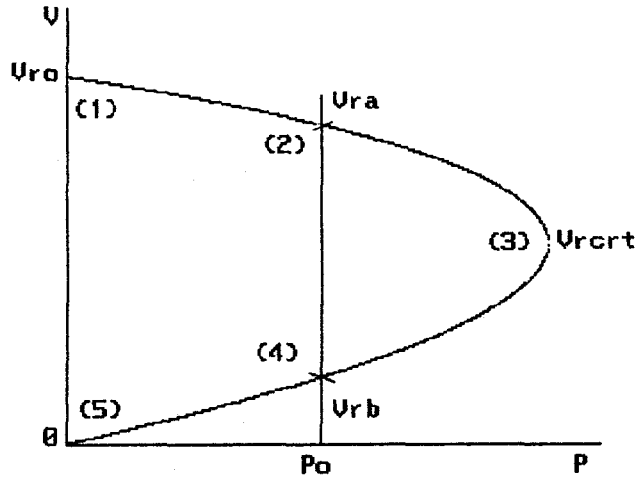
Burada;

T_L : yükün zaman sabiti,

V_r : yük Gerilimi,

G : sabit güce ayarlanabilen yükün kondüktansı,

P_o : sabit gücü ifade etmektedir.



Şekil 4.2. Kontrollü omik yükün dinamiğinin PV eğrisi üzerinde yorumlanması

Şekil 4.2. üzerinde aynı P_0 gücü için, gerilimin normal ve düşük olduğu noktalar göz önüne alınırsa,

$P_0 = G_a \cdot V_a^2 = G_b \cdot V_b^2$ ifadesinde $V_a > V_b$ buna karşılık $G_a < G_b$ 'dir yani düşük gerilim bölgesindeki yük kondüktansı üst gerilim bölgesindekinden daha küçük değerdedir (değere ayarlanmıştır). Bu iki nokta esas alınarak, eğri üzerinde belli bölgeler tanımlanabilir ve bu bölgeler için dinamik olaylar, (4.1) denkleminde şöyle yorumlanabilir :

Başlangıç noktası, (1) - (2) arasındaki bölgede ise $G < G_a$ olacağından, $\frac{dG}{dt} > 0$

(pozitif) 'dir ve dolayısıyla işletme noktası, $\frac{dG}{dt} = 0$ olan (a) noktasına oturur.

Başlangıç noktası, (2) - (3) - (4) arasındaki bölgede herhangi bir yerde ise

$G_a < G < G_b$ olacağından, $\frac{dG}{dt} < 0$ (negatif) 'tir ve dolayısıyla işletme noktası, (a) noktasına kayar.

Başlangıç noktası, (4) - (5) arasındaki bölgede ise $G_b < G$ olacağından, $\frac{dG}{dt} > 0$

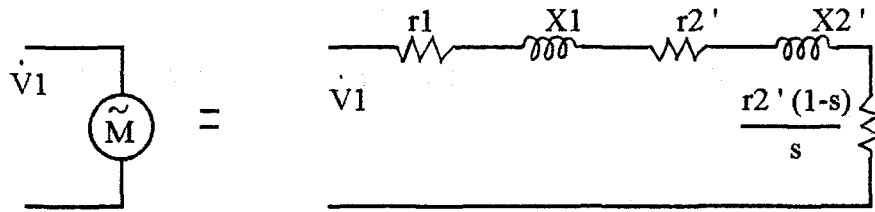
(pozitif) 'dir ve dolayısıyla işletme noktası, (b) noktasından gittikçe uzaklaşır.

Bu çalışmada, basitlikleri ve fiziksel özelliklerinin kolay anlaşılır olması nedeni ile, dinamik yük elemanı olarak asenkron motorlar ele alınacaktır [48], [49], [50].

Gerek işletme noktalarının açık olarak görülebilmesi, gerek çalışma bölgeleriyle ilgili yorumlamalar bu tür bir örnekle daha net olarak ortaya konulacaktır.

4.2. Temel Denklemler

Dinamik gerilim kararlılığını incelemek amacıyla, bir güç sistemini tanımlayan temel denklemleri sıralamadan önce, asenkron motoru kısaca ele almak yararlı olacaktır [51].



Şekil 4.3 Asenkron motorun basitleştirilmiş eşdeğer devresi.

V_1 : Stator faz-nötr gerilimi

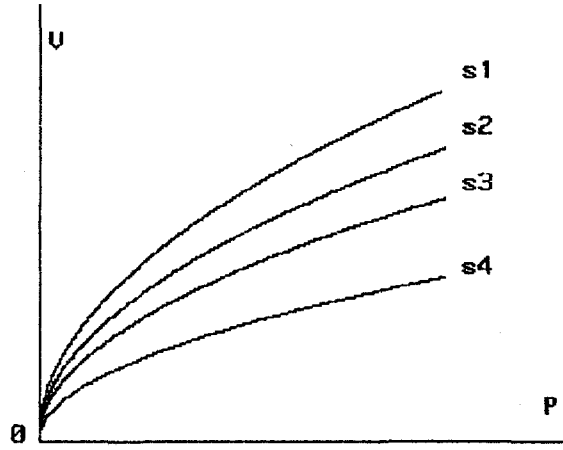
r_1 : Stator bir faz sargısının direnci x_1 : Stator bir faz sargısının kaçak reaktansı

r_2' : Rotor bir faz sargısının direncinin statora indirgenmiş değeri x_2' : rotor kaçak reaktansının statora indirgenmiş değeri

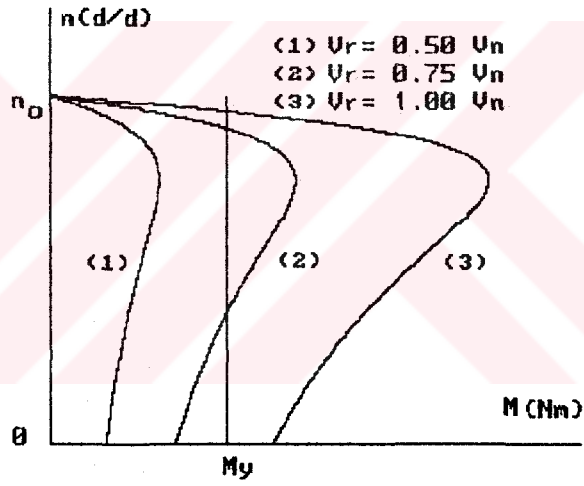
n_o : [d/d] senkron devir sayısı

$\omega_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_o}{60}$: senkron açısal hız $s = \frac{n_o - n}{n_o}$: kayma

Motorun şebekeden çektiği aktif ve reaktif güçler, şekil 4.3 ' teki eşdeğer devreye göre belirlenerek temel denklemlere katılacaktır. Bunun yanında asenkron motorun gerilim kararlılığı açısından son derece önemli olan iki karakteristiğini de göz önüne almak gerekir.



a)



b)

Şekil 4.4. Asenkron motorun a) farklı kaymalarda P-V eğrileri. ($s_4 > s_3 > s_2 > s_1$)
 b) (1) : uç gerilimi nominal değerinin yarısında iken, (2) : uç gerilimi nominal değerinin % 75 ' inde iken, (3) uç gerilimi nominal değerinde iken, devir sayısı - moment karakteristikleri.

Dinamik benzetişimi gerçekleştirmek için gerekli temel denklemler şu şekilde sıralanabilir :

Yük akışı denklemleri :

$$T1(k) : P_{ek} + \left\{ \sum_{j=1}^N (G_{kj} \cdot V_{ej} - B_{kj} \cdot V_{fj}) \cdot V_{ek} + \sum_{j=1}^N (G_{kj} \cdot V_{fj} + B_{kj} \cdot V_{ej}) \cdot V_{fk} \right\} = 0 \quad (4.1)$$

$$T2(k) : Q_{ek} + \left\{ \sum_{j=1}^N (G_{kj} \cdot V_{ej} - B_{kj} \cdot V_{fj}) V_{fk} - \sum_{j=1}^N (G_{kj} \cdot V_{fj} + B_{kj} \cdot V_{ej}) \cdot V_{ek} \right\} = 0 \quad (4.2)$$

bu denklemlerde,

G_{kj}, B_{kj} : k. ve j. düğümler arasındaki hattın kondüktas ve suseptansını,

V_{ek}, V_{fk} : k. düğüm geriliminin reel ve imajiner bileşenlerini,

P_{ek}, Q_{ek} : k. düğüme verilen aktif ve reaktif güçleri

göstermektedir.

Asenkron motor :

Şekil (4.3) ' e göre;

$$T3(k) : P_{ek} - \frac{(r_1 + r_2' / s_k)}{(r_1 + r_2' / s_k)^2 + (x_1 + x_2')^2} \cdot (V_{ek}^2 + V_{fk}^2) = 0 \quad (4.3)$$

$$T4(k) : Q_{ek} - \frac{(x_1 + x_2')}{(r_1 + r_2' / s_k)^2 + (x_1 + x_2')^2} \cdot (V_{ek}^2 + V_{fk}^2) = 0 \quad (4.4)$$

$r_t = r_1 + r_2' / s_k$, $x_t = x_1 + x_2'$ tanımlarıyla

r_{tk}, x_{tk} : k. asenkron motorun eşdeğer devresinin omik direnci ve reaktansını

s_k : k. motorun kaymasını göstermektedir.

Sürekli halde, motorun elektriksel giriş gücü (P_{ek}), mekanik yükü (P_{mk}) dengededir. Bunu şu eşitlikle göstermek mümkündür ;

$$T5(k) : P_{ek} \cdot (1 - s_k) - P_{mk} = 0 \quad (4.5)$$

Asenkron motorun dinamik denklemi, Ek E ' de gösterildiği gibi, hareket denkleminin türetilir. Bu denklem kaymanın fonksiyonu olarak şu şekilde elde edilmiştir ;

$$T6(k) : \frac{ds_k}{dt} = \frac{1}{I_k \cdot \omega_o^2} \cdot \left(\frac{P_{mk}}{1-s_k} - P_{ek} \right) \quad (4.6)$$

burada,

I_k : k. asenkron motorun atalet momentini,

f_o : güç sisteminin frekansını

$\omega_o = 2\pi f_o$, : açısal hızı,

göstermektedir.

4.3. Benzetişimin İşleyişi

Dinamik benzetişimin ilk adımı olarak, klasik yük akışı denklemlerinin (T1, T2) ve yük karakteristik denklemlerinin (T3,T4,T5) nümerik olarak çözüldüğü Newton-Raphson metodu ile, sürekli hal çözümleri yapılır.

İkinci adımda, gerilim çökme sürecinin bir bozucu etki ile tetiklendiği kabul edilerek, bir transiyent çözüm elde edilir. Bu bozucu etki; paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı olması veya motorun mekanik yükünün adım artımı ya da generatör, senkron kompanzatör veya statik bir yerel VAr kaynağının devre dışı olması şeklinde göz önüne alınabilir.

İlk bozucu etki oluştuğunda, kütle ataletinden dolayı motorun kayması sabit kalır. Dolayısıyla bozucu etki öncesinde ve hemen sonrasında motorun eşdeğer empedansı (dolayısıyla yük empedansı) değişmemektedir. Bu hipotez altında, yük akışı hesaplamalarıyla, başlangıç durumuna ilişkin çözüm elde edilir.

Daha önce kabul edildiği gibi, generatörlerin ve iletim hatlarının geçici davranışlarının, yüklerinkinden daha önce bastırıldığı varsayılmıştır. Bu hipotez, genellikle büyük güç sistemlerinde geçerlidir. Bu hipotez altında, gerilim çökmesinin geçici davranışları şu şekilde hesaplanmaktadır :

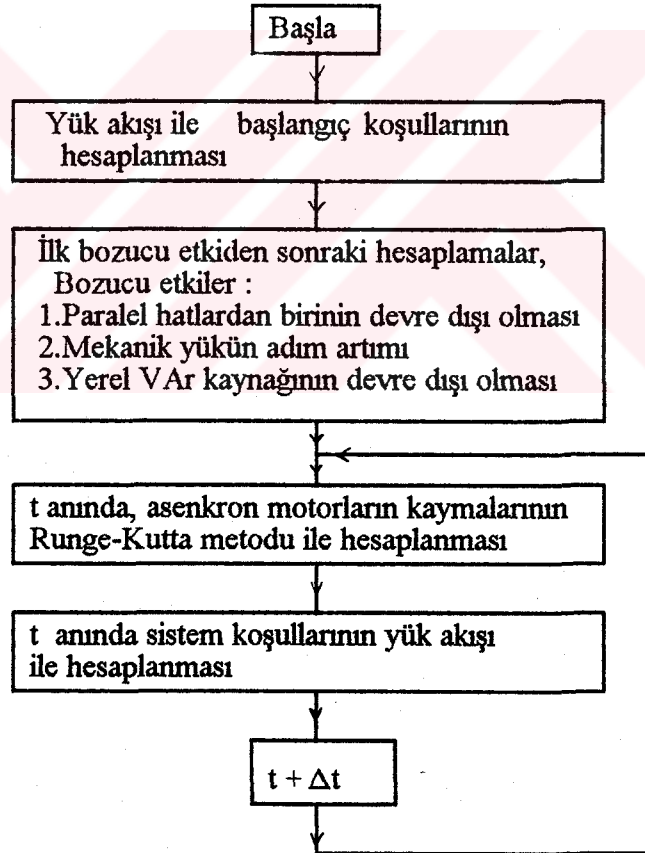
Asenkron motorların kaymalarının hesaplanması

Asenkron motorların $t + \Delta t$ anındaki kaymaları, güç sisteminin t anındaki durumu göz önüne alınarak, T6 dinamik denkleminin, 4. mertebe Runge-Kutta metodu kullanılarak çözümü ile hesaplanır.

Güç sisteminin yeni durumunun oluşturulması

Güç sisteminin, her düğümdeki gerilim, aktif güç ve reaktif güçleriyle temsil edildiği yeni durumu, yük akışı denklemlerinin ve yük karakteristik denklemlerinin ($T1, T2, T3, T4$) çözümü ile elde edilir.

Dinamik benzetişimin akış şeması şekil (4.3) ' te gösterilmiştir.

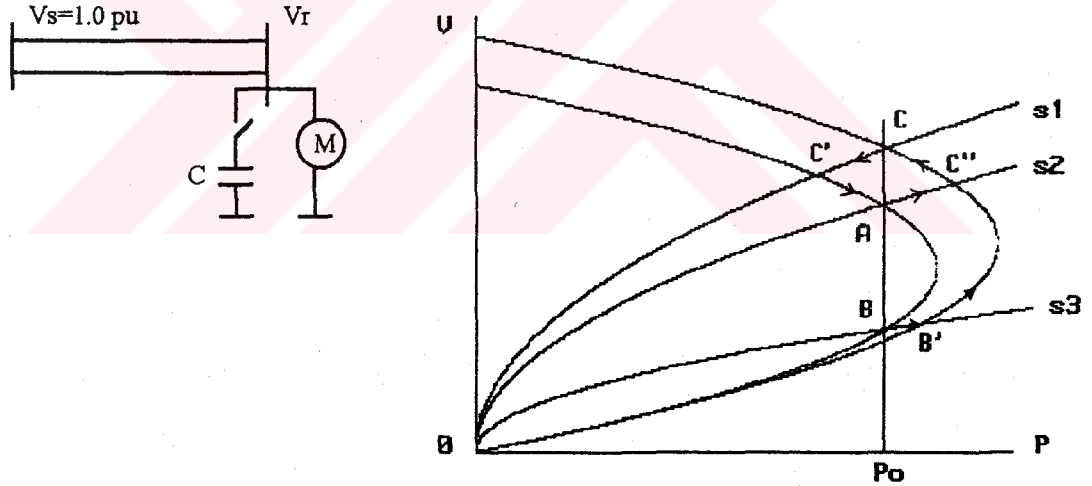


Şekil 4.5. Dinamik benzetişime ilişkin akış şeması

4.4. Gerilim Kararlılığının Temel Geçici Hal Durumu

İletim sistemine bağlı bir asenkron motorun şekil (4.3.b) 'deki P-V eğrileriyle, iletim sisteminin P-V eğrilerini biraraya getirerek, sürekli hal gerilim kararlılığına benzer biçimde, bu eğriler yardımıyla sistem üzerinde çalışma noktasının değişimini ve kararsızlığın nasıl oluştuğunu görmek mümkündür. Ancak belirtmelidir ki, buradaki bozucu etkinin sistemde hızlı ve ardışıl bir çökmeye neden olacak kadar büyük bir etkiye sahip olmaması gerekir; aksi halde konu P-V eğrileriyle açıklanamaz [21].

Örnek olarak alıcı uca, asenkron motora paralel bağlı bir kapasitenin devreye alınması (veya çıkarılması) durumu göz önüne alınacaktır. Bu durumu açıklamak için şekil (4.6) 'da örnek sistem ve sisteme ilişkin P-V eğrileriyle motor yükünün karakteristiklerinin bir araya getirilmesi gösterilmektedir. Buradan, gerek motorun yüklenmesine bağlı olarak ve gerekse uç geriliminin değişimi sonucu sabit elektrik yükünü (P_o) sağlamak amacıyla kaymanın (s) değişim etkileri açıkça görülmektedir. Sürecin işleyişini daha iyi açıklamak için bileşik P-V eğrilerini tekrar ele almak faydalı olacaktır.



Şekil 4.6. Örnek sistem ve P-V+Yük karakteristik eğrileri

Yük barasına bir şönt kapasite bağlanması durumunda P-V eğrisi değişecek, ancak bağlamadan hemen sonra asenkron motorun kayması değişmeyecektir. Böylelikle motorun çalışma noktası (A), sabit bir kayma ile karakteristik eğri üzerinde kalarak, yeni P-V eğrisi üzerindeki çalışma noktasına geçecektir (C"). Buna "sabit empedans atlaması" denilebilir. Bundan sonra, asenkron motorun şebekeden çektiği güç artarak mekanik gücü geçer. Bu nedenle, dinamik denklem T6 'ya göre asenkron

motorun kayması azalacak ve bunun sonucunda da motor ivme kazanacaktır. Kayma azaldığından motorun eşdeğer empedansı da küçülecektir ve asenkron motorun çalışma noktası yukarı doğru kayarak (şekil 4.6.) yeni çalışma noktasına (C) ulaşılır. Bu durum için transiyent mekanizması, başlangıç çalışma noktasının üst (A - C " - C) ya da alt (B - B' - C) gerilim bölgesinde olması durumları için aynıdır (sistem kararlı kalır).

Bu geçiş süreci gerilim çökmesi olayını yöneten bir durumdur. Farklı tür ve büyüklükteki bozucu etkiler için de temel süreç geçerli olmakla beraber, özellikle koruma amacıyla, gerilim ve güçlerin zaman içinde değişimlerinin izlenmesi daha uygun bir yaklaşım olacaktır.

4.5. Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler ve Korumanın Esasları

Gerilim kararlılığını etkileyen faktörleri ve korumanın esaslarını açıklamak için, iki baralı bir sistemde yük barasına bağlı bir asenkron motor göz önüne alınacaktır. Açıklamalar, önce varsayımlara dayalı temel durumlar için daha sonra da gerçek durumları yansıtacak şekilde yapılacaktır. Referans [52], [53] ve [54] ' den yararlanarak göz önüne alınacak makina modeli için şu parametreler seçilmiştir :

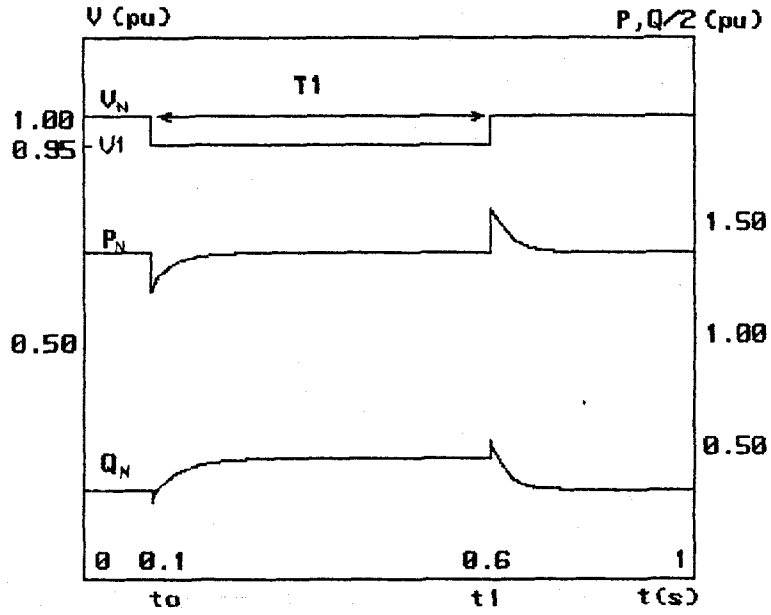
$$r_1 = 0.015 \text{ pu}, r_2' = 0.015 \text{ pu}, x_1 = 0.15 \text{ pu}, x_2 = 0.15 \text{ pu}$$

$$H = 0.5 \text{ s (atalet sabiti)}, S_{BAZ} = 100 \text{ MVA (baz güç)}, s = 0.0275 \text{ (kayma)}$$

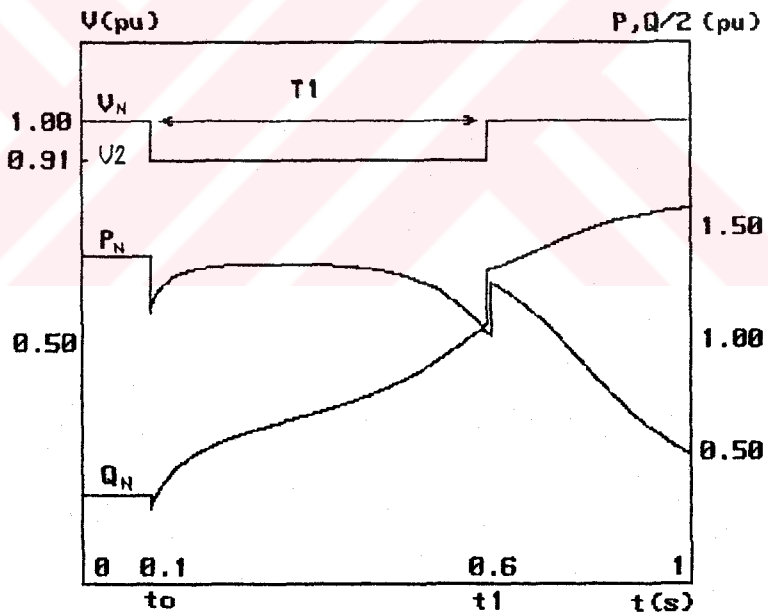
Makinanın farklı güçlerde çalıştırıldığı durumlarda kayma için farklı değerler seçilmektedir.

4.5.1. Temel Durumlar

Herhangi bir bozucu etki sonrasında bara geriliminin azaldığı ve bir süre sonra da eski değerine döndüğü varsayımıyla oluşabilecek durumlar, şekil (4.7) ' yardımıyla şöyle izah edilebilir :

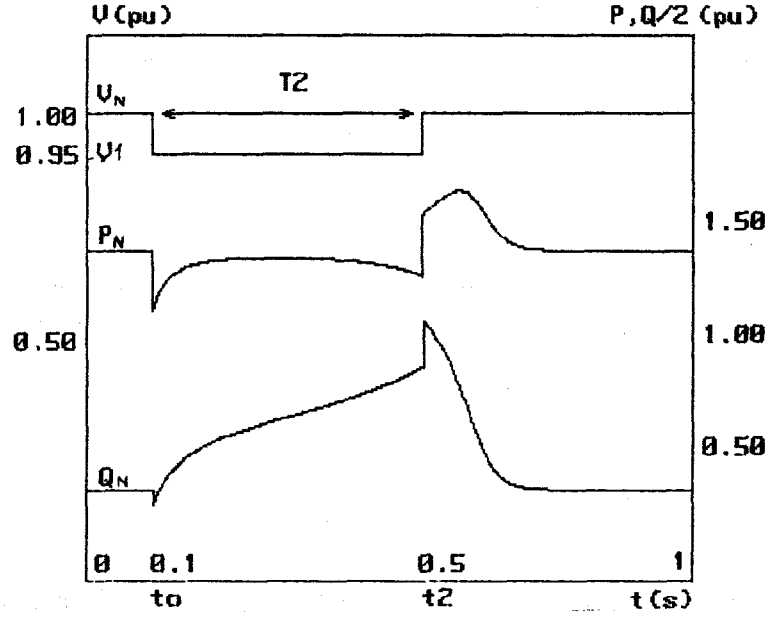


a)

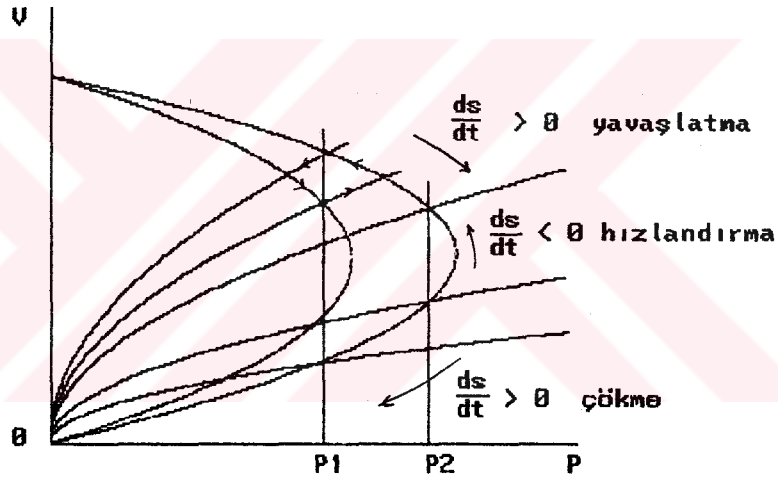


b)

Şekil 4.7. $V_1 > V_2$ farklı bara gerilimleri ve $T_1 > T_2$ farklı arıza temizleme süreleri olmak üzere a) V_1 , T_1 için, b) V_2 , T_1 için, c) V_2 , T_2 için asenkron motorun P-Q eğrileri, d) P-V eğrilerine göre durum.



c)



d)

Şekil 4.7. 'nin devamı

Şekil (4.7.a.) 'da daha önce sabit güç yükü için izah edilen durum tipik olarak gözükmemekte, burada ayrıca reaktif gücün değişimi de gösterilmektedir. Gerilimin V_n nominal değerinden, V_1 gibi daha düşük bir değere indiği durumdaki, aktif ve reaktif güçlerde ani bir düşme görülmekte, ancak gerilim V_1 değerini korurken, aktif güç nominal değerine gelmekte reaktif güç ise nominal değerini aşan yeni bir değere oturmaktadır. Bu durum tamamen tüm sistemin dinamiğini yansıtan denklemlerin çözümüyle elde edilmektedir. Gerilimin yeni değeri V_1 , sistemin çökmesini tetikleyecek seviyede olmadığı yine bu eğriden anlaşılmaktadır. Burada en önemli

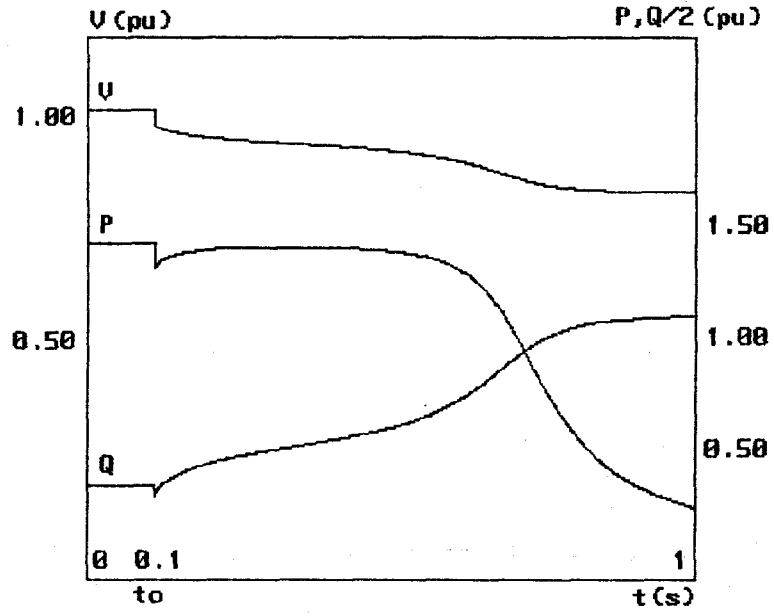
nokta, reaktif gücün davranışdır. Zira gerilim azalması ile motor, nominal değerinde (veya çok yakın) aktif güç çekmeye devam ederken, reaktif güç talebinde artma olmaktadır. Bu şekil için, teorik bir varsayım olarak, gerilim V_n değerinden V_1 veya V_2 değerlerine indiğinde bu değerlerde sabit kaldığı düşünülmektedir, oysa gerçek durumda reaktif güç artımıyla bara geriliminin de azalması söz konusudur. Daha sonra bu durum esas alınarak incelemeler genişletilecektir. Yine şekil (4.7.a) 'dan görüleceği üzere, T_1 süresi sonunda gerilim nominal değerine döndüğünde, aktif ve reaktif güçler de önce bir adım artımıyla nominal değerlerine dönmektedirler.

Şekil (4.7.b.) 'de ise gerilimin nominal değerinden V_2 gibi bir değere indiği varsayılmaktadır, ancak burada a) durumundan farklı olarak gerilim azalmasının daha fazla $V_2 < V_1$ olduğu kabul edilmiştir. Burada da, gerilimin azalmasını, aktif ve reaktif güçlerde ani bir azalmayla takip etmekte, ancak aktif güç nominal değerine dönmeye çalışırken reaktif güç sürekli artmakta ve bu durumda aktif güç nominal değerine ulaşmadan tekrar azalmaya başlamaktadır. T_1 süresi sonunda V_2 gerilimi V_n nominal değerine döndürülmesine rağmen, aktif güç toparlanamamakta reaktif güç ise artmaya devam etmektedir. Sonuçta kayma $s = 1$ 'e gidecek başka bir deyişle motor duracaktır. Bunun nedeni, şekil (4.3.a.) 'da görülen devir sayısı-moment karakteristiği yardımıyla açıklanabilir. Şöyle ki, uç geriliminin azalmasıyla motorun devrilme momenti de küçülmekte, bunun sonucu çökme olayı meydana gelmektedir.

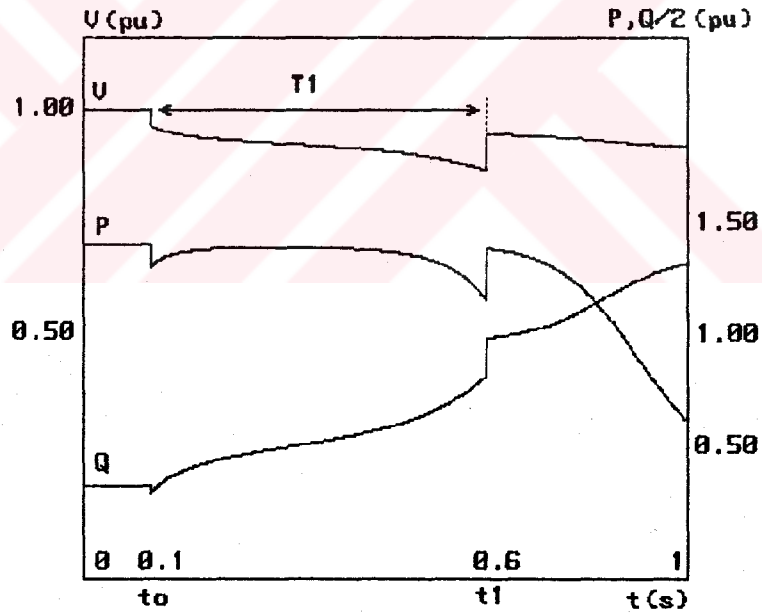
Bu durumdan korunmanın yolu şekil (4.7.c) 'de gösterildiği gibi, arıza temizleme süresini kısaltmaktır $T_2 < T_1$. Burada b) 'deki durmla aynı koşullarda bozucu etki (gerilim azaltılması) uygulanmış, ancak arıza temizleme süresi daha kısa $T_2 < T_1$ tutulmuştur. Bu şekilde dinamik olayların işleyişinin korunmanın esasları ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.7.d. 'de ise aynı durumların P-V + kayma eğrileri yardımıyla gelişimi gösterilmiştir.

4.5.2 Gerçek Uygulamalar

Burada, kısım 4.5.1 'de açıklanan ve varsayımlara dayalı uygulamalar genişletilerek, paralel iki radyal hatla (3. bölümde göz önüne alınan hat) beslenen asenkron motor yükünün, hatlardan birinin devre dışı olması durumunda oluşacak bozucu etkiye maruz kalmasıyla ortaya çıkacak durumlar ve uygulanacak koruma düzeninin prensipleri incelenecektir.

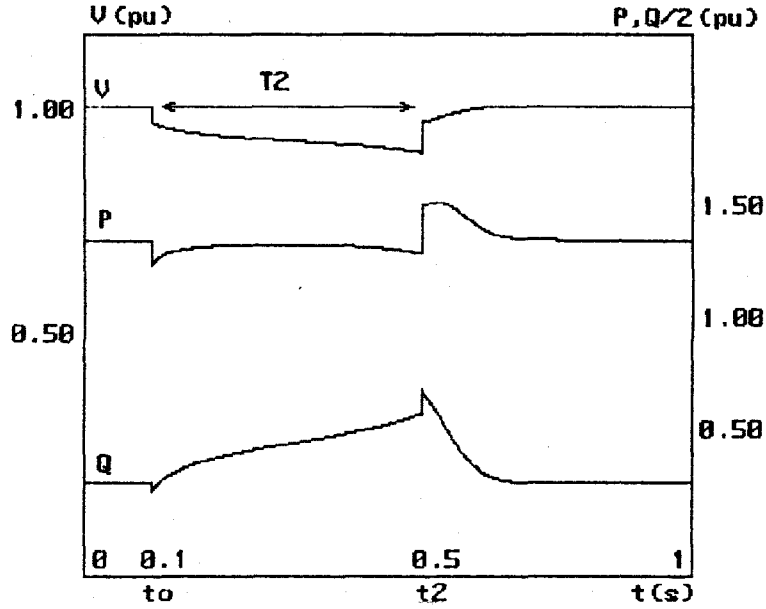


a)



b)

Şekil 4.8. a) Kompanzasyon yapılmamış sistem, b) $T_1=0.5s$, c) $T_2 = 0.4s$ için ($T_1 > T_2$) farklı arıza temizleme süreleri sonunda kompanze edilmiş sistem.



c)

Şekil 4.8. ' in devamı

Şekil (4.8.) 'den görüleceği üzere a) 'daki örnek iletim sisteminde paralel hatlardan biri, t_1 anında devre dışı kalmaktadır. Bu durumda,

a) Öncelikle yük barasındaki gerilim (V_r) ve motorun aktif (P_e), reaktif (Q_e) güçleri ani olarak azalmakta, ardından P_e toparlanmaya çalışırken Q_e sürekli artmaktadır. 4.5.1 'deki durumdan farklı olarak yük barası gerilimi sabit kabul edilmemiştir. Bu durumda Q_e artımına paralel olarak şebekeden çekilen akım dolayısıyla gerilim düşümü arttığından, yük barası gerilimi azalmakta bu da Q_e artımını desteklemektedir. Böylece ardışıl olarak Q artımı - V azalması sonucunda, yük barasına bağlı asenkron motor yükü devrilmeye gitmekte, gerilimin hızla azalmasıyla sistemde gerilim çökmesi olayı meydana gelmektedir (şekil (4.8.a.)).

b) a) 'ya benzer bir durum uygulanmakta, ancak paralel bir hat açıldıktan T_1 süre sonra (t_2 anında), yük barasına bir şönt C kapasitesi bağlanmaktadır. Kapasite bağlanınca motorun Q_e yükü kısmen kompanse edildiğinden bara gerilimi yükselmektedir. Ancak temizleme süresi uzun tutulduğundan, Q_e artımı fazla olmuş ve kompanzasyon bu artımı karşılayamamıştır. Dolayısıyla a) 'daki olaya benzer tarzda gerilim çökmesi meydana gelmiştir (şekil (4.8.b.)).

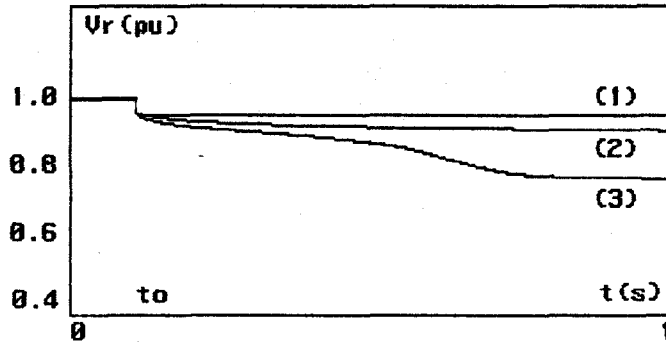
4.6. Dinamik Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler

Dinamik gerilim kararlılığı ve koruma ile ilgili esasları inceledikten sonra, dinamik gerilim kararlılığını etkileyen faktörleri araştırmak yararlı olacaktır [60]. Bu faktörler; yükün çeşidi, motor mekanik yükünün yüzdesi, motor mekanik yükünün türü, motorun rotor ve yük ataletlerinin etkisi, yük kısa devre seviyesi, generatör empedansının işe katılması ve özellikle, tez çalışmasının bu kısmında esas inceleme konusunu oluşturan iletim hatlarının etkileri, şeklinde sıralanabilir.

Sadece yükler açısından etkiler incelenirken, şekil (4.6) 'daki örnek sistemde, bir $t_0 = 0.05$ s anında paralel hatlardan birinin devre dışı olduğu öngörülmektedir, ayrıca bozucu etkiyi kuvvetlendirmek amacıyla, hatların şönt kapasiteleri tamamen ihmal edilmiş ve motor için kayma $s=0.0285$ seçilmiştir. Ancak hatlar ve yüklerin birlikte etkileri incelenirken ise, hattın şönt kapasiteleri ihmal edilmeyerek, örnek alınan 6 farklı işletim modu için farklı seri ve şönt kompanzasyon yüzdeleri altında, paralel hatlardan birinin devre dışı olması durumu için, çeşitli etkiler incelenecektir.

4.6.1. Yükün Çeşidi

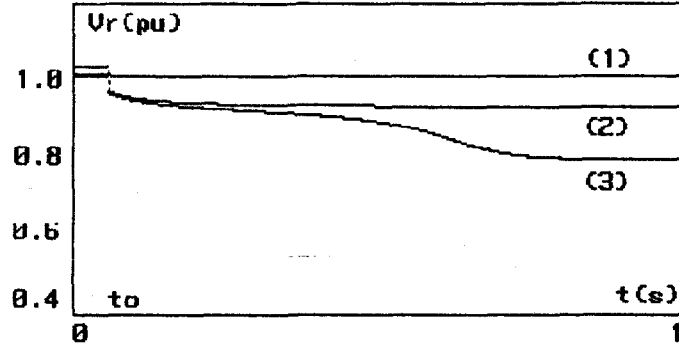
Yükler kısmında ve bu bölümün başında incelendiği gibi, yük tipi olarak sabit empedans ve sabit güç yükleri ağırlıklı olarak gözükmemektedirler. Bunlardan, sabit güç yükünün gerilim kararlılığına olan olumsuz etkisi, sabit empedans yükünün ise gerilim dalgalanmalarına uyumlu cevabı bilindiğinden, bu iki yük tipinin aynı yük barasındaki yüzdelikli ağırlıklarına göre gerilim kararlılığına olan etkileri şekil 4.10 'da görülmektedir. Burada, (1) : %100 sabit empedans yükü, (2) : %50 sabit emp. yükü + % 50 As.motor yükü, (3) % 100 motor yükü ' nü göstermektedir.



Şekil 4.10. Bozucu etki sonrası farklı yüzdeli karma yüklerin gerilim cevapları

4.6.2. Motor Mekanik Yükünün Yüzdesi

Burada, yükün tamamen asenkron motor yükü olduğu ve motorun mekanik yükünün sabit momentli olduğu öngörülmektedir. Yük, (1): %25, (2) : %50, (3) % 100 şeklinde arttırılmıştır. Gözönüne alınan iletim hattındaki bozucu etki için % 50 yüklenmenin üstü kritik durum sergilemektedir.



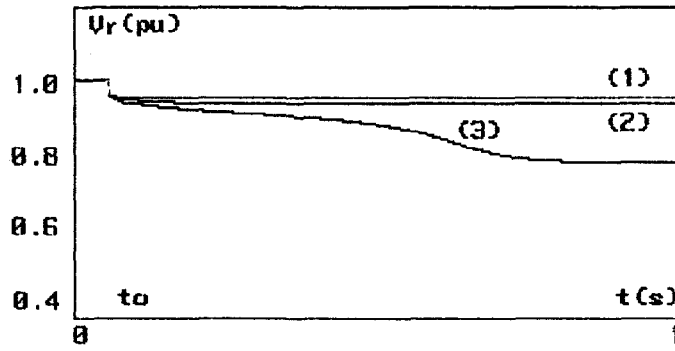
Şekil 4.11. Asenkron motor yükünün farklı yüzdeleri için gerilim cevapları

4.6.3. Motor Mekanik Yükünün Karakteristiği

Motorun mekanik yük momentini tanımlayan, değişken bir üstel (α) değeriyle farklı yük karakteristiklerinin etkisi incelenebilir.

$$M_y = M_{y0} \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^\alpha, \text{ ifadesinde, } M_y \text{ :yük momentini, } M_{y0} \text{ :sürtünme ihmal edilmiş}$$

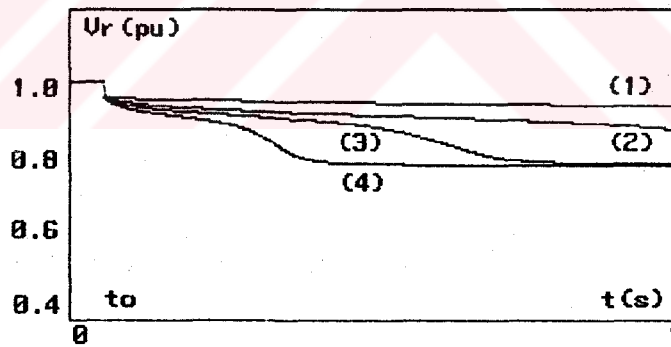
durumda anma yük momentini, n :devri, n_0 :anma devrini; aşağıdaki şekilde ise, (1) $\alpha = 2$ havalandırıcılar, santrifüj pompalar gibi momentle karesel değişen yükleri, (2) $\alpha = 1$ motor-generator setleri, girdap akımlı frenler gibi momentle doğru orantılı yükleri, (3) $\alpha = 0$ ise konveyör, kaldırma makinaları, talaşlı takım tezgahları gibi sabit momentli yükleri temsil etmektedir. Şekil 4.12 ' den görüleceği gibi, sabit momentli yükler gerilim çökmesinde en fazla etkiye sahiptirler.



Şekil 4.12. Farklı mekanik yükler için asenkron motor yükünün gerilim cevapları

4.6.4. Motorun Rotor ve Mekanik Yükünün Ataleti

Burada, motor mekanik yükünün sabit momentli olduğu göz önüne alınmış ve rotor + yük ataletlerine, H : (4): 0.25 s - (3): 0.50 s - (2): 1 s - (1): 10 s şeklinde farklı değerler verilerek yükün gerilim cevapları elde edilmiştir. Şekil 4.13 ' ten görüleceği üzere, düşük atalet momentleri daha hızlı gerilim çökmelerine neden olmaktadır. Oysa, büyük atalet momentlerinde bozucu etki sonrasında bile motor işletmede kalabilmektedir.

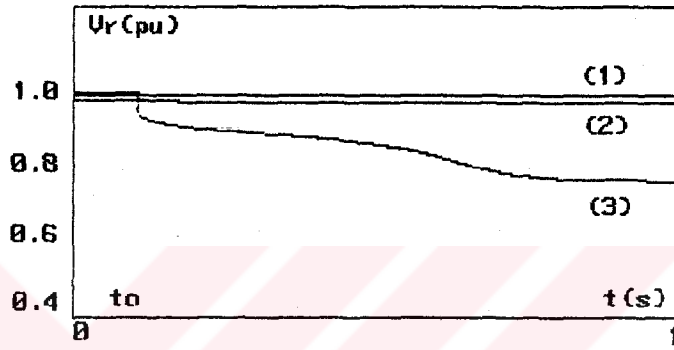


Şekil 4.13. Motor atalet sabitinin farklı değerleri için asenkron motor yükünün gerilim cevapları

4.6.5. Yük Kısa Devre Seviyesi

Transiyent gerilim kararlılığını etkileyen faktörler arasında, yüklerin öz etkileri dışında önemli bir etken de, üretim ile yük baraları arasındaki empedanstır. Bu empedans aynı zamanda yükün kısa devre seviyesini belirtir. Bu etkiyi incelemek için, yükün, sabit mekanik momentli asenkron motor yükü olduğu ancak iletim hattı parametrelerinin değişeceği varsayılmaktadır. İlk olarak, paralel iki hattan birinin devre

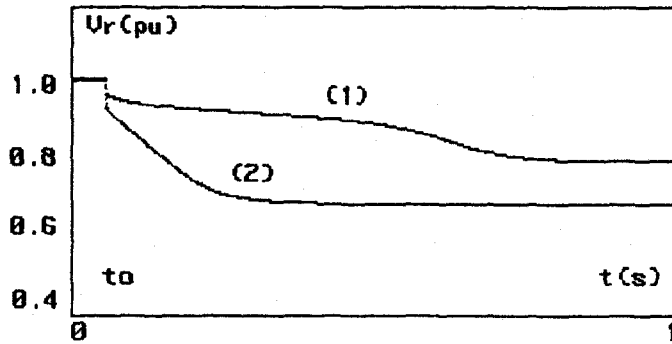
dışı olmasını gözönüne alalım. Bu durumda, seri empedans orjinal değerine çıkarken şönt admitans % 50 'sine düşmektedir. Daha sonra ise a) üç, paralel iletim hattında gözönüne alınarak, her birinden birer hattın devre dışı ol. varsayılmıştır. Böylelikle, a) için seri empedans orjinal değerinin % 150 'sine çıkmakta, şönt admitans ise % 66 'sına düşmekte, b) için seri empedans orjinal değerinin % 133 'üne çıkmakta, şönt admitans % 75 ' ine inmektedir. Buna göre şekil 4.14 ' ten görüleceği gibi, kısa devre seviyesi küçüldükçe gerilim kararlılığı artmaktadır. Bunun nedeni, düğümlerdeki (baralardaki) reaktif güç/gerilim duyarlılığının, yaklaşık olarak kısa devre akım seviyesine orantılı olmasından kaynaklanmaktadır [61].



Şekil 4.14. Farklı yük kısa devre seviyeleri için Asenkron motor yükünün gerilim cevapları. (1) : 4 hat, (2) : 3 hat, (3) : 2 hat paralel

4.6.6. Generatör Dinamiklerinin Etkisi

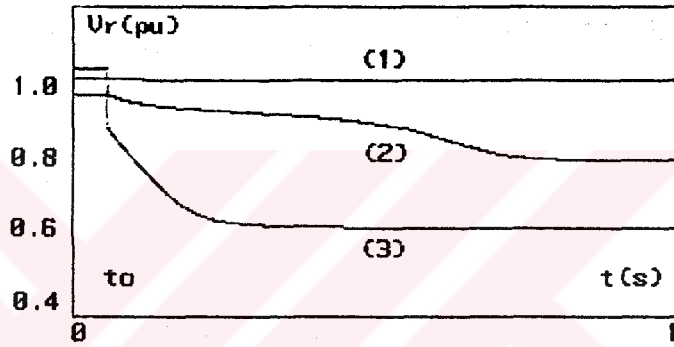
Daha önce gözönüne alınanlara benzer koşullar altında, besleme kaynağının sonsuz güçlü bara olması yada kaynak empedansının gözönüne alınması durumlarının gerilim kararlılığı açısından etkileri şekil 4.15. 'de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.15. Farklı yapıdaki generatör baraları için Asenkron motor yükünün gerilim cevabı. (1) sonsuz güçlü bara, (2) gerçek durum

4.6.7. İletim Hattının Uzunluğu

Statik kararlılık bakımından farklı uzunluktaki hatların etkileri 3. bölümde incelenmişti. Burada, hat kapasiteleri ihmal edilmeksizin (1) 750 km , (2) 550 km ve (3) 250 km lik, paralel hatların birinin devre dışı kalması sonucunda, asenkron motor yükünün gerilim cevapları görülmektedir. Bu durumda 750 km 'lik hat, şekil 3.9 'a göre kritik gücüne ulaşılmadığından ve yüksek kapasitesi nedeniyle, daha iyi bir durum göstermektedir. Diğer hatlar ise, kapasiteleri nedeniyle daha düşük hat sonu gerilimlerine sahip olduklarından ve bozucu etki sonrası bu hatlara bağlı asenkron motor yükünün neden olduğu ardışıl gerilim düşümü sonucunda, daha kötü durumlar sergilemektedirler.



Şekil 4.16. Farklı uzunluktaki iletim hatları için, asenkron motor yükünün gerilim cevabı

Şüphesiz, şönt kapasiteler ihmal edilmiş olsa idi iyilik sıralaması tam tersine olacaktı. Bu nedenle, gerilim kararlılığı açısından iletim hatları incelenirken, sadece statik sınırlar göz önüne alınmayıp, dinamik yük elemanlarının da işe katılması gerekli görülmektedir. Bunun yanında, uzun iletim hatlarında gerek seri gerekse şönt kompanzasyonlar yapılması ve bu kompanzasyonların hattın muhtelif yerlerinde uygulanmasıyla, statik açıdan oldukça değişik etkilenmeler gözlemlendiğine göre aynı hat işletim modellerinin dinamik yük etkileri açısından da incelenmesi faydalı olacaktır.

4.7. Hat Modellerine Göre Dinamik Yüklerin Bozucu Etkilere Cevabı

3. bölümde, seri ve şönt kompanzasyonların iletim hattı üzerinde değişik noktalara yerleştirilmeleri ile elde edilen farklı hat modelleri üzerinde kompanzasyon oranlarını değiştirilerek, statik anlamda yüklerin kritik güç, gerilim ve yük açısı değerleri hesaplanmış ve modeller açısından bir iyilik sırası belirlenmeye çalışılmıştı. Bu bölümde ise, öncelikle dinamik yüklerin ve bu tür yüklerin bağlı olduğu iletim hatlarıyla

ilgili olarak çeşitli durumlar incelenmiştir. Bu kısımda, iletim hatlarının bölüm 3.' te gözönüne alınan modellerden oluşan 6 ayrı şekle sahip olarak, seri kompanzasyon oranı K_s : 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 ve 0.95 olarak ele alınırken, her bir K_s değeri için şönt kompanzasyon oranları da K_d : 0.0, 0.25, 0.50, 0.75, 0.95 şeklinde değiştirilmiş ve her bir durum için bütün modların önce paralel iki hat olarak çalışırken ($t_0 = 0.05s$) anında hatlardan birinin devre dışı kaldığı ve ($t_1 = 0.35s$) anında da tekrar devreye alındığı varsayımı ile hat sonuna bağlı dinamik yüke bir bozucu etki uygulanmıştır. Hatlar için bölüm 3 ' te dinamik yükler için bölüm 4 'te gözönüne alınan veriler kullanılmıştır.

Bu bozucu etki sonrasında farklı seri ve şönt kompanzasyon oranları altında ve farklı hat işletim şekilleriyle kaynağa (hatbaşına) bağlı olan dinamik yükler, iletim hattı sabitleri ve kendi iç dinamiklerinin belirlediği davranışlar altında; ya çalışmaya devam etmişler ya da bir ardışıl bir gerilim çökmesi olayına maruz kalarak devre dışı olmuşlardır (örnek yük asenkron motor olduğundan, devrilmişlerdir). Bu dinamik simülasyon esnasında, gelişmeleri ayrıntılı olarak ortaya koyan, her bir seri ve şönt kompanzasyon yüzdeleri altında bütün modlardaki dinamik yüklerin, uç gerilimlerinin, çektikleri aktif ve reaktif güçlerin değişimlerini gösteren şekiller Ek G 'de verilmiştir. Bu şekiller yardımıyla, modellerin gerilim çökmelerine göre önceliklerini gösteren bir tablo aşağıda hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Bozucu etkiye maruz kalan dinamik yüklerin gerilim çökmelerine neden olmaları halinde farklı modellerdeki öncelik sıraları. Birden fazla model numarası olan gözlerde, azdan çoğa doğru etkilenme sırası belirtilmektedir.

	$K_s=0.0$	$K_s=0.25$	$K_s=0.50$	$K_s=0.75$	$K_s=0.95$
$K_d=0.0$	-	-	4	4	4
$K_d=0.25$	-	-	4	4	4
$K_d=0.50$	6 - 5	5	4	4	4
$K_d=0.75$	1≡2≡3 - 6 - 5	2 - 1 - 3 - 6 - 5	4 - 5	5 - 4	4
$K_d=0.95$	1≡2≡3 - 6 - 5	1~2~3 - 6 - 5	6 - 4 - 5	4 - 5	5 - 4

Buna göre, hat sabitlerinin kompanzasyonlarla etkilenmelerinden doğan durumlar sonucunda, seri kompanzasyonun artırılması ile 4. modelin daima kötü yönde etkilendiği, şönt kompanzasyonun artırılması ile de 5. modelin kötü etkilenmeler sergilediği gözükmektedir. Seri kompanzasyon artırıldıkça 5. modelin şönt kompanzasyondan kaynaklanan kötü yöndeki etkilenmesinin azaldığı gözlenmektedir.

Bunun yanında düşük seri kompanzasyon oranlarında 3. ve 6. modellerin de şönt kompanzasyon oranının artımından kötü yönde etkilendiği, ancak yine seri kompanzasyon oranı arttıkça etkilenmenin daha az olduğu açıkça gözlenmektedir. Burada 6. modelin 3. modelden daha fazla etkilendiğini belirtmek gerekir.

Bir ara sonuç olarak, 4. modelin statik yükler açısından yapılan incelemelerde ortaya konduğu gibi dinamik yükler bakımından da en kritik model olduğu söylenebilir. Şüphesiz en ilginç görüntüyü 5. model sergilemektedir. Zira, statik yükler açısından en uygun değerlere sahip olan bu model, dinamik yükler açısından oldukça kritik durumlar göstermiştir. Yine tek bir şönt reaktörün kullanıldığı 6. modelde kritiklik açısından diğer tek reaktörlü 4. ve 5. modellerin arasına karışmakta, iki şönt reaktör kullanılan modeller arasında 3. modelin 2. ve 1. modele göre biraz daha krtitik olduğu gözlenmektedir. Dinamik yüklerin etkileri bakımından, hat modellerinin bir iyilik sıralaması yapılacak olursa ,

2.Model - 1.Model - 3.Model - 6.Model - 5.Model - 4. Model
şeklinde sıralama yapmak uygun olacaktır.

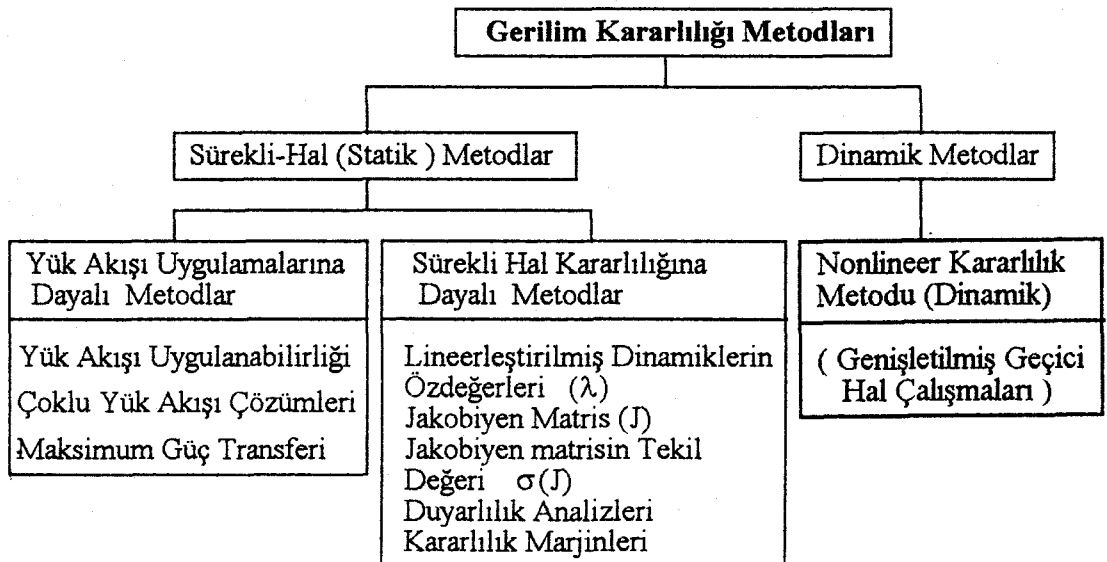
BÖLÜM 5

N - BARALI SİSTEMLERDE GERİLİM KARARLILIĞI

Önceki bölümlerde gerilim kararlılığı ile ilgili çalışmalar, iki baralı sisteme dayalı olarak yapılmıştır. Ancak, gerek bir ülke içinde gerekse ülkeler arasında iletim sistemleri yaygın olarak enterkonnekte yapıda olduğundan, iki baralı sisteme dayalı temel çalışmaların N baralı sisteme yayılması gereklidir. Zira, gerilimin, kritik bölge civarında ani olarak çökmesi nedeniyle, problemin planlama ve işletme safhalarında ele alınması zorunludur. Bu nedenle, çeşitli işletme durumlarını göz önüne alarak, gerilim kararlılığı bakımından kritik değerlerin belirlenmesi gerekir. Çalışmanın bu aşamasında çok-generatörlü ve çok-yüklü sistemlerin enterkonnekte yapı içerisinde iken gerilim kararlılığı açısından incelemesi yapılacaktır.

Bu çalışmada kullanılan yöntemleri incelemeye başlamadan önce, gerilim kararlılığına yönelik incelemelerin, özellikle son yıllarda, literatürde oldukça yaygınlaştığını gözönüne alarak, temel taşı niteliğindeki önemli çalışmalara dayanarak analizleri belirli gruplarda toplamak mümkündür [62].

Tablo 5.1. Gerilim kararlılığı metodların genel sınıflandırılması



N baralı sistemler için dinamik metodlarla, 4. bölümde incelenen temel yapının dışında, transiyent çalışmaları genişletilmiş biçimde ve çeşitli açılardan ele alınmaktadır. Bir kısım çalışmalarda yükleri, gerilim ve frekansa bağlı ancak esasta statik karakteristikli olarak gözönüne alan, bunun yanında iletim hatlarını ve generatörlerin dinamiklerini de içeren ayrıntılı gösterilimlere yer verilirken [6],[7], diğer bir kısım transiyent çalışmalarda ise, yüklerin dinamikleri de hesaba katılarak daha karmaşık yapıda incelemeler gerçekleştirilmiştir [8],[9].

Statik metodlar için ilk grupta, kararlılık limitine bir yaklaşım olarak, Newton-Raphson yük akışı analizlerinin yakınsaması önerilmiştir. Kararlı bir başlangıç işletim noktasından itibaren, yük sonlu adımlarla artırılmış ve her noktada sistemin durumu yük akışı çözümü ile belirlenmiştir [10]. İşlemler NR metodunun ıraksadığı noktaya kadar sürdürülmüştür. ıraksamanın nedeni ya kritik gerilim noktasına yaklaşıldığı için veya nümerik problemler nedeniyle olmaktadır [63]. Metod zaman alıcı gözükmemektedir. Yük akışına dayalı diğer metodlar; yük akışının çoklu çözümlerine ve denge noktalarına ait analizler [11], [12] ve maksimum güç teoremi uygulamaları olarak ele alınmaktadır [64]. Benzer olarak yükün artırılması ve generatör gerilimlerinin ayarlanması ile ilgili kriterler belirleyen çalışmalar da vardır [65].

Sürekli hal kararlılığına dayalı diğer grup çalışmalara da göz atılırsa;

Lineerleştirilmiş dinamiklerin özdeğerleri, (λ) belirli bir güç injeksiyonu için kararlılık marjininin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Diğer bir gösterge olarak ta jakobiyen matrisin kendisi kullanılmıştır [13]. Başka bir methodda ise, global bir gerilim kararlılığı indeksi olarak, yük akışı denklemlerinin Jakobiyen matrisinin minimum tekil değeri $\sigma(J)$ kullanılmıştır. Gerilimin kritik değerine yaklaşması durumunda bu indis sıfıra gitmektedir [14]. Diğer bir çalışmada ise yine Jakobiyen matrisin tekil değeri gerilim kararsızlığından korunma için gösterge seçilerek, sistemden daha az sayıda ölçüm yaparak elde edilen indirgenmiş bir durum vektöründen yararlanma yoluna gidilmiştir [66].

Aynı grupta farklı bir küme oluşturan çalışmalarda ise duyarlılık gösterge olarak kullanılmıştır. Burada ya gerilimin yüke duyarlılığı $(\partial V_L / \partial Q_L)$, veya üretimin yüke duyarlılığı $(\partial Q_g / \partial Q_L)$ ya da gerilim duyarlılığının özel bir baradaki aktif ve reaktif güçlere uygulanması $([\partial V_i / \partial P_i] \cos \theta_i = [\partial V_i / \partial P_i] + \tan \theta_i \cdot [\partial V_i / \partial Q_i])$ gerçekleştirilmiştir. Sağlıklı bir sistemde duyarlılık sayısı küçük değerlerde iken, güç talebi maksimum noktaya yaklaştığında ise, belirgin bir şekilde artarak teorik olarak maksimum noktasında sonsuza gidecektir. Ancak iletim sistemlerinin lineer olmayan yapıları

nedeniyle duyarlılık sayısı kritik bölge için güvenilir bir indis olamayacaktır [17],[18]. Bunun yanında, yapılan son çalışmalarda daha farklı duyarlılık indisleri de geliştirilmektedir [67].

Bazı metodlarda ise, $(V_L - V_L^+)$ yük gerilimi kararlılık marjini ya da yük reaktif güç marjini $(Q_L - Q_L^+)$ indeks olarak kullanılmıştır. ' + ' indisi kaynaktan yüke sürülebilecek maksimum güce karşılık gelen değerleri temsil etmektedir [19],[20].

Önerilen metodlarda hesaplamaların bilgisayarla yapıldığı gözönüne alınırsa, genel olarak, metodların aşağıda sıralanan dezavantajlardan bir ya da birkaçını içerdiği görülebilir.

Bazı metodlar, iki - baralı sisteme dayalı teoriyi doğrudan kullanmışlardır, bu ise çok generatörlü devreler açısından tartışılabilir bir modeldir.

Bazı metodlarda ise, reaktif güç üretim limitleri hesaba katılmamaktadır. Oysa bu durum gerilim çökmesini hızlandıran, diğer bir deyişle kararlılık limitini daraltan önemli bir faktördür [17],[64],[68],[69].

Bazı araştırmalarda ise , yük - akışı sonlu adımlarla tekrar edilerek kritik noktaya ulaşımak istenmektedir. Oysa bu olay, zaman alıcı bir yöntem olmaktan öte kritik gerilim noktası yakınında Newton-Raphson yük akışı algoritmaları bazı önlemler alınmadıkça güvenilir olmayan davranışlara sahip olabilirler. Bunun nedeni ise, çoklu yük akışı çözümlerinin kritik nokta civarında birbirine yakın olmasıdır [11],[70]

Bu tezde, bu kısımda yapılan çalışmaların esası, statik yük akışı analizlerine dayalı olup, dinamik davranışlar her bir çalışma noktası için lineerleştirilerek statik incelemelere katılmışlardır. Çok-generatörlü, çok-yüklü N baralı sistem incelemesi yapılırken şöyle bir yol izlenmiştir;

Yük akışı analizi ile, uygulanacak olan yöntemle data sağlamakla beraber kritik noktaya ulaşıldığında (ıraksama olmadan ulaşılan son nokta) kullanılacak olan yöntemle elde edilecek değerlerin, yük akışı ile elde edilen gerçek sonuçlarla kıyaslanması sağlanabilecektir.

Önerilen yöntem ise; herhangi bir yük durumu için, yük akışı analizi ile tüm sistemin gerilim ve güç profili çıkarıldıktan sonra, gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri belirlenecek olan yük barası ile, salınım barası olarak seçilen bir üretim barası

dışındaki tüm baralardaki güç injeksiyonları, yönleri de göz önüne alınarak, bara admitans matrisine katılırlar. Böylelikle sistem o yüklenme durumu için korunmuş olur [64]. Elde edilen yeni bara admitans matrisine " düğüm indirgeme tekniği " uygulanarak, ilgili bara ile salınım barası dışındaki tüm baralar indirgenir ve sistemin iki baralı bir eşdeğeri elde edilir. Elde edilen bu eşdeğere, iki baralı sistem için, yük akışı analizlerindeki Jakobiyen matrisin tekiliğine dayanarak analitik olarak elde edilmiş olan, kritik yük açısı, kritik gerilim ve kritik güç ifadelerinin yardımıyla, kritik değerlerin sayısal sonuçları elde edilir. Burada, elde edilen iki baralı sistem modeli, sadece ilgili baradaki yükün (veya tüm sistem yüklenmesinin) karşılığı olan bir model olduğundan, gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen baradaki yükün, yük akışı iraksayana kadar artırılarak işlemlerin sürdürülmesi gereklidir.

İletim sistemlerinin başlıca üç koşul nedeniyle kötü durumda (ill-conditioned) olduğu söylenebilir [71], bu koşullar :

- 1) Devre konfigürasyonu (uzun iletim hatlarının çokluğu, hatların R_h / X_h oranının yüksek olması vs.),
- 2) İşletme koşulları (sistem yükünün fazla olması),
- 3) Yük akışı koşulları (PQ / PV bara oranının yüksek olamaması, salınım barasının seçimi, başlangıç koşullarının seçimi) şeklinde sıralanabilir. Bunların yanında, reaktif güç kompanzasyonun fazla olmasının [72], ve büyük yüzdeli seri ve şönt kompanzasyonların da yakınsama problemleri çıkarttığı bilinmektedir.

Yük-akışı analizlerinde kullanılan Newton-Raphson metodunun, incelenen sistemin normal (sağlıklı) çalışma koşullarının dışında, yukarıda sıralanan sağlıksız işletme durumlarında bazen yakınsama ile ilgili problemler çıkardığı bilinmektedir [73],[74]. Bu çalışmada, özellikle, sistem yükünün artmasından doğan problemler önemlidir. İki baralı sistemden bilinen PV eğrilerindeki uç noktaya (kritik nokta) yaklaşılması halinde, bu nokta civarındaki teğetlerin eğimlerinin (türevler) arttığı gözönüne alınırsa; yapılan çalışma, sistemi, salınım barası ile ilgili yük barası arasında indirmeye dayalı olduğundan, NR metodunu bazı nümerik önlemler alınmadan kullanmak, metodun ya iraksaması yada alt bölgedeki düşük gerilim değerine yakınsamasına neden olabilecektir. Zira NR metodundaki Jakobiyen matris bütün türevleri içerdiğinden, teğet düzlemlerin çokluğu metodun, bahsedilen bu tür sakıncalar doğurmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle, yöntemin nümerik kararlılığını arttırmak amacıyla matris parçalanması teknikleri uygulanması gerekir [75],[76]. Bu çalışmada ise, doğal kararlı yapısı nedeniyle Ayrık-yük akışı metodu kullanılmıştır.

5.1. Ayrık Yük Akışı

Bu çalışmada, bara admitans matrisi kullanılarak, Newton yöntemlerinden Ayrık yük akışı yöntemi uygulanacaktır. Ayrık yük akışı doğal kararlı yapısı ve karesel yakınsama özellikleriyle bilinen bir yöntem olarak [77], [78], [79] bu çalışmada, bu özelliklerinden dolayı, gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerin belirlenmesinde kullanılacaktır. Konuya giriş açısından, öncelikle, bara admitans matrisinin elde edilmesi ve bara tiplerini kısaca tanıtmak gerekir.

Genellikle, enerji iletim sistemleri dengeli üç fazlı sistemler olarak ele alınarak, iletim hatları " pozitif dizi " ile gösterilir. Bu diziyi temsil eden elemanlar, yük akışında kullanılmak amacıyla, doğrudan bara admitans matrisini (Y_{bara}) oluşturmada kullanılırlar.

Bara admitans matrisinin oluşturulmasında izlenen temel algoritma şöyledir :

- a) Matrisin, her bir barayı temsil eden köşegen elemanına, o baraya bağlanan tüm elemanların admitansları katılır,
- b) Köşegen elemanlarının dışında kalan diğer satır elemanları da, o satır numarasındaki bara ile köşegende temsil edilen bara arasındaki elemanı, varsa (-) işaretiyle gösterir, eleman yoksa sıfır değer alır.

İletim hatları bu şekilde gösterildikten sonra, baralara bağlı generatörler ve yükler de sisteme akım enjekte eden elemanlar olarak ele alınırlar. Burada esas, akım enjeksiyonunda yönün sisteme doğru pozitif alınmasıdır. İletim hatları ve hatların şönt kapasiteleri, kullanılan bara admitans matrisinin temel elemanlardır. Ancak, özellikle uzun hatlarda işletim zorunlulukları nedeniyle seri ve şönt kompanzasyon yapılması halinde, bu elemanların admitanslarının da bara admitans matrisine katılması gerekir. Bunun dışında, yük akışının kullanım amacına göre baralara bağlı diğer elemanlar da (örneğin yükler) bu matrise katılabilirler.

Sistemde kullanılan baralar, klasik anlamda üç ana grupta toplanabilir [80]:

1) Yük Baraları , (P-Q bara)

Bu baralarda, sistemden çekilen aktif ve reaktif güçler (P_y , Q_y) belli olup , gerilimler ve yük açıları (V_y , δ_y) hesaplanır.

2) Üretim baraları , (P-V bara)

Bu tip baralarda ise üretilen aktif güç ve bara geriliminin genliği (P_u , $|V_u|$) belirlidir. Reaktif güç üretiminde ise kısıtlamalar vardır. Üretim, minimum ve maksimum sınırlar ($Q_{\min} \leq Q_u \leq Q_{\max}$) arasında iken bara gerilimin genliği sabit bir değerde tutulur. Reaktif güç üretimi çeşitli zorunluluklar nedeniyle bu limitlerin dışına çıktığı zaman, bu güç, $Q_u = Q_{\max}$ veya $Q_u = Q_{\min}$ olarak sabit bir üretim olarak ele alınır ve bu bara, bir yük barasına dönüştürülür [81],[82]. Dolayısı ile bu durumda bara gerilimi değişecektir. Bu durum, yapılan bu çalışma açısından gereklidir zira baraların kritik değerlerinin hesaplanmasında yüklenmeler her zaman maksimum değerlere çıkacağından, generatörlerin reaktif güç sınırlarına ulaşması daima olasıdır. Yük akışı analizi yapılırken reaktif güç sınırlarına ulaşıldığında P-V bara P-Q baraya dönüştüldüğü gibi, işlemler sırasında reaktif güç sınırlarının altına inilirse ilgili baranın tekrar P-V baraya dönüştürülmesi gereklidir. Bu tez çalışmasında kullanılan yük akışı programının algoritması, anılan bu özellikleri gerçekleyecek şekilde düzenlenmiştir.

3) Salınım Barası

İletim sisteminde, hat kayıplarının önceden bilenememesi nedeniyle, yük akışı sonunda belirlenen bu kayıplar, genellikle bir üretim barasının güçlerine eklenir. Dolayısı ile bu baranın sadece (V_u , δ_u) bara gerilimi ve açısı belli ve sabittir. Sistemin çeşitli yük ve üretim durumları için, bu baradan sisteme gönderilen güçler farklı olacaktır. Bunun nedeni de, yukarıda açıklandığı gibi bu baranın güçlerinin yük akışı sonunda belirlenmesidir.

Özetle, bara tiplerini özellikleriyle belirtir bir tablo aşağıda verilmiştir :

Tablo 5.2. Bara tipleri

Bara Tipi	Kontrol değişkenleri	Durum değişkenleri
P-Q	P_v , Q_v	$ V_v $, δ_v
P-V	P_u , $ V_u $, $Q_{\min}$, $Q_{\max}$	Q_u , δ_u
Salınım	$ V_u $, δ_u	P_u , Q_u

5.1.1. Newton Yük Akışı Yönteminin Genel İfadeleri

Yöntemin genel ifadeleri aşağıda çıkarılmıştır.

$f(x) = 0$ nonlineer denklemi, $x^{(0)}$ civarında seriye açılarak ;

$$f(x^{(0)}) + (x - x^{(0)}) \cdot f'(x^{(0)}) + (1/2!) \cdot (x - x^{(0)})^2 \cdot f''(x^{(0)}) + \dots = 0 \quad (5.1)$$

ifadesi bulunur. Burada ikinci ve daha yüksek mertebeli ifadeler ihmal edilerek;

$$f(x^{(0)}) + (x - x^{(0)}) \cdot f'(x^{(0)}) = 0 \quad (5.2)$$

denklemini elde edilir. (5.2) denklemini çözülerek iyileştirilmiş yaklaşım $x^{(1)}$ bulunur :

$$x^{(1)} = x^{(0)} - (f(x^{(0)}) / f'(x^{(0)})) \quad (5.3)$$

aynı yolla $(k+1)$. iterasyona gelindiğinde ;

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - (f(x^{(k)}) / f'(x^{(k)})) \quad (5.4)$$

denklemini elde edilir. n-boyutlu durum için nonlineer denklem seti şu şekildedir :

$$F(X) = 0$$

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{için}$$

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - [F'(X^{(k)})]^{-1} \cdot F(X^{(k)}) \quad (5.5)$$

$F'(X)$, $F(X)$ in Jakobiyenidir ve şöyle tanımlanır :

$$F'(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$J^{(k)} = F'(X^{(k)})$ tanımı ile (5.5) denklemini iki parçaya ayrılarak çözülebilir :

$$(i) \quad F'(X^{(k)}) \cdot \Delta X^{(k)} = -F(X^{(k)}) \quad (5.7.a)$$

$$(ii) \quad X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \quad (5.7.b)$$

Newton metodları, iteratif metodlara (Gauss, Gauss-Seidel ...) göre kuadratik yakınsama karakteristiğine sahiptir [80],[83]. Özellikle çalışılan sistem hakkında bilgi sahibi olmak ve bunun sonucunda iyi başlangıç tahminleri yapmak, daha iyi sonuç vermesini sağlar.

5.1.2. Yük Akışı Çözümü

Baralardan sisteme gönderilen akımların genel formu ;

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot V_q, \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (5.8)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem kullanılarak aktif ve reaktif güçler belirlenir :

$$V_p \cdot I_p^* = V_p \cdot \sum_{q=1}^n Y_{pq}^* \cdot V_p^* \quad , p = 1, 2, \dots, n \quad (5.9)$$

$$P_p = \text{Re}\{ V_p \cdot I_p^* \} \quad (5.10.a)$$

$$Q_p = \text{Im}\{ V_p \cdot I_p^* \} \quad (5.10.b)$$

Newton metodlarında, kutupsal koordinatlar yaygın biçimde kullanıldığından, bu çalışmada da aynı yol izlenmektedir. Gerilimler : $V_p = |V_p| \angle \delta_p$, yük açılarının farkları : $\delta_{pq} = \delta_p - \delta_q$ ve admittanslar da : $Y_{pq} = G_{pq} + j B_{pq}$ şeklinde gösterilmektedir. (5.10.a) ve (5.10.b) denklemleri buna göre açılırsa,

$$P_p - |V_p| \cdot \sum_{q=1}^n ((G_{pq} \cdot \cos \delta_{pq} + B_{pq} \cdot \sin \delta_{pq}) \cdot |V_q|) = 0 \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (5.11.a)$$

$$Q_p - |V_p| \cdot \sum_{q=1}^n ((G_{pq} \cdot \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cdot \cos \delta_{pq}) \cdot |V_q|) = 0 \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (5.11.b)$$

n baralı (düğümlü) sistemde n_1 adet P-Q bara, n_2 adet P-V bara ve 1 adet salınım barası olduğuna göre $n = n_1 + n_2 + 1$ olacaktır. Problem , P-Q baralarındaki gerilimlerin (n_1 adet) genliklerini ve P-Q ve P-V baralarındaki ($n_1 + n_2$ adet) yük açılarını belirlemek şeklinde özetlenebilir. X ; durum değişkenlerini (bilinmeyenleri) içeren vektör , Y ' de ; kontrol değişkenlerini (bilinenleri) içeren vektör olarak tanımlanırsa, $X : 2.n_1 + n_2$ boyutlu, $Y : 2.n_1 + 2.n_2 + 2$ boyutlu vektörler olacaktır.

				1	V	Salınım
				1	δ	Salınım
				n_1	P	P-Q Bara
	n_1	V	P-Q Bara	n_1	Q	P-Q Bara
X :	n_1	δ	P-Q Bara	n_2	P	P-V Bara
	n_2	δ	P-V Bara	n_2	V	P-V Bara
	$2n_1 + n_2$			+	$2n_1 + 2n_2 + 2$	

(5.11.a) ve (5.11.b) denklemlerinden X boyutunda ($2n_1 + n_2$) denklem takımı seçilerek nonlineer yük akışı denklemleri $F(X, Y) = 0$ oluşturulur. Y ' den salınım barasına ait bilinenler ($|V|, \delta : 2$ adet) ile P-V baralarına ait bilinenler ($|V| : n_2$ adet) çözüme katılamaz.

$F(X)$ şöyle oluşturulur :

$$F(X) = \begin{bmatrix} \text{P-V ve P-Q baralarda denklem (5.11.a)' da } P_p = P_p^{sp} \text{ alınır} \\ \text{P-Q baralarda denklem (5.11.b)' de } Q_p = Q_p^{sp} \text{ alınır} \end{bmatrix} = 0 \quad (5.12)$$

böylece X bilinmeyenlerine eşit sayıda $(2n_1 + n_2)$ denklem elde edilmektedir. Bu denklemler farklı bir notasyonla şöyle yazılabilir :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = 0 \quad (5.13)$$

burada ;

$$\Delta P_p = P_p^{sp} - |V_p| \cdot \sum_{q=1}^n ((G_{pq} \cdot \cos \delta_{pq} + B_{pq} \cdot \sin \delta_{pq}) \cdot |V_q|) = 0 \quad (5.14.a)$$

$$\Delta Q_p = Q_p^{sp} - |V_p| \cdot \sum_{q=1}^n ((G_{pq} \cdot \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cdot \cos \delta_{pq}) \cdot |V_q|) = 0 \quad (5.14.b)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

$$P \neq s, \quad p \neq \text{P-V bara}$$

(5.7.a) lineer denklemi Newton metodu ile şu şekle girer :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_{(k)} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}_{(k)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta \delta}{\Delta |V|} \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix}_{(k)} \quad (5.15)$$

(5.15) ifadesinde P-Q baralarındaki gerilimlerin genliklerinin değişimini $(\Delta |V|)$, gerilimlerin genlikleriyle $(|V|)$ bölünmesinin nedeni katsayılar matrisinde simetri sağlamak ve bazı ifadeleri kısaltmak içindir [80].

Bu ifadelerde; (P_p^{sp}, Q_p^{sp}) : baralardaki sayısal değeri belli olan (bilinen) güçleri, k : iterasyon sayısını, $H = \partial P / \partial \delta$, $N = \partial Q / \partial \delta$, $M = \partial P / \partial (\Delta |V|)$, $L = \partial Q / \partial (\Delta |V|)$ şeklinde Jakobiye'nin kısmi türevlerini göstermektedir.

ΔP ve ΔQ 'nun gerçek değerlerinin sıfır olması gerektiği halde, iteratif işlemler sırasında, kesme ve yuvarlatma hataları nedeniyle bunu gerçeklemek zordur. Bunun yerine, $\Delta P \leq \varepsilon$ ve $\Delta Q \leq \varepsilon$ şeklinde bir (ε) yakınsama kriteri seçilir. Bu kriter de

$\varepsilon = 0.1$ ile 0.0001 arasında seçilir ki 100 MVA bazında bu 10 MW/MVAr ile 0.01 Mw/MVAr olarak gözükür. Yapılan bu çalışmada $\varepsilon = 0.0001$ seçilmiştir.

5.1.3. Ayırık Yük Akışı Metodunun Uygulanması

Enerji iletim sistemlerinin iyi bilinen ilginç karakteristiklerinden biri, normal sürekli hal çalışma koşulları altında, aktif güçle - gerilimin açısı ($P-\delta$) arasında ve reaktif güçle - gerilimin genliği ($Q-|V|$) arasında kuvvetli bir ilişkinin olmasıdır. Buna karşılık ($P-\delta$) - ($Q-|V|$) çiftleri arasındaki ilişki ise çok daha zayıftır. Bu özellikten yararlanarak, (5.15) denklemindeki N ve M alt matrisleri ihmal edilirler. Sonuç olarak (5.15) denklemi,

$$[\Delta P] = [H] \cdot [\Delta \delta] \quad (5.16.a)$$

$$[\Delta Q] = [L] \cdot [\Delta |V|] \quad (5.16.b)$$

şeklinde ayrı ayrı çözülebilir. Burada H ve L matrislerinin köşegen elemanları ($p=q$);

$$H_{pp} = -B_{pp} \cdot |V_p|^2 - Q_p \quad (5.17.a)$$

$$L_{pp} = -B_{pp} \cdot |V_p|^2 + Q_p \quad (5.17.b)$$

köşegen dışı elemanları ($p \neq q$),

$$H_{pq} = L_{pq} = |V_p| \cdot |V_q| \cdot (G_{pq} \cdot \sin \delta_{pq} - B \cos \delta_{pq}) \quad (5.17.c)$$

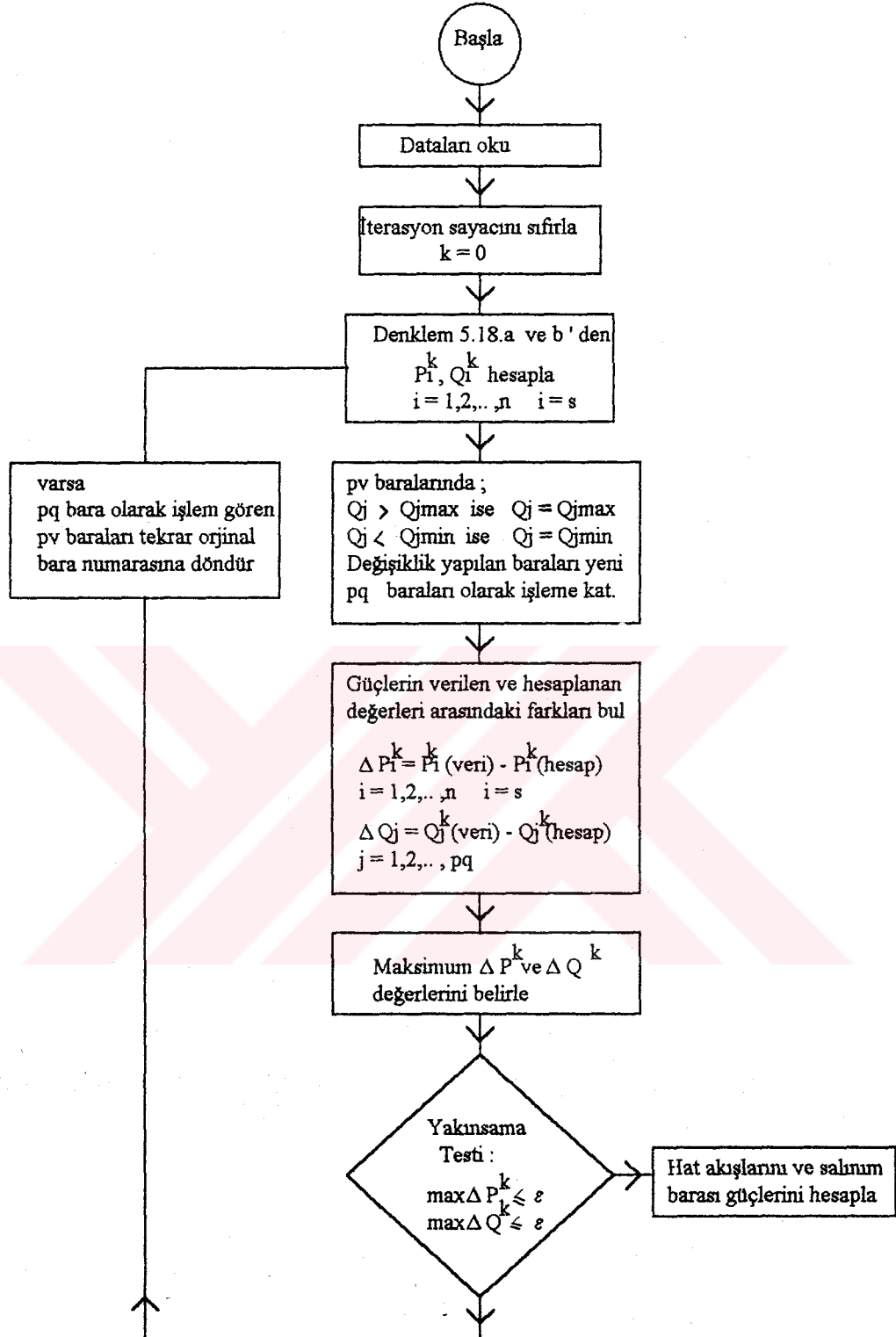
şeklinde dir. (5.16.a) ve (5.16.b) denklemlerinin çözülmesi ile, (k). adımın sonunda, elde edilen $\Delta \delta$ ve $\Delta |V|$ değerleri, δ ve $|V|$ 'ya katılırlar :

$$\delta_p^{(k+1)} = \delta_p^{(k)} + \Delta \delta_p^{(k)} \quad , \quad p = P-Q \text{ ve } P-V \text{ baralar (salınım hariç)} \quad (5.18.a)$$

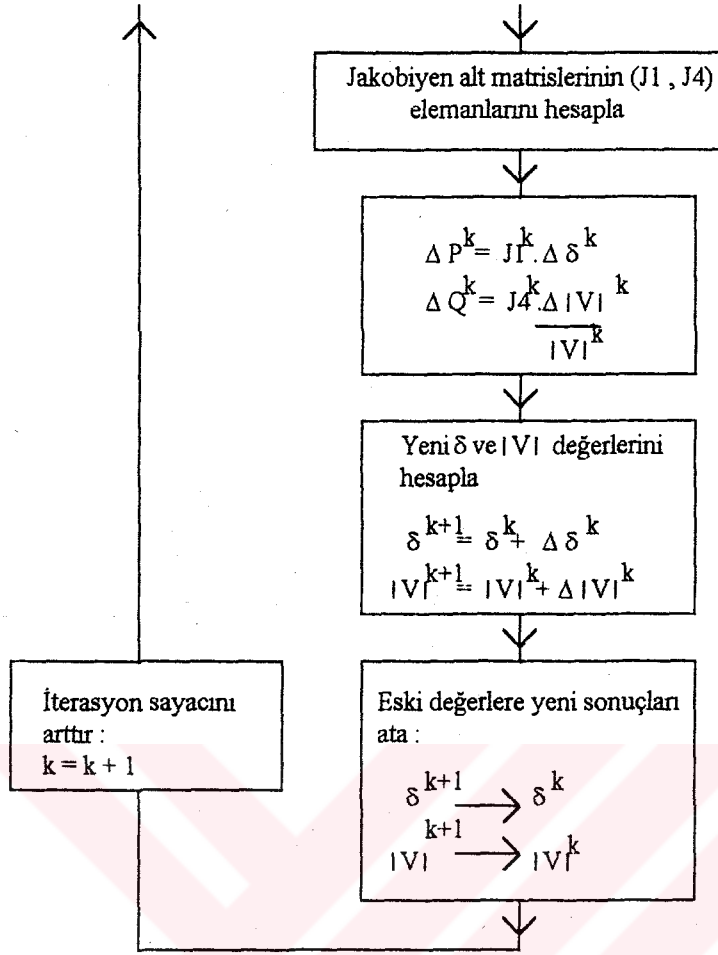
$$|V_q|^{(k+1)} = |V_q|^{(k)} + \Delta |V_q|^{(k)} \quad , \quad q = P-Q \text{ baralar} \quad (5.18.b)$$

$\delta_p^{(k+1)}$, $|V_q|^{(k+1)}$ değerlerinin yerine konmasıyla hesaplanan $\Delta P^{(k+1)}$ ve $\Delta Q^{(k+1)}$ değerleri yakınsama kriteri (ε) ' dan küçükse iterasyon durdurulur ve hat akışları hesaplanır, aksi halde ($k+1$). adımdan iterasyona devam edilir.

Metodun uygulanmasıyla ilgili akış şeması şekil 5.1 ' de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Ayırık yük akışına ilişkin akış şeması



Şekil 5.1 'in devamı

Ayrık yöntemin yakınsaması, Newton yöntemlerinin yakınsaması gibi güvenilir bir tarzda gerçekleşir. Ayrık yöntemin avantajları; öncelikle M ve N matrislerinden kurtulmakla doğal olarak bilgisayar hesaplamalarında hafızadan ve işlem sayısından (dolayısı ile işlem süresinden) kazanç sağlar. Newton metodlarında ise, hafızadan kazanç sağlamak için, Jakobiyen matrisin seyrekliğini kullanan seyrek-matris tekniklerinden yararlanılmaktadır.

Ayrık yöntemin en önemli ayrıcalığı ise aşırı yüklü sistemlerin incelenmesinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle, gerilim kararlılığı açısından incelenen sistemlerde, sistem yüklenmesi sürekli artırılarak maksimum yüklenme sınırlarında çalışmakta ve P-V eğrilerinden görüleceği üzere, kritik nokta civarındaki eğim büyük olmaktadır.

Bu nedenle, daha fazla türev içeren Newton yöntemlerinin bu nokta civarında nümerik kararlılığını koruyamayarak gerilimler açısından karasız bölge olan alt bölgedeki (küçük gerilim - büyük akım bölgesi) değerlere yakınsaması olasılığı vardır. Bunu önlemek için, Newton metodlarının kararlılığını arttırıcı tekniklerin uygulanması gerekecektir.

Bu açıdan, Ayrık yük akışı yönteminin kritik çalışma bölgesinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceği, yapılan çalışmalaradan elde edilen sonuçlarla gösterilmiştir.

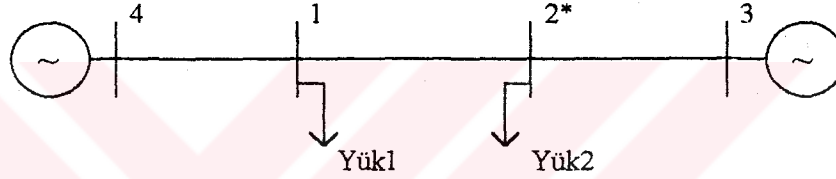


5.2. Geliştirilen Yöntemin İncelenmesi

Çalışmada kullanılan yöntem incelenirken, uygulama kolaylığı açısından, N baralı bir sistemi minimum düzeyde temsil eden dört baralı örnek bir sistem gözönüne alınarak, yöntemin adımları açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu sisteme ilişkin datalar aşağıda verilmiştir.

5.2.1. 4 baralı Örnek Sistem

Tek hat şeması aşağıda verilen örnek sistem 4 baralı bir olup, 1. ve 2. baralar yük barası (P-Q Bara), 3. bara üretim barası (P-V Bara) ve 4. bara da salınım barası olarak ele alınacaktır. Gerilim kararlılığı açısından '2. bara' incelenecektir.



Şekil 5.2. Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması

Tablo 5.3. 4 baralı örnek sisteme ilişkin hat dataları

Hat No:	Baradan-Baraya p - q	Hat Empedansı Z_{pq} $R + jX$	Hat Admitansı Y_{pq}	Hattın Şönt Admitansı y_{pq} $G + jB$
1	1 2	$0.02 + j 0.10$	$1.923 - 9.615$	$0 + j 0.020$
2	1 4	$0.02 + j 0.10$	$1.923 - 9.615$	$0 + j 0.020$
3	2 3	$0.02 + j 0.10$	$1.923 - 9.615$	$0 + j 0.020$

Tablo 5.4. 4 baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük dataları

Bara No	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilimin Genliği	Reaktif Limitleri	Güç
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	V	Qmin	Qmax
1	P-Q			10	5.8			
2	P-Q			10	5.8			
3	P-Q	20				1.0	-10	10
4	P-Q					1.0		

5.2.2. 4 Baralı Örnek Sisteme Ait Yük Akışı

Yük akışı, tümleşik yapı içindeki ana programda uygulanacak yöntemle gerekli dataları sağlamak ve gerçek değerlerle uygulanan yöntemle hesaplanan değerleri karşılaştırmak amacına yöneliktir. Tek başına uygulandığında, kritik değerleri belirlemek için, sonlu adım artırımlarıyla kritik noktaya kadar yükü artırarak işlemlerin sürdürülmesi gerekecektir. Örnek sistemde 2. bara için kritik noktada bulunan yük akışı sonuçları aşağıda verilmiştir :

Bara No	Bara Güçleri		Bara Gerilimleri	
	P (MW)	Q(MVAr)	V (pu)	δ (derece)
1	-10.008	-5.791	0.7840	-8.671
2*	-142.994	-82.949	0.6025	-21.995
3	20.004	10.000	0.6255	-19.281
4	156.909	191.577	1.0000	0.000

Burada ilginç bir nokta olarak, daha önce söz edilen ve klasik Newton metodlarının kritik nokta civarında nümerik karasızlığa giderek alt gerilim bölgelerine yakınsamasına ilişkin bir örnek gösterilecektir. 2. bara için kritik nokta 143 MW olarak saptandığına göre buna yakın rastgele seçilen 120 MW güce göre klasik Newton ve Ayrık yöntemlerle yapılan yük akışı sonuçları arasındaki fark açıkça görülmektedir :

Bara No	Bara Güçleri		Bara Gerilimleri		
	P (MW)	Q(MVAr)	V (pu)	δ (derece)	
1	-9.998	-5.795	0.8728	-6.461	Ayrık yöntem
2	-120.005	-69.608	0.7643	-14.108	
3	20.005	9.890	0.7832	-12.406	
4	119.959	106.705	1.0000	0.000	
1	-10.004	-5.788	0.6397	-8.755	Newton yöntemi
2	-120.001	-69.605	0.3307	-33.394	
3	20.006	9.895	0.3658	-24.850	
4	164.349	332.909	1.0000	0.000	

5.2.3. Uygulanan Yöntem : N Baralı Sistemin İki Baralı Sisteme İndirgenerek İncelenmesi

5.2.3.1. Problemin Formülasyonu

3. bölümde Radyal bir hatla (veya hatlarla) birbirine bağlı 2 - baralı sistemde yük akışı analizi yapılırken kullanılan (2x2) ' lik jakobiyen matrisin, tekil (singüler) olması ($\det[J] = 0$) durumunun hareketle, 2 - baralı sistem için gerilim kararlılığı açısından kritik yük açısı, kritik gerilim ve kritik güç ifadeleri elde edilmişti. Bu bölümde de N baralı sistem, 2 baralı sisteme dönüştürülerek analiz yapılacağı için, aynı formüllerin kullanılması söz konusudur. Bu nedenle kullanılan temel ifadeler aşağıda tekrar yazılmıştır :

V_s : gönderici uç gerilimi ,

φ : yük Açısı,

$A = a_1 + j a_2$ ve

$B = b_1 + j b_2$: hat sabitleri olmak üzere;

$$K_1 = a_1 \cdot (b_2 - b_1 \cdot \tan \varphi) + a_2 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan \varphi)$$

$$K_2 = a_1 \cdot (b_1 + b_2 \cdot \tan \varphi) + a_2 \cdot (-b_2 + b_1 \cdot \tan \varphi)$$

ifadeleri kullanılarak kritik yük açısı (δ_{crit}) ;

$$\delta_{crit} = (\pi / 4) + (1/2) \cdot \left[\tan^{-1} \cdot (K_2 / -K_1) \right]$$

ve

$$K_3 = b_1 \cdot \cos(\delta_{crit}) + b_2 \cdot \sin(\delta_{crit})$$

$$K_4 = a_1 \cdot \cos(\delta_{crit}) + a_2 \cdot \sin(\delta_{crit})$$

ifadeleri kullanılarak kritik hat sonu gerilimi (V_{rcrit}) ;

$$V_{rcrit} = V_s / (2 \cdot K_4)$$

ile

$$P_{Rcrit} = V_s^2 \cdot \left[2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2) \right] / \left[4 \cdot K_4^2 \cdot (b_1^2 + b_2^2) \right]$$

ifadeleri elde edilir.

5.2.3.2. Genel Akış Şeması

1.Adım : Sistemin mevcut işletme durumu için yük akışı analizi yapılarak, sistem baralarına ilişkin gerilim ve güç profili çıkarılır (herbir baranın gerilim ve güçleri belirlenir) .

2.Adım : Gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen bara ve salınım barası dışındaki tüm baralardaki aktif ve reaktif güçler, yük akışıyla belirlenmiş bara gerilimleri yardımıyla şönt admitanslara dönüştürülürler.

3.Adım : Elde edilen şönt elemanlar akım yönleri gözönüne alınarak (uygun yön işaretleriyle) bara admitans matrisine katılır [64]. Bu işlem gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen (i.) bara ile salınım (n.) barası için yapılmaz.

4.Adım : Elde edilen yeni bara admitans matrisinde, gerilim kararlılığı açısından incelenen bara elemanları 1. satır ve sütunda , salınım barasına karşılık gelen elemanlar da 2. satır ve sütunda olacak şekilde satır ve sütun işlemleri yapılır.

5. Adım : Matris indirgeme işlemleri uygulanarak, 4. adımda elde edilen bara admitans matrisi , (2×2) ' lik yeni bir matrise indirgenir. Bu durum, tüm sistemin iki bara arasında indirgenmesine karşılık gelir.

6.Adım : İki baralı sistem için, yük akışındaki Jakobiyenin tekilliğinden hareketle elde edilen, kritik yük açısı, kritik gerilim ve kritik güç ifadeleri yardımıyla ilgili baranın kritik değerleri hesaplanır. Hesaplanan kritik değerler, sistemde öngörülen değerlerle karşılaşıyorsa işlemlere devam edilir.

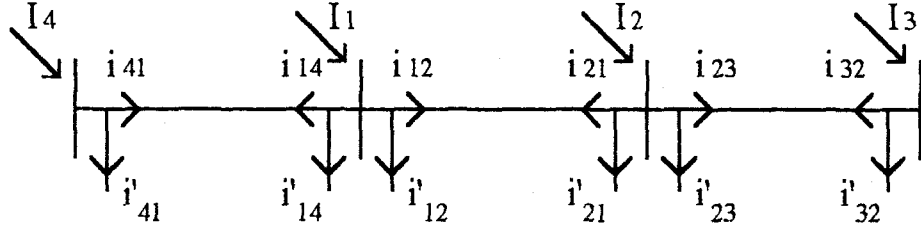
7.Adım : İncelenen baranın yükü artırılarak tekrar yük akışı yapılır, ıraksama olursa işlemler durdurulur, aksi halde 2.adıma dönülür.

5.2.3.3. Yöntemin 4 baralı Örnek Sisteme Uygulanarak Açıklanması

Yöntemin Adımları

1.Adım : Yük akışı

Analizlerde kullanılacak olan bara admitans matrisi Y_{bara} 'nın elde edilmesini sisteme enjekte edilen akım yönlerini de göz önüne alarak incelenebilir :



Şekil 5.3. Sisteme gönderilen bara akımları ve hat akımları

I_1, I_2 : Yük akımları (gerçek akım (i_1, i_2) yönleri referansa ters $i_1 = -I_1, i_2 = -I_2$),

I_3, I_4 : Generator akımları,

$i_{14}, i_{12}, i_{21}, i_{23}, i_{32}, i_{41}$: hat akımları

$i'_{14}, i'_{12}, i'_{21}, i'_{23}, i'_{32}, i'_{41}$: şönt admitans akımları

Yukarıdaki şekille birlikte hattın şönt admitanslarını da gözönüne alarak akımlar için şu ifadeler yazılabilir :

$$I_1 = i_{14} + i_{12} + i'_{14} + i'_{12}$$

$$I_2 = i_{12} + i_{23} + i'_{21} + i'_{23}$$

$$I_3 = i_{32} + i'_{32}$$

$$I_4 = i_{41} + i'_{41}$$

$$I_1 = y_{12}(V_1 - V_2) + y_{14}(V_1 - V_4) + y'_{12/2}(V_1) + y'_{14/2}(V_1)$$

$$I_2 = y_{21}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) + y'_{21/2}(V_2) + y'_{23/2}(V_2)$$

$$I_3 = y_{32}(V_3 - V_2) + y'_{32/2}(V_3)$$

$$I_4 = y_{41}(V_4 - V_1) + y'_{41/2}(V_4)$$

Gerilimlere göre düzenleme yapılırsa

$$I_1 = (y_{12} + y_{14} + y'_{12/2} + y'_{14/2}) \cdot V_1 - y_{12} \cdot V_2 - y_{14} \cdot V_4$$

$$I_2 = -y_{12} \cdot V_1 + (y_{12} + y_{23} + y'_{12/2} + y'_{23/2}) \cdot V_2 - y_{23} \cdot V_3$$

$$I_3 = -y_{23} \cdot V_2 + (y_{23} + y'_{23/2}) V_3$$

$$I_4 = -y_{14} V_2 + (y_{14} + y'_{14/2}) V_3$$

Orjinal denklemler

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Matris elemanları

$$\begin{aligned} Y_{11} &= y_{12} + y_{14} + y'_{12/2} + y'_{14/2} , & Y_{12} &= -y_{12} , & Y_{13} &= 0 , & Y_{14} &= -y_{14} \\ Y_{22} &= y_{12} + y_{23} + y'_{12/2} + y'_{23/2} , & Y_{21} &= -y_{21} , & Y_{23} &= -y_{23} , & Y_{24} &= 0 \\ Y_{33} &= y_{23} + y'_{23/2} , & Y_{31} &= 0 , & Y_{32} &= -y_{32} , & Y_{34} &= 0 \\ Y_{44} &= y_{14} + y'_{14/2} , & Y_{41} &= -y_{41} , & Y_{42} &= 0 , & Y_{43} &= 0 \end{aligned}$$

Gerçek yönler de göz önüne alınarak denklemlerin yansıttığı durum görülebilir.

$$\begin{bmatrix} -i_1 \\ -i_2 \\ +i_3 \\ +i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +y_{11} & -y_{12} & 0 & -y_{14} \\ -y_{21} & +y_{22} & -y_{23} & 0 \\ 0 & -y_{32} & +y_{33} & 0 \\ -y_{41} & 0 & 0 & +y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Ele alınan örnek sistemin orjinal yüklenme durumu için yük akışı yaparak yöntem uygulamaya başlanacaktır. Bu arada elde edilen orjinal bara admitans matrisinin sayısal değeri şu şekildedir :

Orjinal Bara admitans matrisi : YBARA (4x4)

$$\begin{vmatrix} 3.846 - j 19.191 & -1.923 + j 9.615 & 0.000 + j 0.000 & -1.923 + j 9.615 \\ -1.923 + j 9.615 & 3.846 - j 19.191 & -1.923 + j 9.615 & 0.000 + j 0.000 \\ 0.00 + j 0.000 & -1.923 + j 9.615 & 1.923 - j 9.595 & 0.000 + j 0.000 \\ -1.923 + j 9.615 & 0.000 + j 0.000 & 0.000 + j 0.000 & 1.923 - j 9.595 \end{vmatrix}$$

Bara admitans matrisi ve örnek sistemin diğer dataları kullanılarak yük akışı yapılmış, her bir baradaki gerilimler ve güçler belirli bir tolerans dahilinde ($\varepsilon = 0.0001$) hesaplanmıştır. Yük akışında Newton metodlarından Ayrık yöntem kullanılmıştır. Bu aşamada elde edilen yük akışı sonuçları şöyledir :

Bara No	Bara Güçleri		Bara Gerilimleri	
	P(MW)	Q(MVAr)	V (pu)	δ (derece)
1	(-10.000,	-5.797)	(0.9960,	0.039)
2	(-10.001,	-5.796)	(0.9960,	0.635)
3	(20.001,	-1.769)	(1.0000,	1.783)
4	(0.104,	1.944)	(1.0000,	0.000)

2.Adım :

Sistemde ilgilenilen (2.) bara ile salınım (4.) barası dışındaki 1. ve 3. baralardaki aktif ve reaktif güçler, bara gerilimleri kullanılarak şönt admitanslara dönüştürülürler.

$$z_i = \frac{V_i}{I_i} \cdot e^{j\varphi} = \frac{V_i^2}{V_i \cdot I_i} \cdot e^{j\varphi} = \frac{V_i^2}{S_i} \cdot e^{j\varphi}$$

örnek sistem için $i = 1$ ve 3

burada yük açısı

$$\varphi = \tan^{-1}(Q_i / P_i)$$

olarak belirlenmektedir. Buna göre örnek sistem için elde edilen değerler şöyledir :

$$\begin{aligned} z_1 &= 7.425 + j 4.304 & y_1 &= 0.101 - j 0.0584 \\ z_3 &= 4.961 - j 0.439 & y_3 &= 0.200 + j 0.0177 \end{aligned}$$

3.Adım.:

2. adımda elde edilen şönt elemanlar, akım yönleri de gözönüne alınarak orjinal bara admitans matrisine katılırlar.

Birinci baradaki yük akımı için,

$$I_1 = y_{11} \cdot V_1 - y_{12} \cdot V_2 - y_{14} \cdot V_4$$

yükün akım enjeksiyonu ($i_1 = y_1 \cdot V_1$) yönlü olarak ($i_1 = -I_1$) yerine konulursa ;

$$-y_1 \cdot V_1 = y_{11} \cdot V_1 - y_{12} \cdot V_2 - y_{14} \cdot V_4$$

$$0 = (y_{11} + y_1) \cdot V_1 - y_{12} \cdot V_2 - y_{14} \cdot V_4$$

Üçüncü baradaki generatör akımı için ise,

$$I_3 = -y_{23} V_2 + (y_{23} + y'_{23/2}) V_3$$

generatörün akım enjeksiyonu ($i_3 = y_3 \cdot V_3$) yönlü olarak ($i_3 = +I_3$) yerine konulursa ;

$$+ y_3 \cdot V_3 = -y_{23} V_2 + (y_{23} + y'_{23/2}) V_3$$

$$0 = -y_{23} V_2 + (y_{23} + y'_{23/2} - y_3) V_3$$

böylece yük akışı sonucunda belirlenen bara güçleri, 2. ve 4. bara hariç yönlü pasif elemanlar olarak orjinal bara admitans matrisine katılırlar. Özetle bu durum yeni bara admitans matrisinde 1. ve 3. köşegen elemanlara (Y'_{11} , Y'_{33}) şu şekilde yansıtılır :

$$(Y'_{11})' = Y_{11} + y_1$$

$$(Y'_{33})' = Y_{33} - y_3$$

Örnek sisteme ilişkin yeni bara admitans matrisinin nümerik değerleri şöyledir:

Yeni Bara Admitans Matrisi

3.947 - j19.249	-1.923 + j 9.615	0.000 + j 0.000	-1.923 + j 9.615
-1.923 + j 9.615	3.846 - j 19.191	-1.923 + j 9.615	0.000 + j 0.000
0.000 + j 0.000	-1.923 + j 9.615	1.723 - j 9.613	0.000 + j 0.000
-1.923 + j 9.615	0.000 + j 0.000	0.000 + j 0.000	1.923 - j 9.595

4. Adım :

Elde edilen yeni bara admitans matrisinde, gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen bara (2. bara), 1. barayla ve salınım barası (4. bara) da 2. barayla yer değiştirecek şekilde satır ve sütun işlemleri yapılır. İşlemler örnek sisteme uygulanırsa :

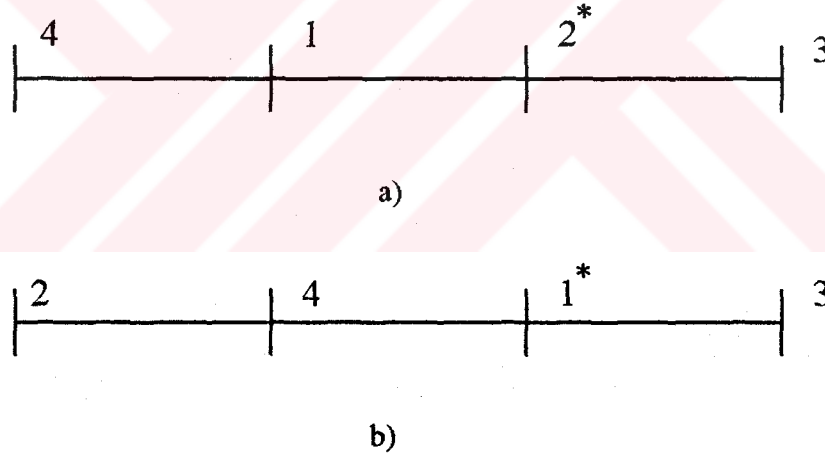
1. İŞLEM : (2.) SATIR $\longleftrightarrow$ (1.) SATIR yer değiştir ;
2. İŞLEM : (2.) SÜTUN $\longleftrightarrow$ (1.) SÜTUN yer değiştir ;
3. İŞLEM : (4.) SATIR $\longleftrightarrow$ (1.) SATIR yer değiştir ;
4. İŞLEM : (4.) SÜTUN $\longleftrightarrow$ (1.) SÜTUN yer değiştir ;

Ybara' nın orjinalinde köşegen elemanlar 1 - 2 - 3 - 4 olarak dizili iken, 2. işlemin sonunda 2 - 1 - 3 - 4 ve 4. işlemin sonucunda ise 2 - 4 - 3 - 1 olarak sıralanmıştır. Dolayısı ile 2. bara 1. köşegende ve 4. barada 2. köşegende gözükecek şekilde bara admitans matrisi düzenlenmiş olur. Örnek sistem için yeni matris :

$$\begin{bmatrix} 3.846 - j 19.190 & 0.000 + j 0.000 & -1.923 + j 9.615 & -1.923 + j 9.615 \\ 0.000 + j 0.000 & 1.923 - j 9.595 & 0.000 + j 0.000 & -1.923 + j 9.615 \\ -1.923 + j 9.615 & 0.000 + j 0.000 & 1.723 - j 9.613 & 0.000 + j 0.000 \\ -1.923 + j 9.615 & -1.923 + j 9.615 & 0.000 + j 0.000 & 3.946 - j 19.249 \end{bmatrix}$$

olarak belirlenir.

Aşağıdaki şekilde 4 baralı sistemin baralarının numaralandırılması eski ve yeni haliyle tekrar gösterilmiştir.



Şekil 5.4. 4 baralı sistem baralarının a) orjinal bara numaraları, b) değiştirilmiş durumu yansıtan bara numaraları.

5.Adım :

Elde edilen son bara admitans matrisi, 1. ve 2. elemanların (baraların) dışındaki elemanları elimine edilecek şekilde parçalanır. 4. adım sonunda elde edilen Ybara ' yı şekil 5.4. b ' ye göre tekrar gözönüne alarak ;

$$[Y_{\text{BARA}}] = \begin{bmatrix} +y_{11} & 0 & -y_{13} & -y_{14} \\ 0 & y_{22} & 0 & -y_{24} \\ -y_{31} & 0 & y_{33} & 0 \\ -y_{41} & -y_{42} & 0 & y_{44} \end{bmatrix}$$

Genel halde matris,

$$A = 2 \times 2, \quad B = 2 \times (n-2), \quad C = (n-2) \times 2, \quad D = (n-2) \times (n-2)$$

olacak şekilde parçalanır. İncelenen 4 baralı sistem için ($n = 4$) olduğundan, A, B, C, D alt matrisleri 2×2 boyutundadırlar

$$[A]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} +y_{11} & 0 \\ 0 & +y_{22} \end{bmatrix} \quad [B]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -y_{13} & 0 \\ 0 & -y_{24} \end{bmatrix}$$

$$[C]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -y_{31} & 0 \\ -y_{41} & -y_{42} \end{bmatrix} \quad [D]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} +y_{33} & 0 \\ 0 & +y_{44} \end{bmatrix}$$

Bilinen matris indirgeme yöntemi uygulanarak bara admitans matrisi, (2×2) ' lik yeni bir matrise indirgenmiş olur.

$$[Y_{\text{BARA}}]_{2 \times 2} = [A] - [B] \cdot [D]^{-1} \cdot [C]$$

İncelenen örnek sistem için yeni matrisin sayısal değeri :

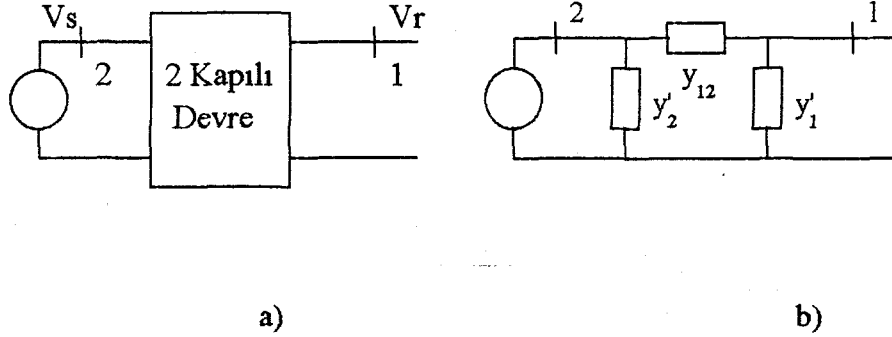
$$\begin{vmatrix} 0.7858 - j 4.7741 & -0.9364 + j 4.8029 \\ -0.9364 + j 4.8029 & 0.9866 - j 4.7924 \end{vmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir.

6. Adım

Sistem, 5. adımın sonunda, gönderici ve alıcı uçlardan oluşmuş iki baralı bir sisteme dönüştürülmüştür. Böylece elde edilen iki kapılı devre, bara admitans matrisinin nominal pi (π) devresinden türetilmiş bağlantı matrisi olduğu varsayılarak

çözülecektir. Başka bir deyişle elde edilen (2×2) 'lık bara admitans matrisi, π devresiyle birbirine bağlı 2 baralı bir sistemi yansıtmaktadır ve orjinal sistemin yükler nedeniyle simetrisi bozulduğundan elde edilen iki baralı sistemin şönt elemanları da birbirinden farklı olacaktır.



Şekil 5.5. İndirgenmiş iki baralı sistemde, a) bara admitans matrisi bilinen 2 kapılı devre , b) bu devrenin çözümünde kullanılacak olan pi devresi

Sistemin kritik değerlerinin hesaplanmasında kullanılacak olan A, B, C, D sabitlerini yukarıdaki şekilde verilen devreler yardımıyla şöyle belirleyebiliriz :

$$[Y_{\text{BARA}}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{12} + y_1' & -y_{12} \\ -y_{21} & y_{12} + y_2' \end{bmatrix}$$

buradan,

$$y_{12} = -Y_{12} \quad , \quad z_{12} = 1 / y_{12}$$

$$y_1' = Y_{11} + Y_{12}$$

$$y_2' = Y_{22} + Y_{21}$$

Şekil 5.5 b)' ye göre A , B , C , D sabitlerinin genel ifadeleri;

$$A = 1 + z_{12} \cdot y_1'$$

$$B = z_{12}$$

$$C = y_1' + y_2' \cdot (1 + z_{12} \cdot y_1')$$

$$D = 1 + z_{12} \cdot y_2'$$

Yapılan hesaplamalar sonucu, örnek sistem için kritik değerlerin belirlenmesinde kullanılacak olan A ve B sabitlerinin sayısal değerleri şöyledir :

$$A = 0.98830 - j 0.02907$$

$$B = 0.00391 + j 0.20058$$

Elde edilen bu değerler kullanılarak, kritik yük açısı, gerilim ve güç ifadeleri yardımıyla, 2. bara için kritik değerler şöyle hesaplanmıştır.

$$\text{Kritik yük açısı , } \delta_{2\text{crt}} = 23^\circ.595 \quad ;$$

$$\text{Kritik gerilim , } V_{2\text{crt}} = 0.5592 \text{ pu} \quad ;$$

$$\text{Kritik Güç , } P_{2\text{crt}} = 130.92 \text{ MW} \quad .$$

7. adım :

Elde edilen değerler gerçek kritik değerler değildir, ilgilenilen baranın yükü artırılarak tekrar yük akışı yapılır ve 1.adıma dönülür, Yük akışında ıraksama oluncaya kadar bu işlem sürdürülür. Sonuçta, 2. bara için elde edilen kritik değerler şöyledir :

$$\text{Kritik yük açısı , } \delta_{2\text{crt}} = 21^\circ.96 \text{ derece} \quad ;$$

$$\text{Kritik gerilim , } V_{2\text{crt}} = 0.603 \text{ pu} \quad ;$$

$$\text{Kritik Güç , } P_{2\text{crt}} = 143 \text{ MW} \quad .$$

Aynı yöntemle 4 baralı sistemin diğer yük barası (1. bara) için de, kritik değerler şöyle belirlenmiştir:

$$\text{Kritik yük açısı , } \delta_{2\text{crt}} = 23^\circ.08 \text{ derece} \quad ;$$

$$\text{Kritik gerilim , } V_{2\text{crt}} = 0.575 \text{ pu} \quad ;$$

$$\text{Kritik Güç , } P_{2\text{crt}} = 267 \text{ MW} \quad .$$

Bu değerler, hesaplanan kritik değerler olarak tutulup, yük akışıyla bulunan gerçek değerlere oranlandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

Tablo 5.5. Kritik bara yüklerinin farklı yüzdelerinde hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları

P_i / P_{icrt}	$P_{icrt(hes)} / P_{icrt}$		$V_{icrt(hes)} / V_{icrt}$		$\delta_{icrt(hes)} / \delta_{icrt}$	
	1.Bara	2.Bara	1.Bara	2.Bara	1.Bara	2.Bara
0.25	0.985	0.937	0.891	0.952	1.170	1.075
0.50	0.988	0.942	0.894	0.955	1.166	1.069
0.75	0.994	0.954	0.897	0.965	1.159	1.055
1.00	1.012	1.001	0.910	1.002	1.134	0.998

Burada, $i = 1, 2$ olmak üzere;

- P_i / P_{icrt} : i. baradaki yükün kritik yüke oranı,
 $P_{icrt(hes)} / P_{icrt}$: i.bara için hesaplanan kritik gücün gerçek kritik güce oranı
 $V_{icrt(hes)} / V_{icrt}$: i.bara için hesaplanan kritik gerilimin gerçek kritik gerilime oranı
 $\delta_{icrt(hes)} / \delta_{icrt}$: i.bara için hesaplanan kritik yük açısının gerçek kritik yük açısına oranını göstermektedir.

Belirlenmesi gereken ilginç nokta, generatörlerin reaktif güç sınırlamaları ile ilgilidir. Bu sınırlamanın yapılmaması durumunda hesaplanan kritik değerleri gerçek değerlerin belirli yüzdeleri olarak hesaplanırsa;

Tablo 5.6. Generatörlerin reaktif güç limitlerinin hesaba katılmaması durumunda Tablo 5.5 ilişkin yeni durum

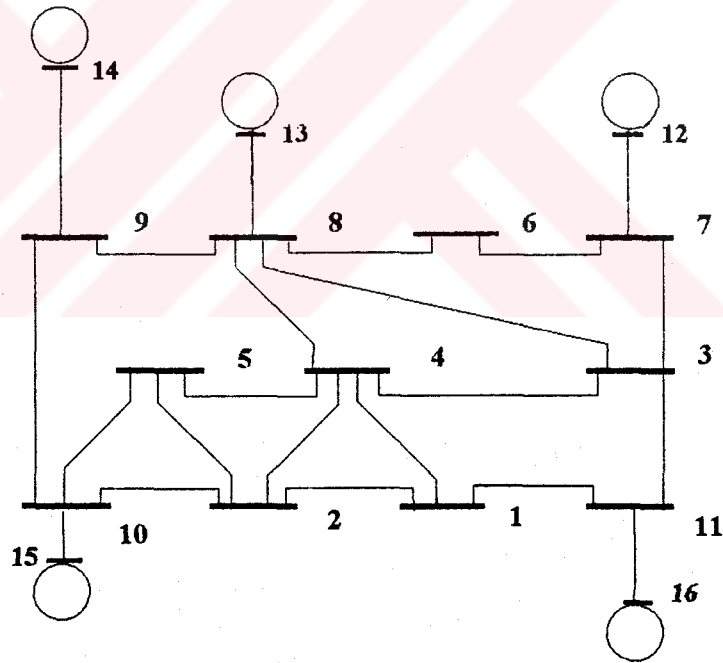
P_i / P_{icrt}	$P_{icrt(hes)} / P_{icrt}$		$V_{icrt(hes)} / V_{icrt}$		$\delta_{icrt(hes)} / \delta_{icrt}$	
	1.Bara	2.Bara	1.Bara	2.Bara	1.Bara	2.Bara
0.25	0.816	0.578	0.812	0.786	0.943	0.564
0.50	0.842	0.638	0.839	0.872	0.948	0.601
0.75	0.886	0.758	0.884	1.045	0.958	0.631
1.00	1.000	1.285*	1.006	1.85*	0.994	0.817*

sonuçları elde edilir ki buradan, sonsuz güçlü bir reaktif güç kaynağına yakın olan 1. bara için bulunan değerler % 100 ' e yakın doğruluk göstermekte iken, bu kaynağa elektriksel olarak uzak olan 2. barada ise, hesaplanan kritik değerlerin yük akışıyla belirlenen gerçek değerlerden oldukça farklı sonuçlar (*) verdiği görülmektedir.

5.3. İncelenen Sistemler

5.3.1. 11 Baralı sistem

Orjinali, 5' i generatör olmak üzere, 11 baralı, 17 elemanlı sistem [84] modifiye edilerek, generatörlerin, orjinal sistemde direkt bağlı olduğu baralara (7, 8, 9, 10,11) , çeşitli uzunlukta hatlar ilave edilerek (7-12, 8-13, 9-14, 10-15, 11-16) generatörler bu yeni baralara (12, 13, 14, 15, 16) bağlanmıştır. Böylece, 5 generatörlü, ancak 16 baralı ve 22 elemanlı yeni bir sistem elde edilmiştir. Bu sistemin özellikle 7, 8, 9, 10 ve 11 numaralı bağlantı baraları ile ilgilenilmiştir.



Şekil 5.6. Değiştirilmiş 11 baralı sistem

İletim hatlarına, generatörlere ve yüklerle ait veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Değiştirilmiş 11 baralı sisteme ilişkin hat verileri

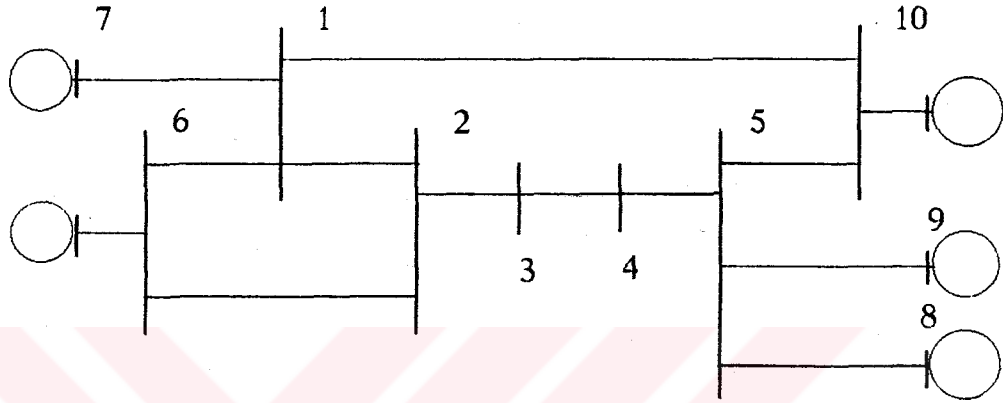
Hat No:	Baradan-Baraya p-q	Hat Empedansı Z_{pq} (R,X)	Hattın Şönt Admitansı y_{pq} (G,B)
1	1 2	(0.12, 0.36)	(0., 0.025)
2	1 4	(0.10, 0.28)	(0., 0.020)
3	1 11	(0.05, 0.16)	(0., 0.010)
4	2 4	(0.08, 0.24)	(0., 0.015)
5	2 5	(0.08, 0.24)	(0., 0.015)
6	2 10	(0.05, 0.16)	(0., 0.010)
7	3 4	(0.12, 0.36)	(0., 0.025)
8	3 7	(0.05, 0.16)	(0., 0.010)
9	3 8	(0.15, 0.50)	(0., 0.030)
10	3 11	(0.15, 0.50)	(0., 0.030)
11	4 5	(0.05, 0.16)	(0., 0.010)
12	4 8	(0.10, 0.28)	(0., 0.020)
13	5 10	(0.10, 0.28)	(0., 0.020)
14	6 7	(0.12, 0.36)	(0., 0.025)
15	6 8	(0.10, 0.28)	(0., 0.020)
16	7 12	(0.01, 0.032)	(0., 0.002)
17	8 9	(0.08, 0.24)	(0., 0.015)
18	8 13	(0.01, 0.032)	(0., 0.002)
19	9 10	(0.15, 0.50)	(0., 0.030)
20	9 14	(0.05, 0.16)	(0., 0.010)
21	10 15	(0.005, 0.016)	(0., 0.001)
22	11 16	(0.01, 0.032)	(0., 0.002)

Tablo 5.8. Değiştirilmiş 11 baralı sisteme ilişkin generatör ve yük verileri

Bara No	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilimin Genliği V	Reaktif Limitleri Q_{min}	Güç Q_{max}
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)			
1	P-Q			25	5			
2	P-Q			25	5			
3	P-Q			70	35			
4	P-Q			90	45			
5	P-Q			40	10			
6	P-Q			10	2			
7	P-Q			1	0.58			
8	P-Q			1	0.58			
9	P-Q			1	0.58			
10	P-Q			1	0.58			
11	P-Q			1	0.58			
12	P-V	25				1.05	-10	20
13	P-V	100				1.05	-40	50
14	P-V	50				1.05	-20	40
15	P-V	50				1.05	-20	30
16	Salınım					1.05		

5.3.2. İndirgenmiş Kuzey Batı Anadolu (KBA) Sistemi

Ülkemizde, enerji talebinin en yoğun olduğu bölge olan Marmara ve Trakya bölgelerini içine alan ve ulusal şebekenin önemli dağıtım bölümlerinden olan KBA şebekesi TEK' den alınan verilere [85] dayanarak kısmen indirgenmiş ve bu sistemi temsil eden, 5 ' i generatör olmak üzere 10 baralı ve 11 elemanlı bir sistem elde edilmiştir.



PQ (Yük) Baraları :

1: İkitelli, 2: Alibeyköy, 3: Ümraniye, 4: Gebze, 5: Adapazarı,

PV (Üretim) Baraları

6: Hamitabad, 7: Ambarlı, 8: Gökçekaya, 9: Çayırhan, 10: Osmanca (salınım)

Şekil 5.7. İndirgenmiş Kuzey Batı Anadolu (KBA) sistemi

Tablo 5.9. İndirgenmiş KBA sistemine ilişkin hat verileri

Hat No:	Baradan-Baraya p-q	Hat Empedansı Z_{pq} (R, X)	Hattın Şönt Admitansı ypq' (G, B)
1	1 2	(0.000180, 0.002142)	(0., 131028)
2	1 6	(0.003540, 0.032713)	(0., 363255)
3	1 7	(0.000550, 0.005089)	(0., 058193)
4	1 10	(0.003670, 0.042188)	(0., 692991)
5	2 3	(0.000310, 0.003692)	(0., 225897)
6	2 6	(0.002405, 0.027634)	(0., 453925)
7	3 4	(0.000385, 0.003560)	(0., 157459)
8	4 5	(0.001049, 0.009710)	(0., 429503)
9	5 8	(0.002405, 0.022275)	(0., 246284)
10	5 9	(0.003265, 0.029887)	(0., 338289)
11	5 10	(0.001588, 0.014463)	(0., 168657)

Tablo 5.10. İndirgenmiş KBA sistemine ilişkin hat generatör ve yük verileri

Bara No	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilimin Genliği	Reaktif Limitleri	Güç
		P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)	V	Qmin	Qmax
1	P-Q			391.6	241.5			
2	P-Q			319.4	193.6			
3	P-Q			321.4	190.8			
4	P-Q			356.5	198.2			
5	P-Q			432.1	59.4			
6	P-V	713.0				1.051	-400	600
7	P-V	357.6				1.014	-230	230
8	P-V	161.5				1.036	-100	100
9	P-V	297.5				1.032	-100	200
10	Salınım					1.030		

İncelenen her iki güç sistemi içinde baz güç 100 MVA alınmıştır.

5.3.3. 11 Baralı Sistem İçin İncelenen Durumlar

Burada, 11 baralı sisteme eklenen ve sistemi besleyen iletim hatlarının bağlı olduğu baralardaki çeşitli durumlar incelenmiştir. Öncelikle bu baralara bağlı olan hatların, iki baralı sisteme dayalı olarak ve $\cos\phi = 0.866$ geri koşuluyla ayrı ayrı kritik değerleri belirlenecek olursa ;

7 - 12 , 8 - 13 ve 11 - 16 hatları için,

$$P_{\text{crit}} = 8.189 \text{ pu}, \quad V_{\text{crit}} = 0.563 \text{ pu} \quad \delta_{\text{crit}} = 21.27 \text{ derece}$$

9 - 14 hattı için;

$$P_{\text{crit}} = 1.642 \text{ pu}, \quad V_{\text{crit}} = 0.565 \text{ pu} \quad \delta_{\text{crit}} = 21.29 \text{ derece}$$

10 - 15 hattı için;

$$P_{\text{crit}} = 16.38 \text{ pu}, \quad V_{\text{crit}} = 0.563 \text{ pu} \quad \delta_{\text{crit}} = 21.27 \text{ derece}$$

bulunur. Oysaki bu hatlar belirli güçlerdeki generatörleri sisteme bağlamak için kullanıldığında (7, 8, 9, 10, 11 baraları üzerinden), aynı güç faktörü altında elde edilen kritik değerler yukarıdaki kritik değerlerden oldukça farklılıklar göstermektedir (tablo 5.11). Buna göre, 7., 8. ve 10. baralarında kritik gerilim değeri orjinaline göre artarken, kritik güç değeri oldukça küçülmüştür. Salınım barası seçilen 11. bara için değerler orjinaline en yakın olmaktadır. 9. bara yapısı itibarı ile kritik güç değeri diğer besleme hatlarından daha düşüktür ve indirgeme ile bulunan kritik güç değeri de bu değere yakındır, ancak hesaplanan kritik gerilim değeri orjinal değerden fazladır.

Tablo 5.11. Değiştirilmiş 11 baralı sistemin mevcut yük durumu için kritik değerler

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	23.91	0.684	0.770
	Yük Akışı	25.33	0.672	0.770
8	İndirgeme	20.39	0.842	1.100
	Yük Akışı	20.65	0.836	1.100
9	İndirgeme	14.87	0.986	1.090
	Yük Akışı	23.42	0.775	1.020
10	İndirgeme	25.44	0.732	0.898
	Yük Akışı	23.30	0.796	0.890
11	İndirgeme	22.26	0.556	8.030
	Yük Akışı	13.56	0.770	6.500

Daha sonra ise, besleme hatları sırayla tek hat şeklinde göz önüne alınmasıyla hesaplanan kritik değerler Tablo 5.12.a, b, c, d, e 'de gösterilmiştir. Tablolardan görüleceği gibi bu durum, yük akışı açısından bir problem olması yanında [86], hattın gerek taşıma kapasitesi bakımından, gerekse bağlı olduğu besleme kaynağının kapasitesi açısından, bağlantı baralarında farklı etkilenmelere neden olmaktadır. Bunun en açık örneği, salınım barasını sisteme bağlayan 11-16 hattının tek hat olması etki bakımından, diğer bütün hatların tek hat olmasından daha etkili olmaktadır (Tablo 5.12.d , e).

Benzer bir durumda, kapasitesi daha düşük bir hattın bağlı olduğu baradaki kritik değerler, bu hattın tek hat kalmasından daha fazla, başka bir baraya bağlı ancak daha yüksek kapasiteli bir hattın tek hat kalmasından etkilenmektedirler (7. bara tipik bir örnek olarak, Tablo 5.12.a ile Tablo 5.12.b, c, d nin kıyaslamasından durum açıkça görülmektedir.

Tablo 5.12.a. Besleme hatları tek hat (herbir bara ayrı ayrı tek hatla bağlı ve sadece ilgili baraya ait sonuçlar :)

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	24.90	0.675	0.760
	Yük Akışı	24.70	0.680	0.760
8	İndirgeme	20.15	0.811	1.060
	Yük Akışı	20.00	0.815	1.060
9	İndirgeme	16.81	0.903	0.977
	Yük Akışı	21.13	0.800	0.960
10	İndirgeme	25.44	0.728	0.893
	Yük Akışı	23.35	0.779	0.885
11	İndirgeme	23.21	0.550	3.940
	Yük Akışı	14.41	0.783	3.100

Tablo 5.12.b. 8-13 Besleme hattı tek hat

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	24.97	0.670	0.750
	Yük Akışı	24.52	0.682	0.750
8	İndirgeme	20.15	0.811	1.060
	Yük Akışı	20.00	0.815	1.060
9	İndirgeme	15.65	0.949	1.030
	Yük Akışı	22.40	0.786	0.990
10	İndirgeme	25.37	0.721	0.878
	Yük Akışı	23.21	0.784	0.870
11	İndirgeme	22.26	0.551	7.950
	Yük Akışı	13.74	0.766	6.500

Tablo 5.12.c. 9-14 Besleme Hattı Tek Hat

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	24.47	0.651	0.720
	Yük Akışı	23.67	0.672	0.720
8	İndirgeme	19.80	0.819	1.070
	Yük Akışı	20.31	0.808	1.070
9	İndirgeme	16.81	0.903	0.977
	Yük Akışı	21.13	0.800	0.960
10	İndirgeme	24.99	0.715	0.860
	Yük Akışı	24.09	0.739	0.860
11	İndirgeme	22.26	0.550	7.950
	Yük Akışı	13.75	0.765	6.500

Tablo 5.12.d. 11-16 Besleme Hattı Tek Hat

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	26.52	0.670	0.690
	Yük Akışı	25.48	0.699	0.690
8	İndirgeme	21.91	0.830	0.975
	Yük Akışı	21.72	0.834	0.975
9	İndirgeme	18.49	0.956	0.948
	Yük Akışı	23.43	0.829	0.925
10	İndirgeme	26.90	0.722	0.803
	Yük Akışı	24.10	0.808	0.790
11	İndirgeme	23.21	0.550	3.940
	Yük Akışı	14.41	0.783	3.100

Tablo 5.12.e. 11-16 hariç bütün besleme hatları tek hat

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	24.49	0.637	0.697
	Yük Akışı	24.42	0.637	0.697
8	İndirgeme	20.06	0.779	1.011
	Yük Akışı	18.94	0.803	1.011
9	İndirgeme	17.60	0.869	0.924
	Yük Akışı	19.84	0.816	0.920
10	İndirgeme	25.05	0.690	0.827
	Yük Akışı	22.86	0.749	0.820
11	İndirgeme	22.18	0.551	7.970
	Yük Akışı	12.49	0.794	6.100

Diğer bir durum salınım barasının seçimi ile ilgilidir. Yine yük akışı analizlerinden salınım barasının seçiminin önemi bilinmektedir. Bu seçim, yöntemin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlarla gerçek sonuçlar arasında farklara neden olmaktadır. . Buna göre, Tablo 13.a, b, c, d incelendiğinde, sisteme elektrisel olarak uzak olan 9-14 hattının bağlı olduğu 14. baranın salınım barası seçilmesi durumu en kötü sonuçları vermekte, hesaplanan kritik gerilimler yük akışı ile bulunanlardan fazla çıkmakta buna karşılık ta hesaplanan kritik güçler yük akışıyla bulunan güçlerden düşük değerlerde olmaktadır. Bu durumda, bir sistem de salınım barası seçerken çeşitli alternatif baraların denemesi yararlı gözükmemektedir.

Tablo 5.13.a. Salınım barası 12. bara

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	22.07	0.561	8.110
	Yük Akışı	15.51	0.729	7.250
8	İndirgeme	19.22	0.832	1.400
	Yük Akışı	19.72	0.819	1.400
9	İndirgeme	16.46	0.963	1.140
	Yük Akışı	21.85	0.809	1.110
10	İndirgeme	25.49	0.752	0.842
	Yük Akışı	24.00	0.794	0.840
11	İndirgeme	25.07	0.778	0.874
	Yük Akışı	26.57	0.731	0.870

Tablo 5.13.b. Salınım barası 13. bara

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	30.50	0.543	0.818
	Yük Akışı	28.00	0.608	0.805
8	İndirgeme	22.76	0.538	7.750
	Yük Akışı	12.00	0.809	5.400
9	İndirgeme	19.46	0.703	1.498
	Yük Akışı	22.40	0.633	1.480
10	İndirgeme	30.68	0.577	0.870
	Yük Akışı	26.14	0.707	0.820
11	İndirgeme	31.71	0.638	0.738
	Yük Akışı	29.42	0.699	0.730

Tablo 5.13.c. Salınım barası 14. bara

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	33.82	0.604	0.508
	Yük Akışı	26.00	0.937	0.340
8	İndirgeme	20.02	0.620	0.809
	Yük Akışı	19.22	0.989	0.500
9	İndirgeme	25.40	0.578	1.641
	Yük Akışı	14.39	0.927	0.950
10	İndirgeme	32.55	0.597	0.629
	Yük Akışı	24.76	0.950	0.390
11	İndirgeme	35.49	0.641	0.492
	Yük Akışı	27.83	0.969	0.350

Tablo 5.13.d. Salınım barası 15 bara

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	23.89	0.642	0.740
	Yük Akışı	23.23	0.661	0.740
8	İndirgeme	16.46	0.787	1.430
	Yük Akışı	18.92	0.732	1.420
9	İndirgeme	13.05	0.849	1.510
	Yük Akışı	19.44	0.697	1.450
10	İndirgeme	21.79	0.551	15.97
	Yük Akışı	14.39	0.734	13.86
11	İndirgeme	22.12	0.794	1.020
	Yük Akışı	28.03	0.633	0.965

İncelenen bir başka durum, bağlantı baralarında güç faktörünün iyileştirilmesi ile ilgilidir. Tablo 5.14.a ve b incelenirse, güç faktörü ne kadar fazla barada birim değere ($\cos\phi=1$) yaklaştırılırsa, kritik güç değerlerinin de o oranda arttığı görülmektedir. Ancak ilginç olan bir nokta güç faktörünün kapasitif değerlere geçmesi durumunda, kritik güç değerleri iki baralı sistemdeki gibi büyük oranlarda artmadığı gözlenmiştir.

Tablo 5.14.a. Tüm bağlantı baralarında $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	40.85	0.757	1.140
	Yük Akışı	41.43	0.747	1.140
8	İndirgeme	39.18	0.919	1.620
	Yük Akışı	39.37	0.916	1.620
9	İndirgeme	36.85	1.060	1.530
	Yük Akışı	43.25	0.933	1.500
10	İndirgeme	41.57	0.809	1.320
	Yük Akışı	40.09	0.837	1.320
11	İndirgeme	37.31	0.641	12.30
	Yük Akışı	27.59	0.784	11.25

Tablo 5.14.b. Tek tek bağlantı baralarında $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	40.70	0.751	1.130
	Yük Akışı	40.29	0.759	1.130
8	İndirgeme	39.11	0.915	1.610
	Yük Akışı	38.98	0.917	1.610
9	İndirgeme	36.78	1.050	1.520
	Yük Akışı	42.81	0.934	1.490
10	İndirgeme	41.47	0.805	1.314
	Yük Akışı	39.59	0.839	1.310
11	İndirgeme	37.25	0.641	12.31
	Yük Akışı	26.34	0.800	11.00

Tablo 5.14.c. Tüm bağlantı baralarında $\cos\phi = 0.866$ ileri

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	56.13	0.909	1.510
	Yük Akışı	53.87	0.937	1.510
8	İndirgeme	55.76	0.920	1.820
	Yük Akışı	52.46	0.953	1.810
9	İndirgeme	51.38	0.935	1.430
	Yük Akışı	56.02	0.890	1.420
10	İndirgeme	57.32	0.930	1.670
	Yük Akışı	55.94	0.947	1.670
11	İndirgeme	52.07	0.842	18.10
	Yük Akışı	21.13	1.080	10.00

Tablo 5.14.d. Tek tek bağlantı baralarında $\cos\phi = 0.866$ ileri

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	56.07	0.904	1.500
	Yük Akışı	53.89	0.931	1.500
8	İndirgeme	55.55	0.911	1.800
	Yük Akışı	51.57	0.950	1.790
9	İndirgeme	51.55	0.937	1.430
	Yük Akışı	58.97	0.864	1.400
10	İndirgeme	57.00	0.918	1.654
	Yük Akışı	54.67	0.947	1.650
11	İndirgeme	51.69	0.814	17.54
	Yük Akışı	20.13	1.037	9.600

Tablo 5.15.a ve b ' de sistem yükünün %10 azaltılması veya % 10 arttırılması durumları için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Buna göre sistem yükünde bir azalma olması durumunda kritik gerilimin ve gücün arttığı, tersine sistem yükünde artma olması durumunda da kritik gerilimin ve gücün azaldığı gözlenmektedir.

Tablo 5.15.a. Sistem yükü % 10 azaltılırsa

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	20.82	0.763	0.900
	Yük Akışı	24.62	0.654	0.880
8	İndirgeme	13.77	0.979	1.380
	Yük Akışı	22.00	0.786	1.320
9	İndirgeme	11.97	1.080	1.260
	Yük Akışı	22.28	0.803	1.150
10	İndirgeme	21.69	0.829	1.060
	Yük Akışı	23.35	0.778	1.060
11	İndirgeme	22.04	0.562	8.130
	Yük Akışı	16.44	0.706	7.510

Tablo 5.15.b. Sistem yükü % 10 arttırılırsa

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
7	İndirgeme	28.56	0.606	0.650
	Yük Akışı	24.70	0.710	0.630
8	İndirgeme	24.86	0.734	0.900
	Yük Akışı	19.77	0.849	0.870
9	İndirgeme	21.51	0.839	0.840
	Yük Akışı	21.85	0.831	0.840
10	İndirgeme	28.76	0.647	0.760
	Yük Akışı	22.88	0.816	0.700
11	İndirgeme	22.44	0.548	7.900
	Yük Akışı	11.29	0.827	5.400

Tablo 5.16.a 'da uzun bir hat olan 9-14 hattına şönt kompanzasyon uygulanmasıyla bulunan sonuçlar, 5.16.b ' de ise seri kompanzasyon yapılması durumunda bulunan sonuçlar gösterilmektedir. Kompanzasyonlar, iki baralı sistemde olduğu kadar büyük etki yapamamaktadırlar, şüphesiz bunun nedeni sistemin sınırlı toplam kapasitesidir.

Tablo 5.16.a. Uzun bir hat olan 9 - 14 hattı Şönt (Kd) kompanzasyon uygulanması durumunda elde edilen kritik değerler

Şönt K. Kd	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{crct} (derece)	Kritik Gerilim V_{crct} (pu)	Kritik Güç P_{crct} (pu)
0.25	İndirgeme	16.41	0.962	1.046
	Yük Akışı	22.47	0.809	1.010
0.50	İndirgeme	16.03	0.963	1.052
	Yük Akışı	22.59	0.799	1.010
0.75	İndirgeme	15.60	0.966	1.058
	Yük Akışı	22.73	0.789	1.010
0.95	İndirgeme	15.18	0.968	1.065
	Yük Akışı	22.87	0.780	1.010

Tablo 5.16.b. Uzun bir hat olan 9 - 14 hattı Seri kompanzasyon (Ks) uygulanması durumunda elde edilen kritik değerler

Seri K. Ks	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{crct} (derece)	Kritik Gerilim V_{crct} (pu)	Kritik Güç P_{crct} (pu)
0.25	İndirgeme	15.69	0.992	1.087
	Yük Akışı	23.28	0.798	1.030
0.50	İndirgeme	14.52	1.030	1.141
	Yük Akışı	24.22	0.780	1.050
0.75	İndirgeme	13.48	1.190	1.199
	Yük Akışı	25.09	0.768	1.070
0.95	İndirgeme	11.25	1.130	1.300
	Yük Akışı	26.40	0.741	1.090

Tablo 5.17.a, b, c, d ve e ' de ise, sistem kapasitesinin arttırılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. 5.17.a ' teorik olarak hat kapasiteleri 2 kat arttırılmış, kritik gerilim ve güç değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Yine teorik bir durum olarak, generatörlerin reaktif güç üretim limitleri hesaba katılmayarak incelemeler yapıldığında ise, salınım barasının bağlı olduğu baranın haricindeki tüm baralarda kritik gerilimin arttığı, özellikle kritik gücün ise Tablo 5.11 ' de belirlenen değerlerin iki katından fazla değerlere ulaştığı gözlenmiştir (Tablo 5.17.b).

Ancak şunu belirtmek gerekir ki Tablo 5.17.b deki değerler ancak yük akışı ile hesaplanabilmiştir. Zira, sistemin yüksek reaktif güç üretim kapasitesi nedeniyle, indirgeme yöntemi için özellikle gerilim değerleri (pratik olarak anlamı olmayan) yüksek değerlere çıktığından, uygun sonuçlar bulunamamıştır. Bu durumu daha iyi sergilemek amacıyla, hesaplanan gerçek kritik değerin belirli oranlarındaki yüklenmeler için kritik yük açısı, kritik gerilim ve kritik güç değerleri hesaplanmaya çalışılmış, ve bu değerlerin gerçek kritik değerlere oranlaması yapılmıştır. Sonuçlar, kritik güçler için , Tablo 17.c, kritik gerilimler için tablo 17.d, kritik yük açıları için de Tablo 17.e 'de verilmiştir. Bu tablolara göre özellikle kritik gerilim ve kritik güçler için; yükün, kritik değerinin %50 sinin üzerinde bir değer alması durumunda, indirgeme yönteminin doğru sonuç vermediğini göstermektedir.

Tablo 5.17.a. Hat kapasiteleri 2 kat olarak düşünülürse

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yük Açısı δ_{crct} (derece)	Kritik Gerilim V_{crct} (pu)	Kritik Güç P_{crct} (pu)
7	İndirgeme	24.98	0.700	0.786
	Yük Akışı	26.97	0.643	0.783
8	İndirgeme	18.88	0.866	1.143
	Yük Akışı	22.35	0.787	1.130
9	İndirgeme	15.88	0.993	1.090
	Yük Akışı	23.48	0.798	1.030
10	İndirgeme	25.55	0.744	0.912
	Yük Akışı	24.17	0.786	0.909
11	İndirgeme	22.32	0.552	7.967
	Yük Akışı	14.56	0.749	6.750

Tablo 5.17.b. Generatörler için reaktif güç sınırlamalarının olmaması durumu

Bara No	Kritik Yük Açısı δ_{crct} (derece)	Kritik Gerilim V_{crct} (pu)	Kritik Güç P_{crct} (pu)
7	68.07	0.967	1.700
8	61.56	0.975	2.100
9	71.76	0.847	1.950
10	65.18	1.000	1.850
11	18.68	0.700	7.800

Tablo 5.17.c. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik güçler)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	Prcrit (hes) / Prcrit			
Bara No				
7	0.415	0.526	*	*
8	0.415	0.524	*	*
9	0.365	0.501	*	*
10	0.426	0.533	*	*
11	1.037	1.042	1.050	1.058

Tablo 5.17.d. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik gerilimler)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	Vrcrit (hes) / Vrcrit			
Bara No				
7	0.678	0.866	*	*
8	0.693	0.875	*	*
9	0.819	1.093	*	*
10	0.659	0.834	*	*
11	0.799	0.803	0.810	0.820

Tablo 5.17.e. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik yük açıları)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	δ_{crit} (hes) / δ_{crit}			
Bara No				
7	0.366	0.416	0.561	1.204
8	0.372	0.393	0.457	1.264
9	0.292	0.301	0.341	1.213
10	0.382	0.428	0.556	1.197
11	1.166	1.176	1.192	1.238

5.3.4. KBA Sistemi İçin İncelenen Durumlar

İncelenen değiştirilmiş 11 baralı sistem, gerek üretim gerekse iletim kapasitesi olarak küçük bir sistem olarak gözükmektedir. Ülkemizden bir uygulama olarak gözönüne alınan Kuzey Batı Anadolu (KBA) sistemi ise, hat ve generatör datalarından da görüleceği üzere oldukça büyük kapasiteli bir sistemdir. Sistemin işletme koşullarına uygun, olası bazı durumlarına dayanılarak ve 11 baralı sistem için yapılanlara benzer çalışmalar KBA sistemi için de gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, mevcut hat ve generatör verilerine göre sistemin kritik değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5.18 'de verilmiştir.

Tablo 5.18. Mevcut verilere göre KBA sistemi için hesaplanan kritik değerler

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	23.67	0.714	19.47
	Yük Akışı	24.52	0.670	19.37
2	İndirgeme	25.67	0.674	18.46
	Yük Akışı	25.53	0.677	18.46
3	İndirgeme	27.16	0.636	18.26
	Yük Akışı	25.63	0.670	18.20
4	İndirgeme	28.02	0.631	19.82
	Yük Akışı	26.17	0.672	19.72
5	İndirgeme	37.49	0.711	39.88
	Yük Akışı	36.32	0.729	39.84

KBA sisteminin şekline göre, besleme kaynakları sistemin doğu ve batısında toplanmışlardır. Farklı karakteristiklere sahip bu üretim grupları, sistemin toplam yükü sabit kalacak şekilde, üretilen gücü farklı oranlarda paylaşmaları durumunda, hesaplanan kritik değerler Tablo 5.19 da gösterilmektedir. Batı kaynaklarının daha yüksek kapasiteli olmalarından dolayı, üretimlerinde azalma olması, sistemin tüm yük baralarında kritik güç değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

Tablo 5.19. Batı Kaynakları % 50 azaltılmış, doğu kaynakları % 100 artırılmış

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	28.22	0.611	15.94
	Yük Akışı	25.75	0.666	15.78
2	İndirgeme	29.47	0.584	15.45
	Yük Akışı	25.66	0.669	15.04
3	İndirgeme	29.69	0.571	15.99
	Yük Akışı	25.12	0.674	15.35
4	İndirgeme	29.58	0.581	17.89
	Yük Akışı	24.76	0.684	17.19
5	İndirgeme	37.22	0.703	39.51
	Yük Akışı	34.63	0.740	39.32

Tablo 5.20 'de sistemde mevcut olan, yüksek kapasiteli 1-10 hattına yapılan şönt kompanzasyonun, yük baralarındaki kritik gerilim ve kritik güç değerlerini azalttığı görülmektedir.

Tablo 5.20. 1-10 hattı % 75 şönt kompanze edilmiş

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yük Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	23.59	0.707	19.28
	Yük Akışı	25.69	0.664	19.18
2	İndirgeme	25.61	0.667	18.27
	Yük Akışı	25.47	0.669	18.27
3	İndirgeme	27.13	0.631	18.09
	Yük Akışı	25.28	0.671	18.00
4	İndirgeme	27.99	0.626	19.65
	Yük Akışı	25.90	0.671	19.51
5	İndirgeme	37.49	0.707	39.62
	Yük Akışı	36.29	0.725	39.58

KBA sistemi üzerinde yapılan bir başka çalışma ise, yük baralarında güç faktörünün, $\cos\phi = 1$ olması durumu için yapılmıştır. Tablo 21.a, b, c, d, ve e' den görüleceği gibi, bu durum kritik değerleri, düşük kapasiteli 11 baralı sisteme göre çok daha fazla iyi yöne etkilemektedir. Öyle ki, sistemin tüm yük baralarında $\cos\phi = 1$ olması durumunda kritik güç değerleri başlangıçta belirlenen durumun yaklaşık iki katına çıkmaktadır.

Tablo 5.21.a. Tüm yükler için $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yük Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	41.15	0.942	38.16
	Yük Akışı	54.04	0.713	34.46
2	İndirgeme	42.38	0.869	34.39
	Yük Akışı	49.71	0.746	33.21
3	İndirgeme	42.93	0.869	35.09
	Yük Akışı	34.62	1.000	33.42
4	İndirgeme	42.53	0.803	34.48
	Yük Akışı	40.68	0.832	34.40
5	İndirgeme	41.74	0.802	48.47
	Yük Akışı	43.25	0.779	48.40

Tablo 5.21.b. 1. bara için $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	41.51	0.844	32.71
	Yük Akışı	42.11	0.835	32.70
2	İndirgeme	25.91	0.742	20.39
	Yük Akışı	27.94	0.695	20.28
3	İndirgeme	27.44	0.688	19.86
	Yük Akışı	27.40	0.689	19.86
4	İndirgeme	28.27	0.673	21.32
	Yük Akışı	27.83	0.683	21.32
5	İndirgeme	37.59	0.737	41.71
	Yük Akışı	38.24	0.726	41.70

Tablo 5.21.c. 2. bara için $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	23.75	0.777	21.28
	Yük Akışı	27.94	0.681	20.85
2	İndirgeme	42.25	0.810	31.36
	Yük Akışı	42.26	0.810	31.36
3	İndirgeme	27.39	0.681	19.61
	Yük Akışı	26.76	0.697	19.61
4	İndirgeme	28.22	0.668	21.11
	Yük Akışı	27.45	0.686	21.09
5	İndirgeme	37.63	0.732	41.32
	Yük Akışı	36.28	0.753	41.27

Tablo 5.21.d. 3. bara için $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	24.28	0.753	20.62
	Yük Akışı	25.85	0.718	20.56
2	İndirgeme	25.96	0.720	19.81
	Yük Akışı	26.46	0.709	19.80
3	İndirgeme	42.52	0.773	31.04
	Yük Akışı	40.82	0.797	30.98
4	İndirgeme	28.23	0.674	21.21
	Yük Akışı	27.25	0.696	21.18
5	İndirgeme	37.61	0.735	41.48
	Yük Akışı	37.47	0.737	41.48

Tablo 5.21.e. 4. bara için $\cos\phi = 1$

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	23.90	0.753	20.76
	Yük Akışı	26.85	0.688	20.56
2	İndirgeme	25.81	0.714	19.78
	Yük Akışı	27.12	0.684	19.74
3	İndirgeme	27.38	0.679	19.61
	Yük Akışı	27.05	0.687	19.61
4	İndirgeme	42.36	0.763	32.69
	Yük Akışı	40.15	0.796	32.58
5	İndirgeme	37.62	0.738	41.61
	Yük Akışı	37.72	0.737	41.61

Diğer bir inceleme ise, sistemin önemli iki hattına yöneliktir. 4-5 hattı, düşük kapasiteli iki paralel hat olarak yoğun yük koşulları altında çalışmakta, 1-10 hattı ise daha yüksek kapasiteli bir hat olmakla beraber daha az yük taşımaktadır. Bu durumda 4-5 hattının tek hat olması halinde kritik güç değerlerinin belirli oranda küçüldüğü (Tablo 5.22.a), 4-5 hattının tamamen devre dışı kalması durumunda ise, kritik güç için değerlerin yarıdan daha düşük değerlere indiği saptanmıştır (Tablo 5.22.b).

Tablo 5.22.a. 4 - 5 tek hat

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	24.64	0.700	16.51
	Yük Akışı	22.86	0.737	16.45
2	İndirgeme	26.21	0.665	15.63
	Yük Akışı	23.60	0.721	15.49
3	İndirgeme	27.38	0.634	15.23
	Yük Akışı	23.91	0.711	14.95
4	İndirgeme	28.06	0.635	16.13
	Yük Akışı	23.79	0.727	15.69
5	İndirgeme	37.19	0.717	39.36
	Yük Akışı	36.07	0.734	39.32

Tablo 5.22.b. 4 - 5 açık

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	26.11	0.695	8.096
	Yük Akışı	19.84	0.838	7.636
2	İndirgeme	27.93	0.657	7.286
	Yük Akışı	20.97	0.820	6.707
3	İndirgeme	28.57	0.659	6.874
	Yük Akışı	21.46	0.832	6.267
4	İndirgeme	28.65	0.685	6.919
	Yük Akışı	21.78	0.846	6.417
5	İndirgeme	34.13	0.760	35.76
	Yük Akışı	37.78	0.704	35.43

1-10 hattının tamamen açılması durumunda ise 4-5 'in açılmasına eşit olmamakla birlikte, kritik güç değerlerinde önemli azalmalar saptanmıştır (Tablo 5.22.c)

Tablo 5.22.c. 1 - 10 açık

Bara No	Uygulanan Yöntem	Kritik Yüç Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	İndirgeme	22.65	0.807	12.56
	Yük Akışı	24.16	0.774	12.53
2	İndirgeme	25.09	0.748	12.14
	Yük Akışı	24.61	0.759	12.14
3	İndirgeme	26.69	0.697	12.72
	Yük Akışı	23.51	0.771	12.53
4	İndirgeme	27.53	0.678	14.48
	Yük Akışı	24.27	0.752	14.25
5	İndirgeme	37.37	0.718	32.20
	Yük Akışı	34.37	0.765	31.98

KBA sistemi için son olarak, 11 baralı sisteme benzer şekilde, generatörlerin reaktif güç limitleri gözönüne alınmaksızın kritik değerlerin hesabı yapılmıştır. Beklenildiği gibi kritik değerlerde önemli artışlar gözlenmiştir (Tablo 5.23.a). Ayrıca bu sistemde, sistemin öz kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, gerçek kritik gücün belirli oranları için yüklenmelerde kritik değerler hesaplanırken; gücün, kritik güce oranının % 75 değerine kadar hesaplamalar yapılmış, ve doğruluk oranları, kritik güçler için Tablo 5.23.b ' de, kritik gerilimler için 5.23.c ' de ve kritik yük açıları içinde Tablo 5.23.d ' de verilmiştir.

Tablo 5.23.a. Generatörler için reaktif güç sınırlamalarının olmaması durumu

Bara No	Kritik Yük Açısı δ_{rcrt} (derece)	Kritik Gerilim V_{rcrt} (pu)	Kritik Güç P_{rcrt} (pu)
1	62.15	0.819	41.31
2	58.00	0.776	38.97
3	48.00	0.715	38.39
4	41.00	0.712	32.98
5	49.50	0.791	54.44

Tablo 5.23.b. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik güçler)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	Prcrit (hes) / Prcrit			
Bara No				
1	0.419	0.522	0.835	*
2	0.441	0.537	0.791	*
3	0.454	0.522	0.673	*
4	0.571	0.634	0.759	1.199
5	0.684	0.721	0.797	1.092

Tablo 5.23.c. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik gerilimler)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	Vrcrit (hes) / Vrcrit			
Bara No				
1	0.799	0.993	1.575	*
2	0.823	0.990	1.443	*
3	0.857	0.971	1.221	*
4	0.851	0.930	1.083	1.629
5	0.851	0.893	0.980	1.326

Tablo 5.23.d. Reaktif güç sınırının olmaması durumunda hesaplanan kritik değerlerin gerçek kritik değerlere oranları (kritik yük açıları)

Pr / Prcrit	0.25	0.50	0.75	1.00
	δ_{rcrit} (hes) / δ_{rcrit}			
Bara No				
1	0.416	0.420	0.434	*
2	0.459	0.466	0.483	*
3	0.560	0.563	0.604	*
4	0.673	0.683	0.707	0.780
5	0.762	0.764	0.768	0.796

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yük akışı analizleri yardımıyla, enerji iletim sistemlerinin gerilim kararlılığına olan etkileri çeşitli açılardan incelenmiştir. İlk grup incelemelerde, paralel iletim hatlarından ibarret olan iki baralı bir sistem için, statik gerilim kararlılığının temel ilkeleri ortaya konmuş ve kararlılık limitleri olarak gözönüne alınan P_{crit} , V_{crit} , δ_{crit} değerlerinin, gerek iletim hatlarıyla ve gerekse yüklerle ilgili etkileşimleri ortaya konmuştur. Yine bu grup çalışmanın içinde, seri ve şönt kompanzasyonun yüzde artımlarının etkileri yanında, özellikle bu artımların farklı kompanzasyon yerleşimlerine sahip değişik hat işletim modelleri için gerilim kararlılığına olan etkileri incelenerek, gözönüne alınan işletim sistemleri için statik gerilim kararlılığı limitleri bakımından bir iyilik sırası belirlenmiştir.

İkinci grup incelemelerde ise, dinamik gerilim kararlılığı açısından, iletim sistemlerinin etkileri incelenmiştir. Dinamik yük elemanı olarak asenkron motorlar göz önüne alınarak, dinamik incelemenin esasları N baralı bir sistem için ortaya konmuş, inceleme kolaylığı açısından uygulama iki baralı sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burada, öncelikle dinamik yükler açısından gerilim kararlılığıyla etkileşimler ortaya konmuş, daha sonra ise, birinci grupta ele alınan, farklı kompanzasyon konumlandırılmalı hat işletim modelleri altında, yükün, dinamik bir yük olması göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. Bu grup incelemelerin sonucunda da, hat modellerinin dinamik gerilim kararlılığı açısından etkileşimleri gözlenerek farklı hat modelleri için yine bir iyilik sırası belirlenmiştir.

Böylelikle, seri ve şönt kompanzatörlerin iletim hattı üzerinde farklı noktalarda konumlandırılmaları ve değişik kompanzasyon yüzdeleri altında, iletim hatlarının gerilim kararlılığına olan etkilerini, yüklerin statik ve dinamik durumları için karşılaştırma olanağı bulunmuştur.

Üçüncü grup çalışmalarda ise, birinci grupta yapılan incelemelerin N baralı sistemlerde uygulanması için önce bir yöntem geliştirilmiş ve böylelikle yük baralarındaki kritik değerlerin belirlenmesi ve çeşitli işletme durumlarının bu kritik değerlere etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemelerde varılan sonuçlar özetle aşağıda verilmiştir.

Sonuçlar

İki baralı bir sistemde, radyal iletim hatlarının, farklı kompanzasyon konumlandırılmalı hat işletim modellerinin, statik gerilim kararlılığı açısından etkilenmeleri şu şekilde belirlenmiştir :

- 1) Güç faktörünün ($\cos\phi$), geri değerlerden ileri değerlere gitmesi durumunda, kritik güç (P_{crit}), kritik gerilim (V_{crit}) ve kritik yük açısı (δ_{crit}) değerleri artmaktadır,
- 2) Aynı parametrelerle iletim hattının uzunluğu arttıkça P_{crit} değeri azalmakta buna karşılık, V_{crit} ve δ_{crit} değerleri artmaktadır,
- 3) İletim hattının kayıp faktörü (α) arttıkça P_{crit} , V_{crit} ve δ_{crit} değerleri azalmaktadır,
- 4) İletim hattının sonunda reaktif güç kompanzasyonu yapılması durumunda, kompanzasyon yüzdesi arttıkça P_{crit} , V_{crit} ve δ_{crit} değerleri artmaktadır,
- 5) Seri kompanzasyon yüzdesi (K_s) arttıkça, P_{crit} değeri artmakta buna karşılık, V_{crit} ve δ_{crit} değerleri azalmaktadır, $\alpha=0$ için, K_s artımına bağlı olmaksızın δ_{crit} değeri bütün modlarda sabit kalmaktadır.
- 6) Şönt kompanzasyon yüzdesinin (K_d) artımı ile, genel olarak, V_{crit} ve δ_{crit} değerlerinin azalma eğilimli olduğu görülmekte ise de, özellikle P_{crit} değerinin şönt kompanzasyonun konumlandırılmasına bağlı olarak farklı değişimler gösterdiği saptanmıştır.

Gözönüne alınan işletim modellerine göre, K_d artımı ile P_{crit} değeri;

- 1.- 3.- 6. Modeller için azalmakta ,
- 4.Model için değişmemekte ,
- 5.Model için önce azalmakta sonra artmakta ,
- 2.Model için ise artmaktadır.

Kısım 3.3 'teki ara sonuçlar da göz önüne alınarak , çeşitli işletme modellerine göre statik gerilim kararlılığı açısından; simetrik konumlandırılmalı modellerden 2. modelin, simetrik olmayan yapıdaki modellerden 5. modelin en iyi etkilenmelere sahip

olduğu gözükmemektedir. Genelde ise 5. model tüm koşullarda en iyi 4. model ise en kötü mod olarak göze çarpmaktadır.

Bir diğer konu ise, özellikle dinamik gerilim kararlılığı açısından, önemli bir bozucu etkiye sahip olan paralel hatlardan birinin devre dışı kalması olayıdır. İki paralel hattın biri devre dışı olması durumunda statik gerilim kararlılığı açısından görülmüştür ki, V_{crit} değeri çok az değişirken, P_{crit} değeri ise yaklaşık yarıya düşmektedir. Bu durumun, yüklerin dinamik etkilerinin de gözönüne alınarak yorumlanması gerekir. Bir başka deyişle, paralel iki hat olarak gözönüne alınan farklı hat modellerinin, artan seri ve şönt kompanzasyon yüzdeleri altında, tek hat durumuna düşmesiyle ortaya çıkan etkilenmelere göre gerek kısım 4.7 ' deki kısmi yorumlar ve gerekse Ek G ' de verilen, gerilim, aktif ve reaktif güç değişimlerini gösteren eğriler yardımıyla değerlendirilmesi durumunda;

7) Seri kompanzasyon yüzdesinin artımı 4. model hariç tüm modellerde dinamik gerilim kararlılığı açısından (DGK) olumlu etki yapmaktadır. 4.model ise %50 ve üzeri seri kompanzasyon yapılması halinde olumsuz durum sergilemektedir.

8) Şönt kompanzasyon yüzdesinin artırılması ile, 4.model en az etkilenirken, 1.,2.,3., 5. ve 6. modeller olumsuz yönde etkilenmektedirler. Ancak, 5. modelin olumsuz yönde etkilenmesi en fazla olmaktadır. $K_s = \% 0 -25$ değerleri için $K_d = \% 50$ ve üzeri, $K_s = \% 50 -75$ değerleri için $K_d = \% 75$ ve üzeri, $K_s = \% 95$ değeri için $K_d = \% 95$ seri ve şönt kompanzasyonlarla 5. modelin en kötü etkilenmeye sahip olduğu görülmektedir. Burada, seri kompanzasyon artımının belli ölçüde şönt kompanzasyonun olumsuz etkisini kompanse ettiği açıkça görülmektedir,

9) Yine tek reaktörle şönt kompanzasyon yapılan 6.model için, $K_s = \% 0$ değeri için $K_d = \% 50$ ve üzeri, $K_s = \% 25$ değeri için $K_d = \% 75$ ve üzeri, $K_s = \% 50$ değeri için $K_d = \% 95$ seri ve şönt kompanzasyon durumlarında, dinamik gerilim kararlılığı bakımından olumsuz etkilenmelerin olduğu gözlenmektedir,

10) Olumlu etkilenme sırasına göre 2. - 1. ve 3. modeller çok yakın karakteristikler sergilemektedirler,

11) Dinamik gerilim kararlılığı bakımından bir sıralama yapılacak olursa,

2. - 1. -3. modellerin iyi,

6. - 5. modelin kritik,

4. modelin ise en kritik hat modeli olduğu görülmektedir.

3. grupta yapılan çalışmalara ilişkin sonuçlar ise şöyle derlenebilir;

12) N baralı sistemde kritik değerlerin belirlenmesi için geliştirilen yöntemle elde edilen sonuçların, yük akışı ile bulunan ve gerçek değerler olarak gözönüne alınan sonuçlarla karşılaştırılması ile, kritik güç değerlerinin belirlenmesinde % 95 'in üzerinde bir yaklaşıklık, kritik gerilim ve güç açısı değerleri içinse % 90 'ın üzerinde bir yaklaşıklık elde edilmiştir. Bu noktada, kritik güç değeri, sistemin planlanması işletimi ve kontrolü için belirli bir marjini netleştirmesine karşılık, kritik gerilim için elde edilen değerler aynı oranda belirgin sınırlar çizememektedir. Bunun nedeni, 3. bölümde elde edilen ve çeşitli durumlardan nasıl etkilendiği ayrıntılı olarak ortaya konan PV eğrileri üzerinde açıkça görülmektedir. Gerçekte, sistemin herhangi bir barası ile ilgilenirken, izlenen yöntemde de yapıldığı gibi, sistem, ilgilenilen bara ile salınım barası arasında iki baralı bir sisteme dönüştürülmekte ve iki baralı sistemler için geçerli olan olaylar burada da benzer etkilere sebep olmaktadır. En basit örnek, bir yük barasında güç faktörü iyileştikçe, kritik güç artmakta, kritik gerilimde artmaktadır. Oysa kritik gücü arttıran başka bazı etkenlerde kritik gerilim değeri düşmektedir. Dolayısı ile kritik güç değerinin artması her zaman bir iyileştirmenin göstergesi olduğu gibi, kritik gerilim değerinin artması da doğrudan bir kötüleşmedir denemez, ayrıntıların ortaya konması gereklidir.

13) Ayrıntılı olarak incelendiği üzere, bara gerilimlerinin genlikleri ile reaktif güçler arasında kuvvetli bir bağıntı olduğundan, incelenen sistemlerin reaktif güç üretim kapasiteleri artırıldığında, yük baralarındaki kritik güç ve gerilim değerlerinin de arttığı görülmektedir. Özellikle generatörlerin reaktif güç limitlerinin göz önüne alınmaması durumunda, sistem iki baralı hale indirgenirken eşdeğer elemanlar, indirgenmiş sistemde A sabitinin oldukça küçülmesine neden olmakta böylece boştaki uç gerilimi pratik değerlerin çok üstüne çıkmakta dolayısıyla, hesaplanan kritik değerler gerçek değerlerin çok üstüne çıkabilmektedir. Bu nedenle, indirgeme yönteminin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için reaktif güç kısıtlamalarının mutlaka uygulanması gereklidir.

14) Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, N baralı sistemde, güç faktörünün mümkün olduğu kadar çok barada iyileştirilmesi, tüm sistem baralarındaki kritik güç sınırını arttırmada aynı oranda etkili olmaktadır.

15) Aynı üretim koşulları altında, sistem yükünün artması, kritik gerilim ve kritik güç sınırlarının azalmasına, yükün azalması ise kritik gerilim ve güç sınırlarının artmasına sebep olmaktadır.

16) Enterkonnekte bir sistemi besleyen paralel hatlardan bir ya da bir kaçının devre dışı kalması durumunda, kritik güç ve kritik gerilim değerleri azalmaktadır. Ancak bazı durumlarda, herhangi bir baranın kritik değerleri, o baraya bağlı olan paralel hatların devre dışı olmalarından daha fazla, başka bir baraya bağlı paralel besleme hatlarının devre dışı kalmalarından etkilenebilmektedir. Bu durum, iletim hatlarının kapasitelerine ve besleme kaynaklarının aktif ve reaktif güç sınırlarına önemli ölçüde bağlıdır. Örneğin, salınım barasını sisteme bağlayan paralel hatlarda devre dışı kalmalar olduğunda tüm sistem baralarının kritik değerlerinde önemli etkilenmeler olur. Zira salınım barası normal yük akışı analizlerinde, teorik olarak, aktif ve reaktif güç sınırları olmayan bir üretim barasıdır.

17) Yine enterkonnekte sistemi besleyen herhangi bir iletim hattında, seri veya şönt kompanzasyon yapılması durumunda, ilgili hattın bağlantı barasındaki kritik gücün ve gerilimin, iki baralı sisteminkine benzer yönde ancak daha az oranlarda etkilenmeler gösterdiği görülmektedir. Bu etkilenmelerin oranı yine tüm sistemin kapasitesi ile yakından ilgilidir. Sistem kapasitesi arttıkça etkilenmelerde artmaktadır.

18) Farklı üretim baralarının salınım barası olarak seçilmesi durumunda, diğer sistem baralarındaki kritik değerler farklılaşmaktadır. Ancak sisteme elektriksel olarak uzak üretim baralarının salınım barası seçilmesi durumunda diğer baralardaki kritik değerler sağlıklı bir şekilde hesaplanamamaktadır.

19) Enterkonnekte bir sistemi besleyen kaynaklar, sistemin iki ana yönünde (doğu-batı ya da kuzey-güney gibi) toplanmışsa, besleme kaynakları için güç dağılımının her iki yönde de farklılaşması durumunda, kritik değerlerde önemli etkilenmeler olur, şöyle ki eğer bir yöndeki potansiyel daha büyük ve bu yöndeki kaynaklarda azalma olursa, diğer yöndeki üretim bu azalmayı kompanze etse dahi, sistem baralarının kritik gerilim ve kritik güç değerlerinde azalma görülmektedir.

Öneriler

1) Çeşitli işletme zorunlulukları nedeniyle, iletim hatları üzerinde, farklı noktalarda seri ve şönt kompanzasyon tesisleri kurulmasıyla ortaya çıkan farklı hat modelleri için kritik değerler hesap edilerek, statik gerilim kararlılığı bakımından bu modeller arasında bir iyilik sırası belirlenmiştir. Daha sonra ise aynı hat modellerinin dinamik yükler açısından etkilenmeleri incelenmiş ve sonuçta statik ve dinamik etkilerin karşılaştırılması ile, aynı hat modelinin farklı davranışlar sergileyebildiği gözlenmiştir.

Çarpıcı bir örnek olarak da, seri kompanzasyonun hat ortasında, şönt kompanzasyonun da tek bir reaktörle hat sonunda yapıldığı 5. Model için statik bakımdan, diğer modellere göre bir üstünlüğe sahip olmasına karşılık dinamik etkiler bakımından aynı derece iyi bir durum sergileyememesidir. Buna göre, bir hat işletim modelinin, gerilim kararlılığı açısından sadece statik sınırlarını belirlemek yeterli olmamaktadır. Bunun yanında, dinamik yük etkilerini de çeşitli yönleriyle incelemek işletme planlamasında son derece önemli görülmektedir. Özellikle tek bir şönt reaktörle kompanzasyon yapılacaksa (örnek, 6., 5. ve 4. modeller) bu incelemenin çok daha dikkatli yapılması gereklidir.

2) Yine özellikle dinamik açıdan, en azından hat başı ve sonunda iki reaktörle şönt kompanzasyon yapmanın tek reaktörle yapılan kompanzasyona göre üstün olduğu gözlenmiştir. Şüphesiz reaktör seçimi başka işletme koşullarına da bağlı olmakla birlikte, dinamik gerilim kararlılığı açısından da mutlaka etüd edilmeli, hatta uzun hatlarda ikiden daha fazla reaktörün etkileri de incelenmelidir.

3) Yapılan çalışmalardan görülmüştür ki, reaktif güç üretiminin mümkün olduğunca tüketicilere yakın olması, generatörlerde, hatlarda ve trafolardaki kayıpları azaltma yönünde bilinen özelliği yanında, özellikle paralel hat açmaları gibi problemlerin etkisini azaltır. Bunun yanında, sürekli üretim yapmak yerine sistemi sürekli kontrol ederek, olağan dışı durumlarda tüketicilerden gelen talebi hızla karşılamak söz konusu edilebilir. Bu durumda, kontrol ve anahtarlama elemanlarının hızlı değişen taleplere cevap verecek nitelikte olması gerekecektir. Fakat büyük tüketicilerin toplam yüzlerce MVar' ı bulan reaktif güç ihtiyaçlarını tek merkezden yapmanın da gerek ekonomiklik gerekse işletme açısından büyük mahzurları vardır. Bu nedenle büyük küçük tüm reaktif güç talep eden tüketicilerin kendi reaktif güç kompanzasyonlarını yeterli miktarda ve büyüklükleriyle orantılı kontrol hızlarında yapmalarını sağlamak en akılcı yol olarak görülmektedir.

4) Yöntem olarak tüm çalışma boyunca Yük Akışı Analizlerinin uygulamalarına dayalı olarak çalışmalar yapılmıştır. En büyük sorun şüphesiz Salınım Barası 'dır. Verimli sonuçlar alabilmek için uygun bir bara seçiminin araştırılması yanında, yeni yeni incelenmeye başlayan birden fazla salınım barası kavramının gerilim kararlılığı açısından etüd edilmesi yararlı görülmektedir.

Son söz olarak, bu çalışma da dahil, incelenen tüm çalışmalardan gözlenen en önemli sonuç :

Sistemin düzgün bir gerilim profiline sahip olmasının gerilim kararlılığı açısından bir garanti olamayacağı gibi, gerilimin düşük seviyelere inmesi durumunda dahi gerilim kararsızlığından korunmanın mümkün olduğu gerçeğidir.



KAYNAKLAR

- [1] ANDERSON P.M., FOUAD A.A., Power System Control And Stability, The Iowa State University Press, 4.th printing, 1986
- [2] TACER Emin, Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İTÜ Kütüphanesi Sayı 1407, E-E Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul 1990
- [3] TAYLOR Carson W., Power System Voltage Stability, Mc Graw-Hill, Inc., 1992
- [4] KUNDUR Prabha, Power System Stability And Control, Mc Graw-Hill, Inc., 1994
- [5] OVERBY Thomas J., DOBSON Ian, Q - V Curve Interpretations Of Energy Measures For Voltage Security, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 331-340, February 1994
- [6] VOURNAS C.D., Voltage Stability as Effected by Static Load Characteristics, Proceedings - C, Vol. 140, No. 3., pp. 221-228, May 1993
- [7] BRUCOLI M., SCALA M.IA, SBRIZZAI R., TROVATO M., Voltage Stability Analysis of Electric Power Systems with Frequency Dependent Loads, IEE Proceedins - C, Vol. 140, No. 1, pp.1-7, January 1993
- [8] KARLSSON Daniel, HILL David J., Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 157-166, February 1994
- [9] KAO Wen-Shiow, LIN Chia-Jen, HUANG Chiang-Tsang, Comparasion of Simulated Power System Dynamics Applaying Various Load Models with Actuel Recorded Data, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 248-254, February 1994
- [10] VENIKOV V.A., STROEV V.A., IDELCHICK V.A., TARASOV V.A., Estimation of Electric Power System Steady-State Stability in Load-Flow Calculation, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No.3, pp.1034-1041, May/June 1975
- [11] Y.TAMURA, H.MORI, S.IWAWATO, " Relationship between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No. 5, pp. 1115-1125, May 1983

- [12] CHIANG Hsiao-Dong, DOBSON Ian, THOMAS Robert J., THORP James S., LAZHAR Fekih-Ahmet, On Voltage Collapse in Electric Power Systems, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.5, No.2, pp.601-611, May 1990
- [13] N.YORINO, H.SASAKI, Y.MASUDA, Y.TAMURA, M.KITAGAWA, A.OSHIMO, An Investigation of Voltage Instability Problems , Transaction on Power Systems., Vol. 7, No. 2, pp. 600-611, May. 1992
- [14] TRANUCHIT A., THOMAS R.J., A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 87-93, February 1988
- [15] GAO B., MORISON G.K., KUNDUR P., Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis, Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1536, November 1992
- [16] FLATABO N., OGNEDAL R., CARLSEN T., Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods, Trans. on Power Systems, Vol. 5, No.4, pp. 1286-1293, November 1992
- [17] MIROSLAW M.BEGOVIC, ARUN G.PHADKE, Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis, Transactions on Power Systems, Vol. 7, No.1, pp. 114-123, February 1992
- [18] M.E.EL-HAWARY, L.G.DIAS, Bus Sensitivity to Load-Model Parameters in Load Flow Studies, IEE Proceedings, Vol. 134., Pt.C, No. 4, pp. 302-305, July 1987
- [19] R.A.SCHLUETER , I.HU, M.W.CHANG, J.C.LO, A.COSTI, Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse, Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 285-292, February 1991
- [20] T.VAN CUTSEM, A Method to Compute Reactive-Power Margins with respect to Voltage Collapse, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 145-155, February 1991
- [21] SEKINE Yasuji, OHTSUKI Hiroshi, Cascaded Voltage Collapse, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 250-256, February 1990
- [22] ELGERD Olle L., Electric Energy Systems Theory, Mc Graw-Hill, Inc., 3 rd Printing, 1985
- [23] GEÇKİNLİ Emel A., Metalografi, İTÜ Kütüphanesi Sayı 1391, Teknik Ünivesite Matbaası, Istanbul 1989
- [24] ÇETİN İlhami, Elektrik Motorları, Fatih Yayınevi Matbaası, Istanbul 1987

- [25] XU Wilson, MANSOUR Yakout, Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 479-493, February 1994
- [26] STEVENSON William D.Jr., Elements Of Power System Analysis, Mc Graw - Hill Book Comp., 4th edition, 1988
- [27] CONDON E.U., ALTAR William, Transmission Lines, Chapter 19 of Industrial Electronics Reference Book by Electronic Engineers of Westinghouse Elec. Corp., John Wiley&Sons, Inc., 1948
- [28] WADHWA C.L., Electrical Power Systems, John Wiley&Sons, Inc., 2th edition, 1948
- [29] ARABUL Hüseyin, Elektrik Enerjisi Üretim, İletim ve Dağıtım Özelleştirilmesi, TMMOB Elektrik Mühendisliği, Cilt 38, Sayı 392, sayfa 156-162, 1993
- [30] TEK, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların, Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri, 1991
- [31] WEEDY B.M., Electric Power Systems, John Wiley&Sons, Inc., 3th edition, 1987
- [32] ABE S., FUKUNOVA Y., ISONO A., KONDO B., Power system Voltage Stability, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, pp.3830, 3840, October 1982
- [33] OHTSKI Hiroshi, YOKOYAMA Akihiko, SEKINE Yasuji, Reverse Action of On-Load Tap Changer in Association with Voltage collapse, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 300-306, February 1991
- [34] BERG G.J., Assessment of Critical Voltage and Load Margins in VAR Compensated Power Transmission Systems, Electric Power System Research, 12, pp. 63-69, 1987
- [35] MILLER T.J.E, Reactive Power Control in Electric Power Systems, John Wiley &Sons, Inc., 1982
- [36] INDULKAR C.S., VISWANATHAN B., Deterministic and Probabilistic Approach to Voltage Stability of Series Compensated EHV Transmission Lines, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 7, pp.2317-2322, July 1983
- [37] INDULKAR C.S., VISWANATHAN B., Effect of Series Compensation on the Voltage Instability of EHV Long Lines, Electric Power System Research, 6, pp.185-191, 1983

- [38] INDULKAR C.S., VISWANATHAN B., VENKATA S.S., Reactive Power Constrained Loadability Limits of Series Capacitor Compensated EHV Transmission Lines, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. PWRS- 2, No. 2, pp. 585-591, August 1987
- [39] YÜKSELER H.Nusret, The Effects of Voltage Stability Boundiries on Capability Charts for Shunt Compensated Power Systems, IEEE MELECON 94, Vol. 3, pp. 936-939, Antalya, Türkiye, 1994
- [40] PRASAD G.Durga, JANGAMASHETTI S.H., RAO V.G., INDULKAR C.S., TRIPATHY S.C., Optimum Compensation to Improve Line Loadability, Electric Power System Research, 20, pp. 73-80, 1990
- [41] INDULKAR C.S., VISWANATHAN B., VENKATA S.S., Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schemes for A.C. Transmission Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1246-1252, April 1989
- [42] GÖNEN Turan, Modern Power System Analysis, John Wiley&Sons, Inc., 1988
- [43] ATALAY Hamit, Transmisyon Tekniği, KTÜ Makina-Elektrik Fakültesi Yayınları, No.5, Trabzon 1977
- [44] PRICE William W., WIRGAU Kim A., MURDOCH Alexander, MITSCHÉ James V., VAAHEDİ Ebrahim, EL-KADY Moe A., Load Modelling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp.180-187, February 1988
- [45] KOESSLER Rodolfo J., FELTES James W., Time - Domain Simulation Investigates Voltage Collapse, IEEE Computer Applications in Power, pp. 18-22, 1993
- [46] PAL M.K., Voltage Stability Analysis Needs, Modelling Requirement and Modelling Adequacy, IEE Proceedings - C, Vol.140, No.4, pp. 279-286, July 1993
- [47] PAL M.K., Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.243-249, February 1992
- [48] NOZARI Farhad, KANKAM M.David, PRICE William W., Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Load Modelling, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. PWRS - 2, No.4, pp. 1096-1103, November 1988
- [49] BRUCOLI M., SCALA M.La, SBRIZZAI R., TRAVATO M., Modedlling of Induction Motor Loads in Power-Systems Voltage Stability Studies, ETEP Vol. 1, No. 2, pp. 79-88, March/April, 1991

- [50] ROGERS G.J., SHIRMOHAMMADI D., Induction Machine Modelling Electromagnetic Transient Program, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC - 2, No. 4, pp. 622-628, December 1987
- [51] SARIOĞLU Kemal, Asenkron Makinalar, Çağlayan Kitabevi, 2.baskı, İstanbul-1983
- [52] KRAUSE Paul C., Analysis of Electric Machinery, Mc-Graw Hill Book Comp., 2 th printing, 1987
- [53] DIANA G., HARLER R.G., Transient Behaviour of Induction Motor Flux and Torque During Run-up, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC - 2, No. 3, pp. 465-469, September 1987
- [54] HAKIM Abdel M.M., BERG G.J., Dynamic Single Unit Representation of Induction Motor Groups, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 95, No. 1, pp. 155-165, January/February 1976
- [55] HAMMAD A.E., EL-SADEK M.Z., Prevention of Transient Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by Static VAR Compensators, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1182-1190, August 1989
- [56] IEEE Special Stability Controls Working Group, Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp.229-240, February 1994
- [57] GYUGYI Laszlo, Power Electronics in Electric Utilities : Static Var Compensators, Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 483-494, April 1988
- [58] EDRIS Abdel-Aty, Controllable VAR Compensator : A Potential Solution to Loadability Problem of Low Capacity Power Systems, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 561-567, August 1989
- [59] HISKENS Ian A., Mc LEAN Cameron B., SVC Behaviour Under Voltage Collapse Conditions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1078-1087, August 1992
- [60] EL-SADEK M.Z., ABDEL BARR F.N., Effects of Induction Motor Load in Provoking Transient Voltage Instabilities in Power Systems, Electric Power Systems Research, 17, pp. 119-127, 1989
- [61] EL-SADEK M.Z., Voltage Instabilities Subsequent to Short-Circuit Recoveries, Electric Power Systems Research, 21, pp. 9-16, 1991

- [62] J.c. CHOW, R. FISCHL, H. YAN, " On the Evaluation of Voltage Collapse Criteria ", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 612-620, May 1990
- [63] VENKATARAMANA AJJARAPU, COLIN CHRISTY, " The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis" , Transaction on Power Sys., Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, February 1992
- [64] M.R.IRVING, A.M.CHEBBO, M.J.H.STERLING, " Voltage Collapse Proximity Indicator Behavior and Implications", IEE Proceeding-C, Vol. 139., No. 3, pp. 241-252, May 1992
- [65] SEMLYEN A., GAO B., JANISCHEWSKYJ W., Calculation of the Extreme Loading Condition of a Power System for the Assessment of Voltage Stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 307-315, February 1991
- [66] BEGOVIC Miroslav M., PHADKE Arun G., Voltage Stability Assessment Through Measurement of a Reduced State Vector, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 198-211, February 1990
- [67] TUAN T.Quoc, FANDINO J., HADJSAID N., SABONNADIERE J.C., VU H., Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability Using Indicators, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 341-351, February 1994
- [68] OBODINA O.O., BERG G.J., Determination Of Voltage Stability Limit In Multimachine Power Systems, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.3, No.4, pp. 1545-1553, November 1988
- [69] CALVAER A.J., On The Maximum Loading of Active Linear Electric Multiports, Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 2, pp.282-283, February 1983
- [70] ABE S., HAMADA N., ISONO A., OKUDA K., Load Flow Convergence in the Vicinity of a Voltage Stability Limit, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, pp. 1983-1993, November / December 1978
- [71] El-ARINI M.M.M., Decoupled Power-Flow Solution Method for Well - Conditioned and Ill - Conditioned Power Systems, IEE Proceedings. - C, Vol. 140, No. 1, pp. 7-10, January 1993
- [72] SEVAİOĞLU Osman, Convergence of the Fast Decoupled Load Flow for Systems with Heavy Reactive Power Compensation, Electric Power Systems Research, 25, pp. 91-99, 1992
- [73] S.IWAWATO, Y.TAMURA, A Load Flow Calculation Method for ill - conditioned Power Systems, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1736-1744, April 1981

- [74] K.GANESAN, E.MOORE, W.J. VETTER, On Convergence of Newton' s Method for Load Flow Problems, International Journal For Numerical Methods in Engineering, Vol. 7, pp. 325-336, 1973
- [75] IRVING M.R., STERLING M.J.H., Efficient Newton-Raphson Algorithm for Load-Flow Calculation in Transmission and Distribution Networks, IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. C, No. 5, pp.325-327, September 1987
- [76] WALLACH Y., Calculations and Programs for Power System Networks, Prentice-Hall Inc., 1986
- [77] STOTT B., ALSAC O., Fast Decoupled Load Flow, IEEE Trans. PAS-93, pp.859-867, 1974
- [78] KEYHANI A., ABUR A., HAO S., Evaluation of Power Flow Techniques for Personel Computers, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 817-826, May 1989
- [79] HAQUE M.H., Novel Dcoupled Load Flow, IEE Proceedins - C, Vol. 140, No. 3, pp. 199-205, May 1993
- [80] PAI M.A., Computer Techniques in Power System Analysis, Tata Mc Graw-Hill Ltd., 4th printing, 1984
- [81] HEYDT G.T., Computer Analysis Methods for Power Systems, Mc Millan Publishing Company, 1990
- [82] AOKI K., NISHIKORI A., An Algorithm for Constrained Load Flow, IEEE Transactions on Power Apparatus and Sysytems, Vol. PAS-103, No.5, pp. 963-973, May 1984
- [83] STTOT Brain, TARKAN Orhan, Elektrik Enerji Şebekeleri Çözümlerinde Modern Metodlar, ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 24, Başnur Matbaası, Ankara 1970
- [84] J.L.BALA, A.THANICHALAM, An Improved Second Order Method for Optimal Load Flow, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 4, pp.1239-1244, July/August 1978
- [85] TEK , Ulusal Şebekede Yük Akışı ve Arıza Analizleri , Ankara TEK Matbaası 1991
- [86] TYLAVSKY Daniel J., CROUCH Peter E., JARRIEL Leslie F., SINGH Jagjit, ADAPA Rambabu, The Effects of Precession and Small Impedance Branches on Power Flow Robustness, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 6-14, February 1994

EK A

P-V Eğrilerinin Elde Edildiği Analitik İfadeler

$A = a_1 + a_2$, $B = b_1 + b_2$, $C = c_1 + c_2$, $D = d_1 + d_2$, hat sabitlerini,
 V_s , V_r , sırası ile hatbaşı ve hat sonu gerilimlerini,
 P_r , Q_r , hat sonundan çekilen aktif ve reaktif güçleri,
 $\cos\phi$, güç açısını göstermek üzere;

$$V_s = A \cdot V_r + B \cdot I_r \quad ,$$

$$V_r = V_{r1} + jV_{r2} \quad ,$$

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r \cdot I_r^* \quad ,$$

$$I_r = (P_r - jQ_r) / V_r^* \quad ,$$

$$V_s = (a_1 + ja_2) \cdot (V_{r1} + jV_{r2}) + (b_1 + jb_2) \cdot [(P_r - jQ_r) / (V_{r1} + jV_{r2})]$$

$$|V_r|^2 = V_{r1}^2 + V_{r2}^2 \quad , \quad V_r^* = V_{r1} - jV_{r2} \quad ,$$

$$V_s \cdot V_r^* = (a_1 \cdot |V_r|^2 + b_1 \cdot P_r + b_2 \cdot Q_r) + j(a_2 \cdot |V_r|^2 + b_2 \cdot P_r - b_1 \cdot Q_r)$$

her iki taraf eşleniği ile çarpılarak aşağıdaki ifadeler elde edilir ;

$$|V_s|^2 \cdot |V_r|^2 = (a_1 \cdot |V_r|^2 + b_1 \cdot P_r + b_2 \cdot Q_r)^2 + (a_2 \cdot |V_r|^2 + b_2 \cdot P_r - b_1 \cdot Q_r)^2 \quad ,$$

$$\begin{aligned} |V_s|^2 \cdot |V_r|^2 = & a_1^2 \cdot |V_r|^4 + a_1 \cdot b_1 \cdot P_r \cdot |V_r|^2 + a_1 \cdot b_2 \cdot Q_r \cdot |V_r|^2 \\ & + b_1^2 \cdot P_r^2 + a_1 \cdot b_1 \cdot P_r \cdot |V_r|^2 + b_1 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot Q_r \\ & + b_2^2 \cdot Q_r^2 + a_1 \cdot b_2 \cdot Q_r \cdot |V_r|^2 + b_1 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot Q_r \\ & + a_2^2 \cdot |V_r|^4 + a_2 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot |V_r|^2 - a_2 \cdot b_1 \cdot Q_r \cdot |V_r|^2 \\ & + b_2^2 \cdot P_r^2 + a_2 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot |V_r|^2 - b_1 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot Q_r \\ & + b_1^2 \cdot Q_r^2 - a_2 \cdot b_1 \cdot Q_r \cdot |V_r|^2 - b_1 \cdot b_2 \cdot P_r \cdot Q_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |V_s|^2 \cdot |V_r|^2 = & (a_1^2 + a_2^2) \cdot |V_r|^4 + [2 \cdot P_r \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_1) + 2 \cdot Q_r \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1)] \cdot |V_r|^2 \\ & + (b_1^2 + b_2^2) \cdot (P_r^2 + Q_r^2) \end{aligned}$$

$$|A|^2 \cdot |V_r|^4 + [2.P_r \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_1) + 2.Q_r \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1) - |V_s|^2] \cdot |V_r|^2 + |B|^2 \cdot (P_r^2 + Q_r^2) = 0$$

$$a = |A|^2,$$

$$b = [2.P_r \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_1) + 2.Q_r \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1) - |V_s|^2],$$

$$c = |B|^2 \cdot (P_r^2 + Q_r^2)$$

$x = |V_r|^2$ dönüşümü yapılarak denklem,

$a.x^2 + b.x + c = 0$ formundaki ikinci dereceden denkleme dönüştürülür.

$|V_r|_{1,2} = \pm \sqrt{x_{1,2}}$ 'den (+) işaretlisi göz önüne alınarak, gerilimler belirlenir.



EK B

P_{rerit} , V_{rerit} , δ_{rerit} İfadelerinin Çıkartılması

Öncelikle P_r ve Q_r ifadeleri, referanslar göz önüne alınarak belirlenir :

$V_s = V_s \angle 0$ hat başı gerilimi , $V_r = V_r \angle -\delta = V_r (\cos \delta - j \sin \delta)$ hat sonu gerilimi olmak üzere,

$V_s = A.V_r + B.I_r$ bağıntısından I_r akımı çekilerek,

$$I_r = \frac{V_s - A.V_r}{B} = \frac{V_s - (a_1 + ja_2).V_r.(\cos \delta - j \sin \delta)}{(b_1 + jb_2)} , \text{ akım ifadesi bulunur. Bu akımın}$$

eşleniği ise şu şekilde olacaktır:

$$I_r^* = \frac{V_s - A.V_r}{B} = \frac{V_s - (a_1 - ja_2).V_r.(\cos \delta + j \sin \delta)}{(b_1 - jb_2)} , \text{ bu ifade, } S_r = V_r \cdot I_r^* \text{ güç}$$

ifadesinde yerine konularak;

$$S_r = V_r.I_r^* = \frac{V_s.V_r.(\cos \delta - \sin \delta) - (a_1 - ja_2).V_r^2}{(b_1 - jb_2)} , \text{ bulunur. Bu ifade düzenlenerek;}$$

$$S_r = V_r.I_r^* = \frac{V_s.V_r.(\cos \delta - \sin \delta).(b_1 + jb_2) - (a_1 - ja_2).(b_1 + jb_2).V_r^2}{(b_1^2 + b_2^2)} ,$$

$$S_r = \frac{V_s.V_r.(b_1.\cos \delta + b_2.\sin \delta) - V_r^2.(a_1.b_1 + a_2.b_2)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

$$+ j \frac{V_s.V_r.(b_2.\cos \delta - b_1.\sin \delta) - V_r^2.(a_1.b_2 - a_2.b_1)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

şeklinde genel güç ifadesi

bulunur. Reel ve sanal kısımlar ayrılarak aktif ve reaktif güçler belirlenir :

$$P_r = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_1 \cdot \cos \delta + b_2 \cdot \sin \delta) - V_r^2 \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)}{(b_1^2 + b_2^2)} \quad (b.1)$$

$$Q_r = \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_2 \cdot \cos \delta - b_1 \cdot \sin \delta) - V_r^2 \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1)}{(b_1^2 + b_2^2)} \quad (b.2)$$

Bundan sonraki aşamada, 2 baralı bir sistem için Newton yük akışındaki jakobiye matris göz önüne alınarak, bu matrisin tekiliğinden hareketle kritik değerler belirlenir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_r \\ \Delta Q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial V_r} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial V_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_r \end{bmatrix}, \text{ ifadesindeki jakobiye aitt } f_1, f_2 \text{ değerleri, (b.1) ve}$$

(b.2) denklemlerinden oluşturulur:

$$f_1(V_s, V_r, \delta) = P_r - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_1 \cdot \cos \delta + b_2 \cdot \sin \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + \frac{V_r^2 \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

$$f_2(V_s, V_r, \delta) = Q_r - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (b_2 \cdot \cos \delta - b_1 \cdot \sin \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + \frac{V_r^2 \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} = 0 - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (-b_1 \cdot \sin \delta + b_2 \cdot \cos \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + 0$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial V_r} = 0 - \frac{V_s \cdot (b_2 \cdot \cos \delta - b_1 \cdot \sin \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + \frac{2 \cdot V_r \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \delta} = 0 - \frac{V_s \cdot V_r \cdot (-b_2 \cdot \sin \delta - b_1 \cdot \cos \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + 0$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_r} = 0 - \frac{V_s \cdot (b_1 \cdot \cos \delta + b_2 \cdot \sin \delta)}{(b_1^2 + b_2^2)} + \frac{2 \cdot V_r \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)}{(b_1^2 + b_2^2)}$$

biçiminde açık ifadeleri verilen jakobiye elemanlarının, matrisin tekil olması için

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial V_r} - \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial V_r} = 0 \text{ koşulunu sağlamaları yeterlidir. Başka bir deyişle matrisin,}$$

determinantı sıfır olmalıdır.

Verilen koşul içinde, kısmi türevlerin açık ifadeleri yerine konularak, ara işlemler ve düzenlemeler yapıldıktan sonra, iki baralı sistem için kritik noktada gerilimler arasında ;

$$V_s - 2.V_r.(a_2.\cos\delta + a_2.\sin\delta) = 0 \quad (b.3)$$

ifadesi bulunur. Kritik güç açısını belirlemek için, (b.1) ve (b.2) güç ifadelerinde V_s yerine (b.3) ifadesindeki V_r ve δ cinsinden elde edilmiş olan değeri yerine konulur ve elde edilen ifadeler, aktif ve reaktif güçler arasındaki $Q_r = P_r.\tan\varphi$ bağıntısında kullanılarak kritik güç açısı belirlenir. Ara işlemlerin sonucunda,

$$\tan 2\delta = \frac{a_1(b_2 - b_1 \tan \varphi) + a_2(b_1 + b_2 \tan \varphi)}{a_1(b_1 + b_2 \tan \varphi) + a_2(-b_2 + b_1 \tan \varphi)} \quad \text{ifadesi bulunur.}$$

$$K_1 = a_1(b_2 - b_1 \tan \varphi) + a_2(b_1 + b_2 \tan \varphi),$$

$$K_2 = a_1(b_1 + b_2 \tan \varphi) + a_2(-b_2 + b_1 \tan \varphi) \quad \text{kısaltmalarıyla,}$$

$$\tan 2\delta = \frac{K_1}{K_2}, \quad 2\delta = \tan^{-1}\left(\frac{K_1}{K_2}\right) = \frac{\pi}{2} - \cotan^{-1}\left(\frac{K_1}{K_2}\right)$$

$$2\delta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{K_2}{K_1}\right) = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\left(-\frac{K_2}{K_1}\right) \quad \text{ifadesi bulunur.}$$

Böylece kritik nokta için doğrudan, hattın A ve B sabitleri ile güç açısı (φ) cinsinden kritik yük açısı belirlenmiş olmaktadır.

$$\delta_{\text{crit}} = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(-\frac{K_2}{K_1}\right) \quad (b.4)$$

δ_{crit} ifadesi, (b.3) ' yerine konularak, kritik hat sonu gerilimi bulunur ;

$$V_{\text{rcrit}} = \frac{V_s}{2.(a_1.\cos\delta_{\text{crit}} + a_2.\sin\delta_{\text{crit}})} \quad (b.5)$$

kritik güç açısı (b.4) ve kritik gerilim (b.5) değerlerini veren ifadeler, aktif güç (b.1) ifadesinde yerine konularak, hat sonundan çekilebilecek gücün kritik değeri belirlenmiş olur.

$$P_{\text{rect}} = \frac{V_s \cdot V_{\text{rect}} \cdot (b_1 \cdot \cos \delta_{\text{crt}} + b_2 \cdot \sin \delta_{\text{crt}}) - V_{\text{rect}}^2 \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)}{(b_1^2 + b_2^2)} \quad \text{ifadesi bulunur.}$$

Burada,

$b_1 \cdot \cos \delta_{\text{crt}} + b_2 \cdot \sin \delta_{\text{crt}} = K_3$ kısaltması ve kritik gerilim ifadesinde de,

$a_1 \cos \delta_{\text{crt}} + a_2 \sin \delta_{\text{crt}} = K_4$ kısaltması yapılarak, $V_{\text{rect}} = V_s / 2 \cdot K_4$ şeklinde yerine konulur ve ifade yeniden düzenlenirse,

$$P_{\text{rect}} = \frac{V_s^2 \cdot (2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2))}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4 \cdot K_4^2} \quad (\text{b.6})$$

kritik güç ifadesi de elde edilmiş olur.

EK.C

Kayıplı Hat İçin , Karakteristik Empedans ve Doğal Yük (SIL) İfadelerinin Çıkarılması

Frekans domeninde , , R : Hattın direnci, L:Hattın endüktansı, C: Hattın şönt kapasitesi olmak üzere

$$\text{Kayıp faktörü : } \alpha = \frac{R}{\omega L}$$

$$\text{Kayıpsız hattın karakteristik empedansı , } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}}$$

Kayıplı hattın karakteristik empedansı,

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C} \cdot \frac{j\omega L}{j\omega L}} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} \cdot \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega L}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{1 + \frac{R}{j\omega L}}$$

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{1 - j \frac{R}{\omega L}} = Z_0 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2}$$

$Z'_0 = (Z_1 + jZ_2) = Z_0 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2}$, her iki tarafın karesi alınıp, karşılıklı reel ve imajiner kısımlar eşitlenerek aşağıdaki işlemler gerçekleşir ,

$$Z_1^2 - Z_2^2 + j2.Z_1.Z_2 = Z_0^2 - j\alpha.Z_0^2$$

$$Z_1^2 - Z_2^2 = Z_0^2 \tag{C.1}$$

$$2.Z_1.Z_2 = -\alpha.Z_0^2 \tag{C.2}$$

(C.2) ' den $Z_2 = -\alpha.Z_0^2 / 2.Z_1$ çekilerek (C.1) ' de yerine konulursa,

$$Z_1^2 - \frac{\alpha^2.Z_0^4}{4.Z_1^2} = Z_0^2 \text{ elde edilir, düzenleme ile ,}$$

$$4.Z_1^4 - 4.Z_0^2.Z_1^2 - \alpha^2.Z_0^4 = 0 \text{ ifadesi bulunur.} \tag{C.3}$$

(C.3) denkleminde, $X = Z_1^2$ dönüşümü yapılarak 2. dereceden bir denklem elde edilir :

$$4.X^2 - 4.Z_0^2.X - \alpha^2.Z_0^4 = 0 \tag{C.4}$$

(C.3) ' denkleminde ait köklerden (C.1) ve (C.2) eşitliklerini sağlayan kök seçilir :

$$X = \frac{Z_0^2 \cdot [1 + (1 + \alpha^2)^{1/2}]}{2} \quad (C.5)$$

$Z_1 = X^{1/2}$ ters dönüşümü yapılarak, karakteristik empedansın reel kısmı belirlenir :

$$Z_1 = Z_0 \cdot \left[\frac{1 + (1 + \alpha^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2} \quad (C.6)$$

(C.1) ' den Z_2 çekilerek;

$$Z_2^2 = Z_1^2 - Z_0^2 = Z_0 \cdot \left[\frac{1 + (1 + \alpha^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2} \text{ ifadesinin + kare kökü alınarak,}$$

$$Z_2 = -Z_0 \cdot \left[\frac{(1 + \alpha^2)^{1/2} - 1}{2} \right]^{1/2} \quad (C.7)$$

karakteristik empedansın imajiner kısmı belirlenir.

SIL ' ın ÇIKARILMASI

$$S = \frac{V_N^2}{Z_0'} = \frac{V_N^2}{Z_1 + jZ_2} = \frac{V_N^2 \cdot (Z_1 - jZ_2)}{Z_1^2 + Z_2^2} = \frac{V_N^2}{|Z_0'|^2} \cdot (Z_1 - jZ_2) \quad (C.8)$$

$$SIL = \frac{V_N^2}{|Z_0'|^2} \cdot Z_1 \quad (C.9)$$

(C.6) ve (C.7) ifadelerinin (C.9) ' da yerine konularak alt işlemlerin yapılmasıyla,

$$SIL = \frac{V_N^2}{Z_0} \cdot \frac{[(1 + \alpha^2)^{1/2} + 1]^{1/2}}{[2 \cdot (1 + \alpha^2)]^{1/2}} \quad (C.10)$$

elde edilir. Yine (C.8) ' e dayanarak;

$$Q_{SIL} = \frac{V_N^2}{|Z_0'|^2} \cdot (-Z_2) \quad (C.11)$$

yazılabilir ve (C.6) ve (C.7) ifadelerinin (C.11) ' da yerine konularak alt işlemlerin yapılmasıyla,

$$Q_{SIL} = \frac{V_N^2}{Z_0} \cdot \frac{[(1 + \alpha^2)^{1/2} - 1]^{1/2}}{[2 \cdot (1 + \alpha^2)]^{1/2}} \quad (C.12)$$

ifadesi de elde edilmiş olur.

Ek.B ' de elde edilen P_{crit} ifadesi (SIL) ' a bölünerek, kayıplı bir hattın doğal yükü cinsinden kritik gücün birim (pu) değeri belirlenmiş olur. Özetle,

$$P_{crit} = \frac{V_s^2 \cdot (2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2))}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4 \cdot K_4^2}, \quad SIL = \frac{V_N^2}{Z_0} \cdot \frac{[(1 + \alpha^2)^{1/2} + 1]^{1/2}}{[2 \cdot (1 + \alpha^2)]^{1/2}}$$

$$P_{crit(pu-SIL)} = \frac{P_{crit}}{SIL} = \frac{Z_0 \cdot [2 \cdot (1 + \alpha^2)]^{1/2} \cdot [2 \cdot K_3 \cdot K_4 - (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2)]}{[(1 + \alpha^2)^{1/2} + 1]^{1/2} \cdot (b_1^2 + b_2^2) \cdot 4 \cdot K_4^2} \quad (C.13)$$

ifadesi elde edilir.

Ek D

Hat Modelleri için A , B Sabitlerinin Belirlenmesi

γ : Propagasyon sabiti, $\alpha = R/\omega L$ (kayıp faktörü), X_c : Seri kompanzatör reaktansı, b : şönt reaktör admitansı, $K_s = X_c/\omega L$: seri kompanzasyon oranı, $K_d = b/\omega C$ şönt kompanzasyon oranı, $\theta = (\omega L \cdot \omega C)^{1/2}$ hat açısı (kayıpsız hat), $\theta' = \theta \cdot (1-j\alpha)^{1/2}$ (hat açısı (kayıplı hat) ifadeleri kullanılarak 6 mod için A,B sabitleri şöyle belirlenmiştir :

1. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot (\cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell) - j \frac{b_r}{2} \cdot (Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell)$$

$$B = \left(1 - \frac{X_c}{2}\right) \cdot (\cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell) + (Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \sinh \gamma \ell)$$

$$A = \left(1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{4}\right) \cdot (\cosh \gamma \ell - \frac{j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \sinh \gamma \ell}{2 \cdot (1-j\alpha)^{1/2}}) - \frac{j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1-j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell}{2} - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2 \cdot \cosh \gamma \ell}{4}$$

$$B = Z_o \cdot ((1-j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell - \frac{K_s^2 \cdot \theta^2 \cdot \sinh \gamma \ell}{4 \cdot (1-j\alpha)^{1/2}} - j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \sinh \gamma \ell)$$

2. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot \cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{b_r}{2} \cdot \left(\left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell\right)$$

$$B = \left(-j \frac{X_c}{2}\right) \cdot \left(\left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot \cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell\right) + \left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot \left(\left(1 - \frac{X_c \cdot b_r}{4}\right) \cdot Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell\right)$$

$$A = \left(1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{4}\right) \cdot \left(\cosh \gamma \ell - \frac{j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell}{2}\right) - \frac{j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \sinh \gamma \ell}{2} - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2 \cdot \cosh \gamma \ell}{4}$$

$$B = Z_o' \cdot \left(\left(1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{4}\right) \cdot \left(\left(1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{4}\right) \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell - \frac{j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \cosh \gamma \ell}{2}\right) - \frac{K_s^2 \cdot \theta^2 \cdot \sinh \gamma \ell}{4 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2}} - \frac{j \cdot K_1 \cdot K_d \cdot \theta \cdot \cosh \gamma \ell}{2}\right)$$

burada;

$$K_1 = \left(1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{4}\right) \text{ kısaltması kullanılmıştır.}$$

3. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \cosh \gamma \ell \cdot (\cosh \gamma \ell - j \frac{b_r}{2} \cdot Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell) + (-jX_c \cdot \cosh \gamma \ell + Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell) \cdot (\frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell - j \frac{b_r}{2} \cdot Z_o' \cdot \cosh \gamma \ell)$$

$$B = \cosh \gamma \ell \cdot (Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell) + (-jX_c \cdot \cosh \gamma \ell + Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell) \cdot \cosh \gamma \ell$$

$$A = (1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{2}) \cdot \cosh^2 \gamma \ell + \sinh^2 \gamma \ell - \frac{j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell}{(1 - j\alpha)^{1/2}} - j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$B = Z_o \cdot (2 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell - j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \cosh^2 \gamma \ell)$$

4. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix}$$

$$A = \cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$B = Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell - jX_c \cdot \cosh \gamma \ell$$

$$A = \cosh \gamma \ell - \frac{j \cdot K_d \cdot \theta \cdot \sinh \gamma \ell}{(1 - j\alpha)^{1/2}}$$

$$B = Z_o \cdot ((1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell - j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \cosh \gamma \ell)$$

5. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \cosh \gamma \ell - jb_r \cdot Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$B = -jX_c \cdot \cosh \gamma \ell + (1 - b_r \cdot X_c) Z_o' \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$A = \cosh \gamma \ell - j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$B = Z_o \cdot ((1 - j\alpha)^{1/2} \cdot (1 - K_s \cdot K_d \cdot \theta^2 \cdot \sinh \gamma \ell) - j \cdot K_s \cdot \cosh \gamma \ell)$$

6. Model

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_r & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh \gamma \ell & Z_o' \sinh \gamma \ell \\ Y_o' \sinh \gamma \ell & \cosh \gamma \ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \cosh \gamma \ell \cdot (\cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell - jb_r \cdot (Z_o' \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell)) \cdot \\ + \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell \cdot (Z_o' \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell)$$

$$B = (-j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell + Z_o' \sinh \gamma \ell) \cdot (\cosh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell - jb_r \cdot (Z_o' \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell)) + \\ + \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell \cdot (-j \frac{X_c}{2} \cdot \frac{1}{Z_o'} \cdot \sinh \gamma \ell + \cosh \gamma \ell) \cdot (Z_o' \sinh \gamma \ell - j \frac{X_c}{2} \cdot \cosh \gamma \ell)$$

$$A = (1 - \frac{K_s \cdot K_d \cdot \theta^2}{2}) \cdot \cosh^2 \gamma \ell + \sinh^2 \gamma \ell - \frac{j \cdot K_s \cdot \theta \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell}{(1 - j\alpha)^{1/2}} - j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell$$

$$B = Z_o \cdot (2 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell - \frac{K_s^2 \cdot \theta^2 \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell}{2 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2}} - K_s \cdot K_d \cdot \theta^2 \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \cosh \gamma \ell \cdot \sinh \gamma \ell - \frac{j \cdot K_s^2 \cdot K_d \cdot \theta^3 \cdot \cosh^2 \gamma \ell}{4} - j \cdot K_s \cdot \theta \cdot (\cosh^2 \gamma \ell + \sinh^2 \gamma \ell) - j \cdot K_d \cdot \theta \cdot (1 - j\alpha)^{1/2} \cdot \sinh^2 \gamma \ell)$$

EK E

Asenkron Motorun Dinamik Denkleminin Hareket Denkleminden Türetilmesi

P_{ek} : Elektriksel giriş gücü, P_m : Mekanik çıkış gücü,
 M_e : Rotoru etkileyen elektriksel moment, M_y : Yük momenti,
 ω : açılmal hız, ω_o : senkron açılmal hız, s : kayma

$$I_k \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_y \quad (\text{hareket denklemleri}) \quad (E.1)$$

$$s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o} \quad , \quad \omega = \omega_o \cdot (1 - s) \quad , \quad \frac{d\omega}{dt} = -\omega_o \cdot \frac{ds}{dt}$$

$$-I_k \cdot \omega_o \cdot \frac{ds}{dt} = M_e - M_y \quad \quad I_k \cdot \omega_o \cdot \frac{ds}{dt} = M_y - M_e$$

Sürekli halde :

$$P_{ek}(1 - s) - P_m = 0 \quad , \quad P_{ek} \cdot \frac{\omega}{\omega_o} - P_m = 0 \quad , \quad \frac{P_{ek}}{\omega_o} - \frac{P_m}{\omega} = 0 \quad , \quad M_y - M_e = 0$$

$$I_k \cdot \omega_o \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_{ek}}{\omega_o} \quad , \quad \frac{ds}{dt} = \frac{P_m}{I_k \cdot \omega_o^2 \cdot (1 - s)} - \frac{P_{ek}}{I_k \cdot \omega_o^2}$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{I_k \cdot \omega_o^2} \cdot \left(\frac{P_m}{(1 - s)} - P_{ek} \right) \quad (E.2)$$

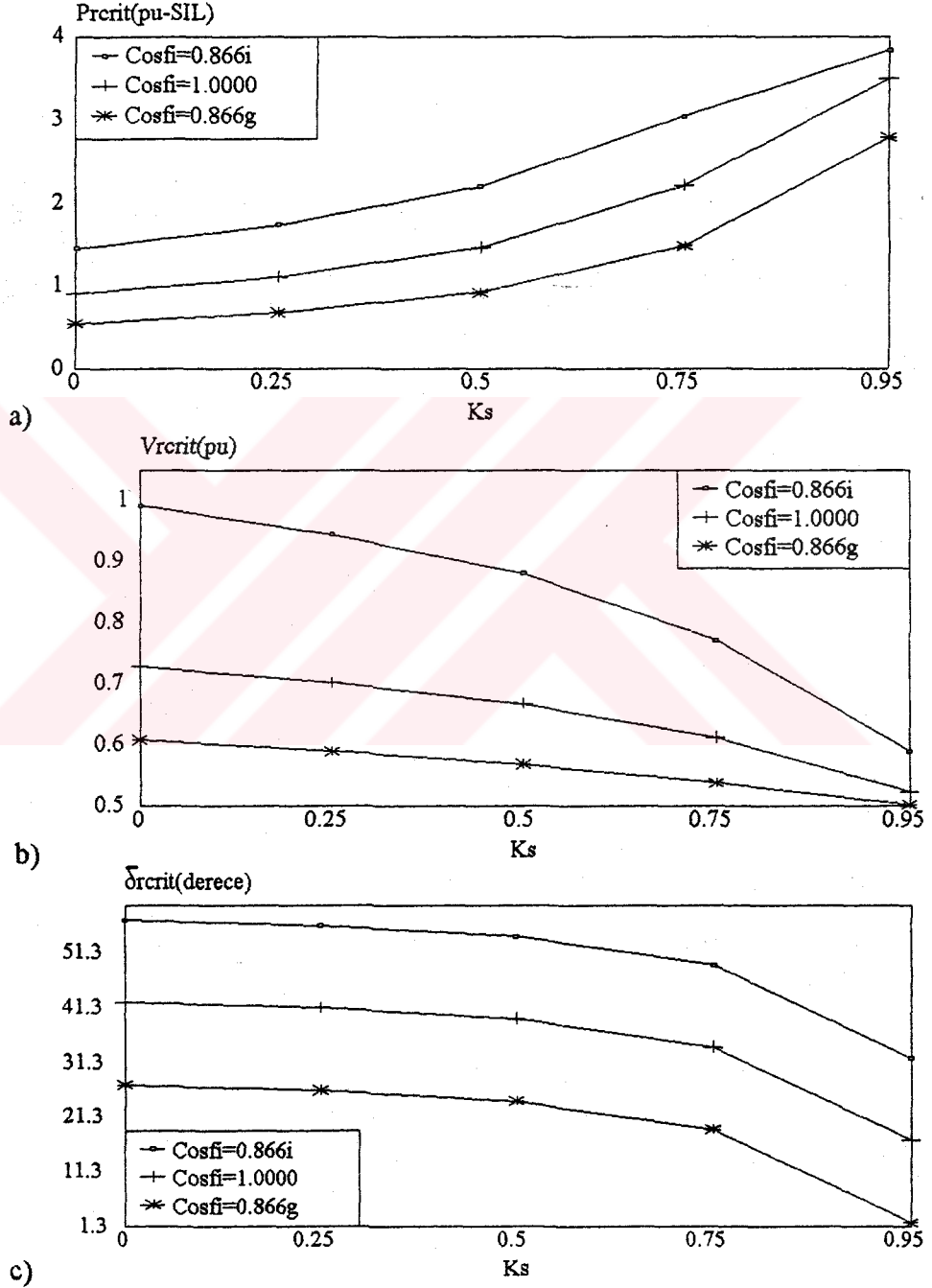
şeklinde Motorun dinamik denklemleri türetilir.

Veya, açılmal momentum için ($M = I_k \cdot \omega_o$) , $M \cdot \omega = 2.H.S_B$ ifadesi kullanılarak (S_B : makinanın baz gücü, H : atalet momenti sabiti), E.2 denklemleri aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir :

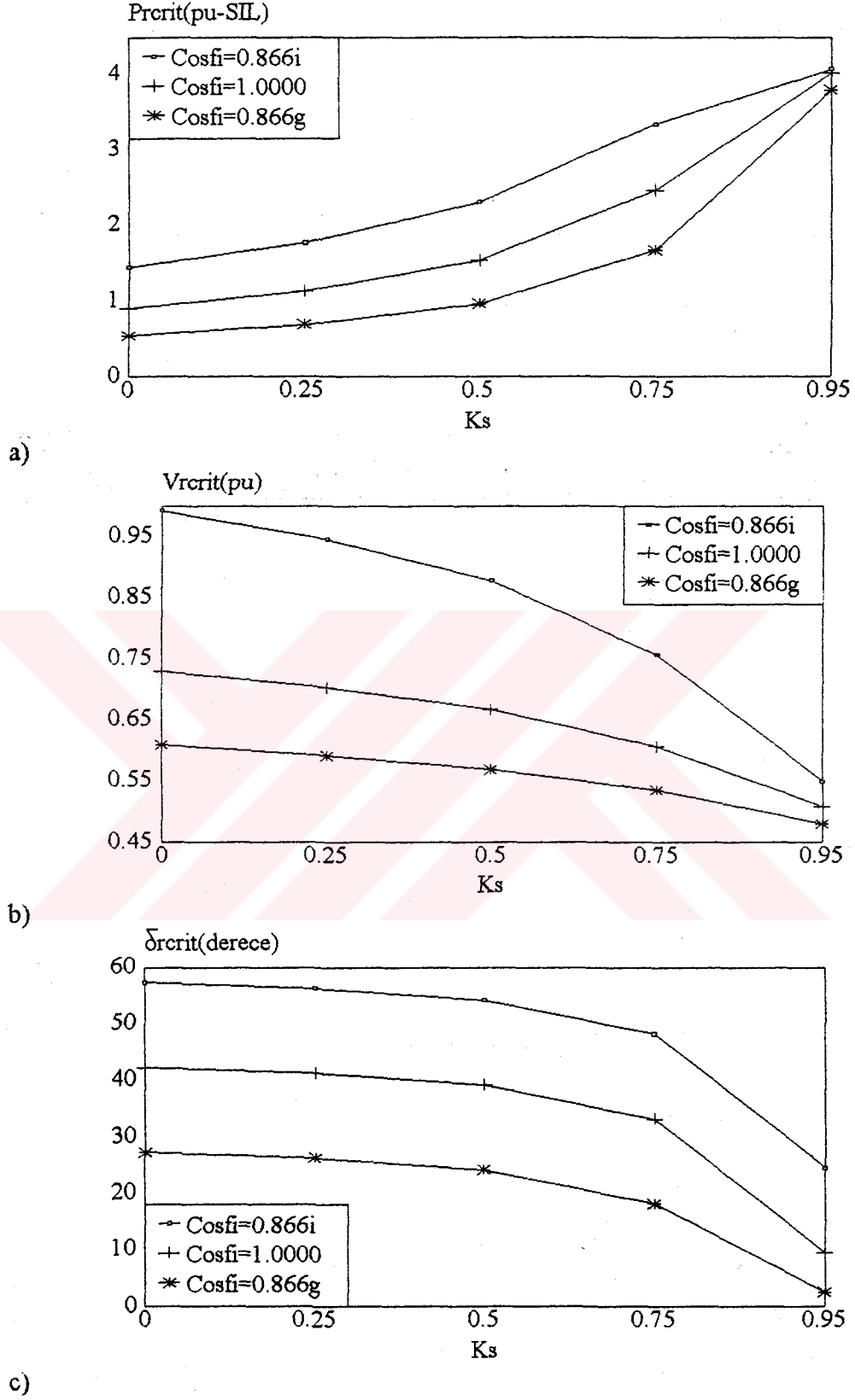
$$\frac{ds}{dt} = \frac{(\omega / \omega_o)}{2.H.S_B} \cdot \left(\frac{P_m}{(1 - s)} - P_{ek} \right) \quad (E.3)$$

EK F

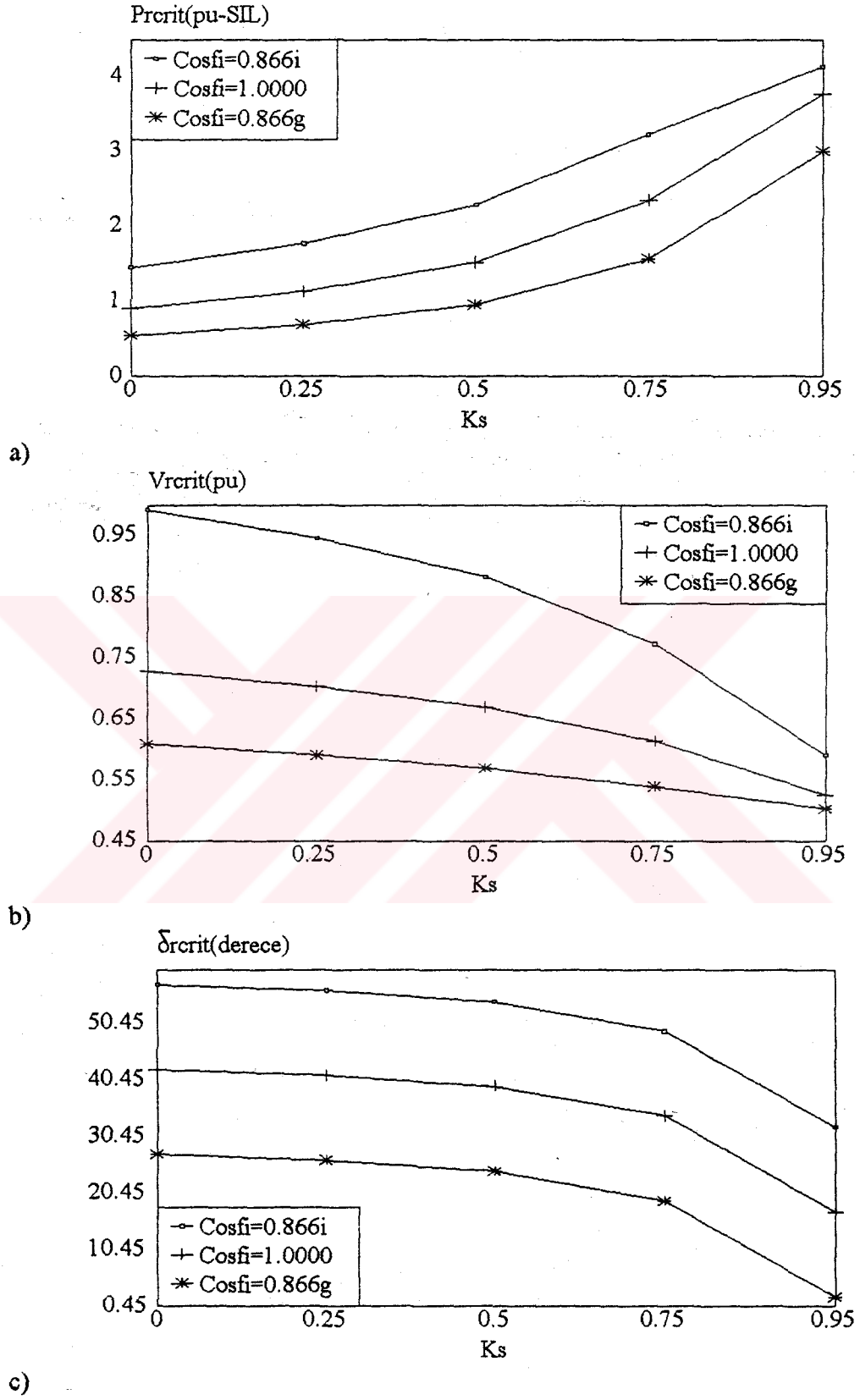
Hat Modelleri için Kritik Değerlere İlişkin Eğriler



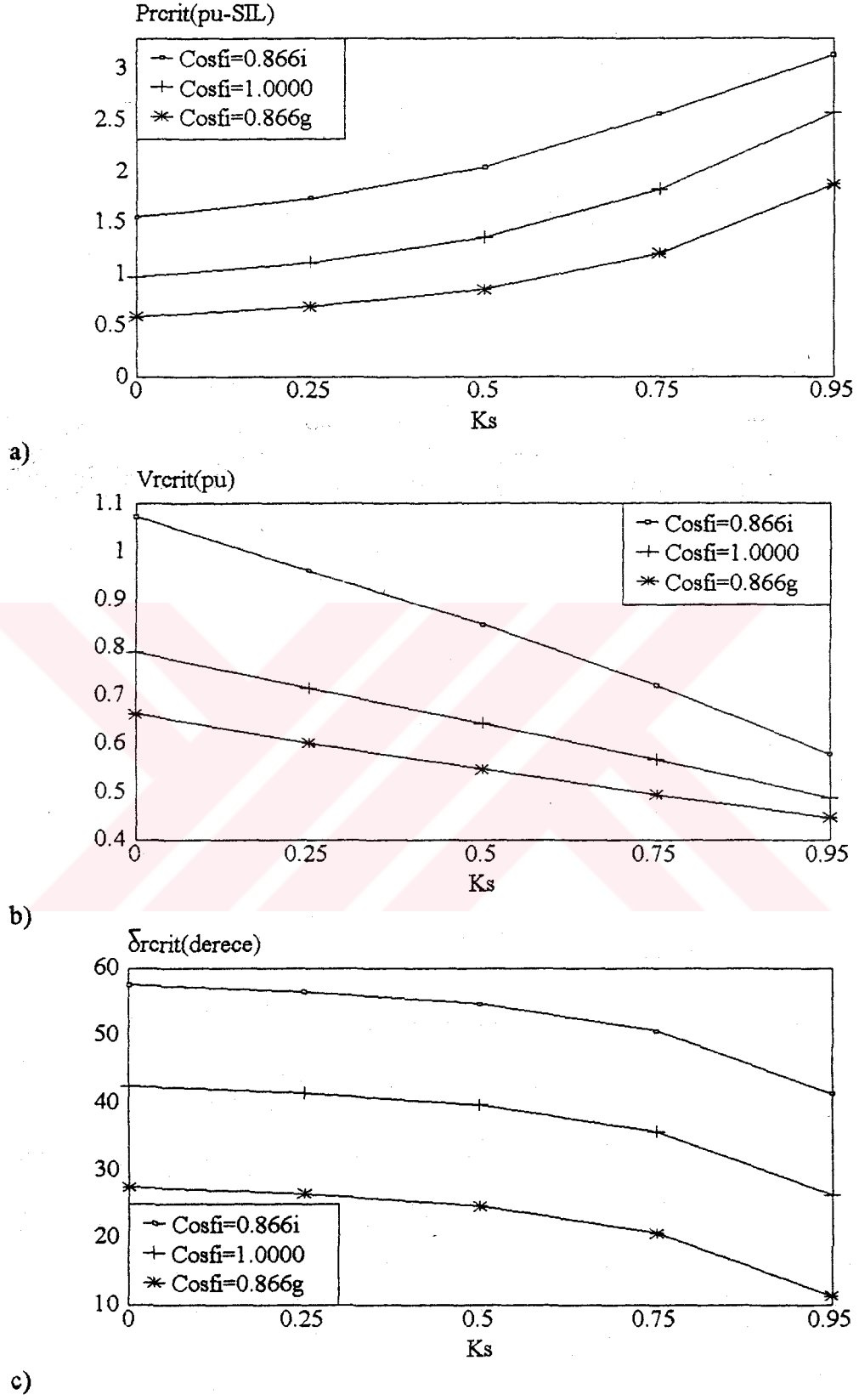
Şekil F.1. Model 1 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



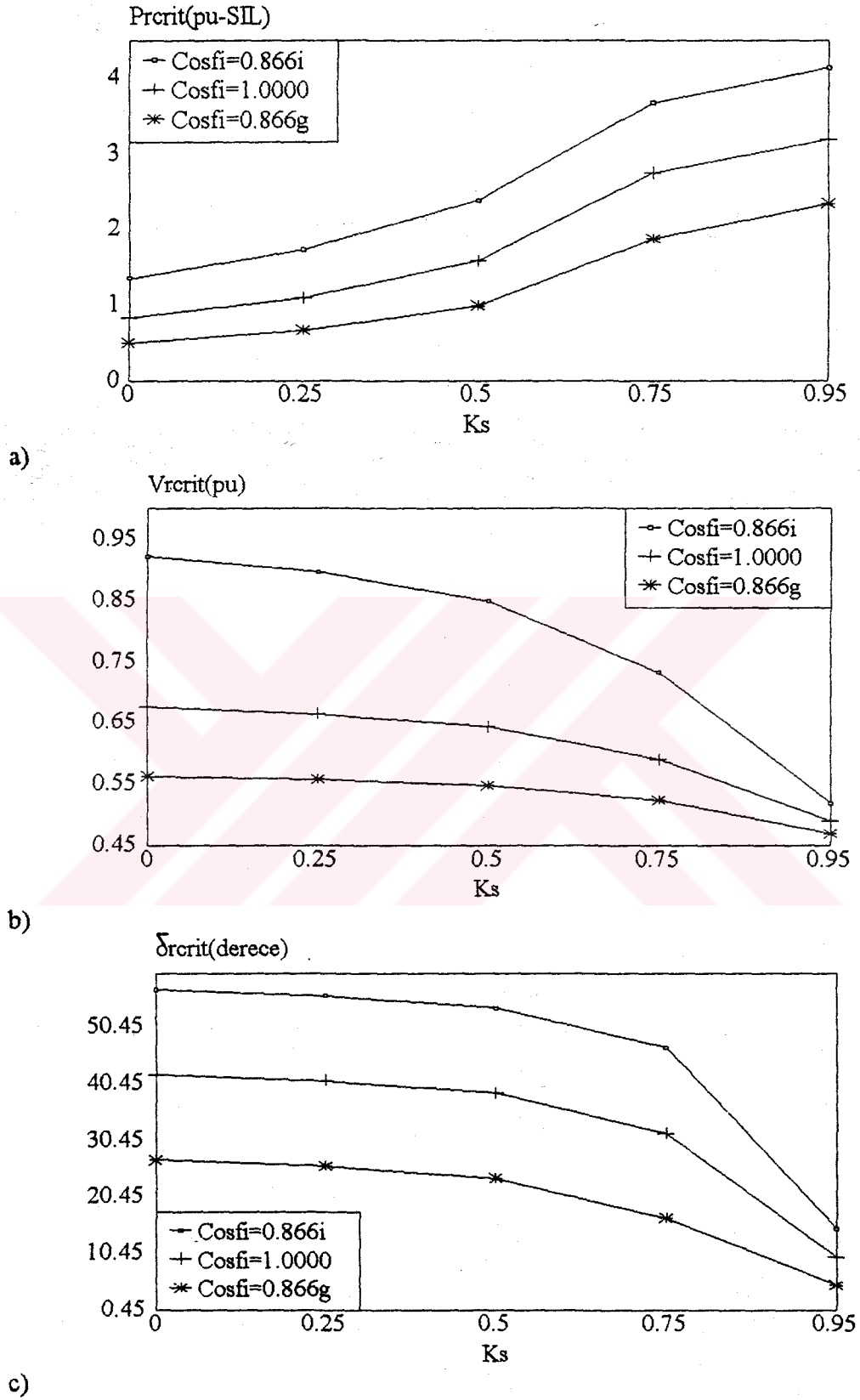
Şekil F.2. Model 2 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



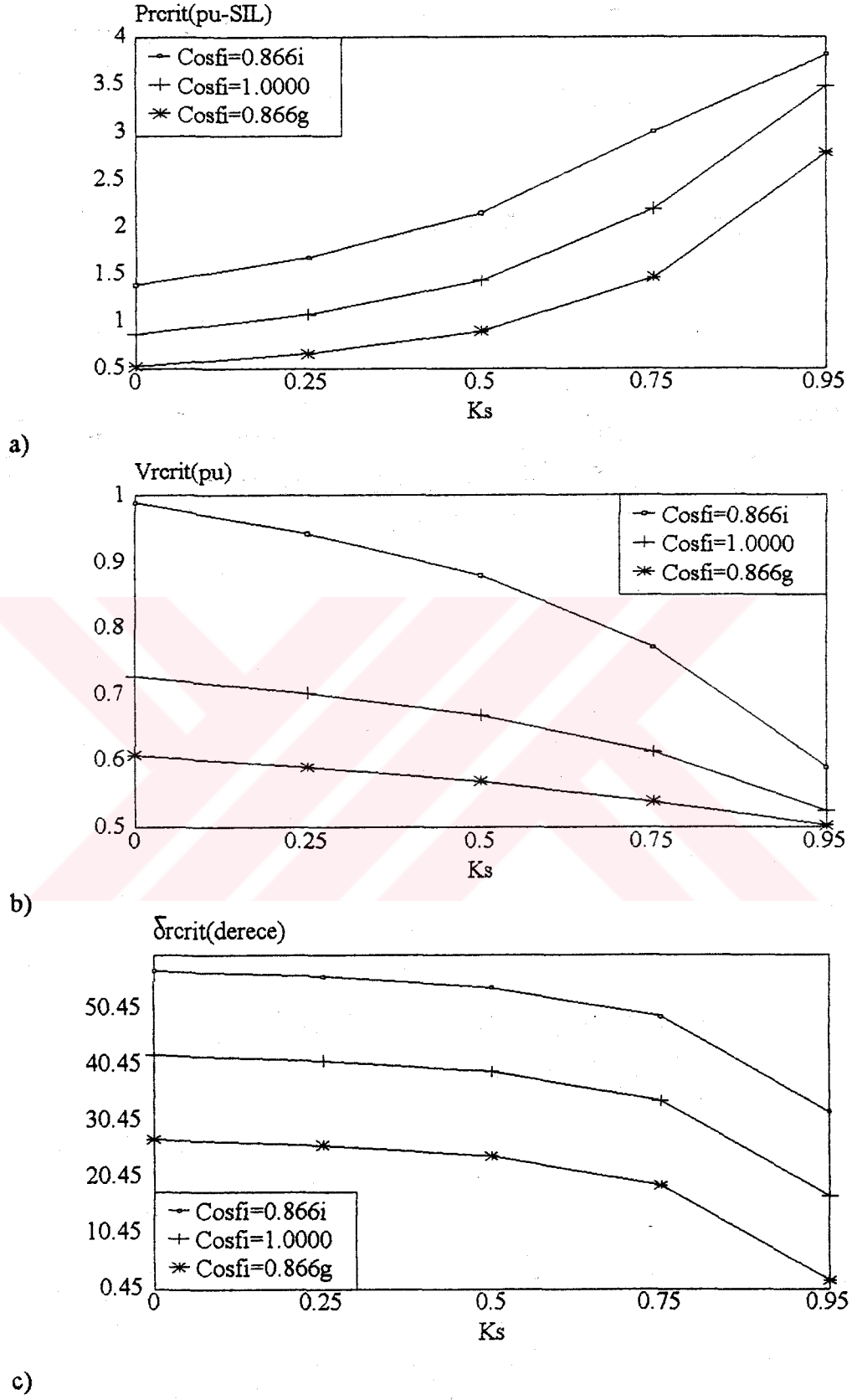
Şekil F.3. Model 3 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



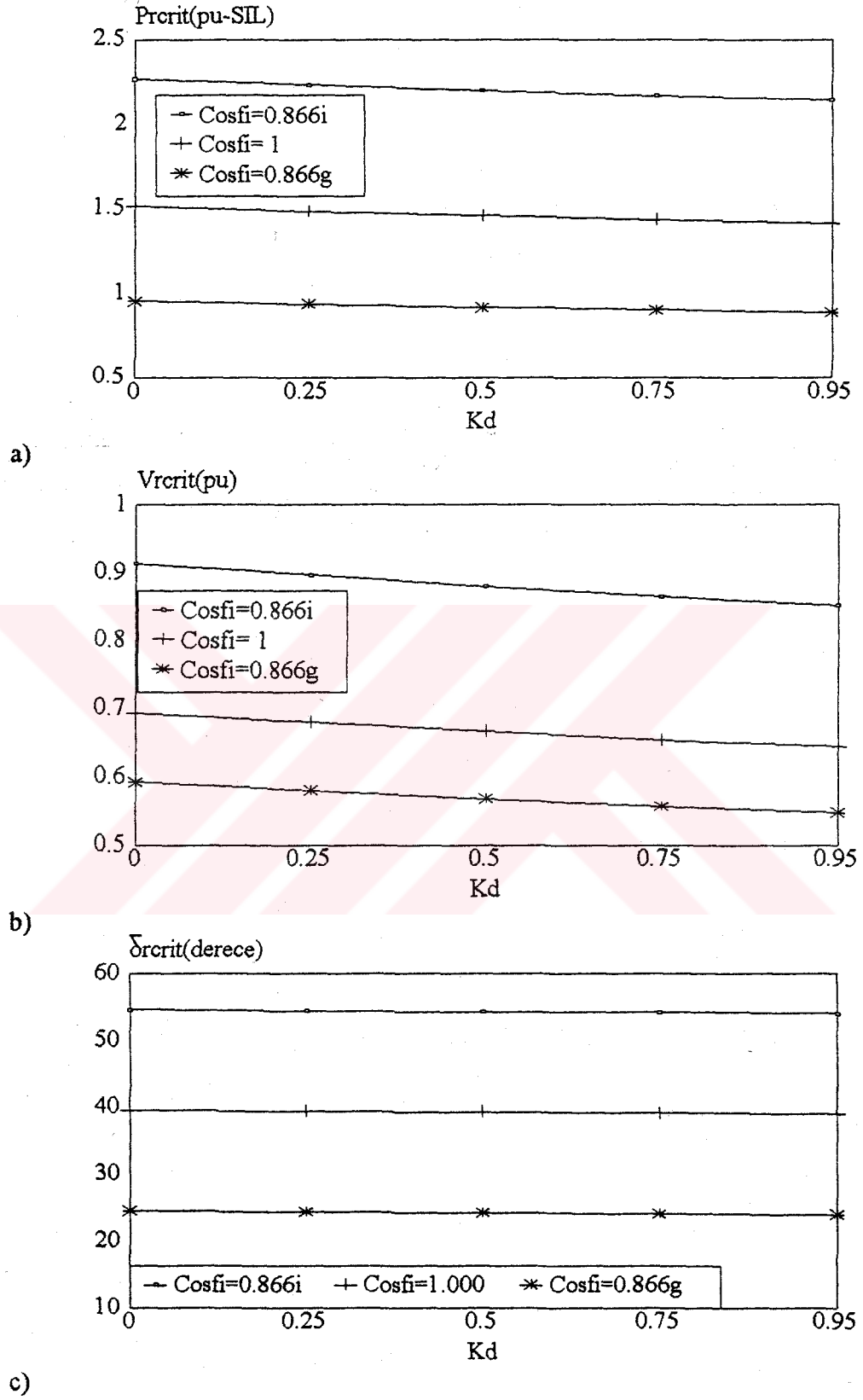
Şekil F.4. Model 4 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



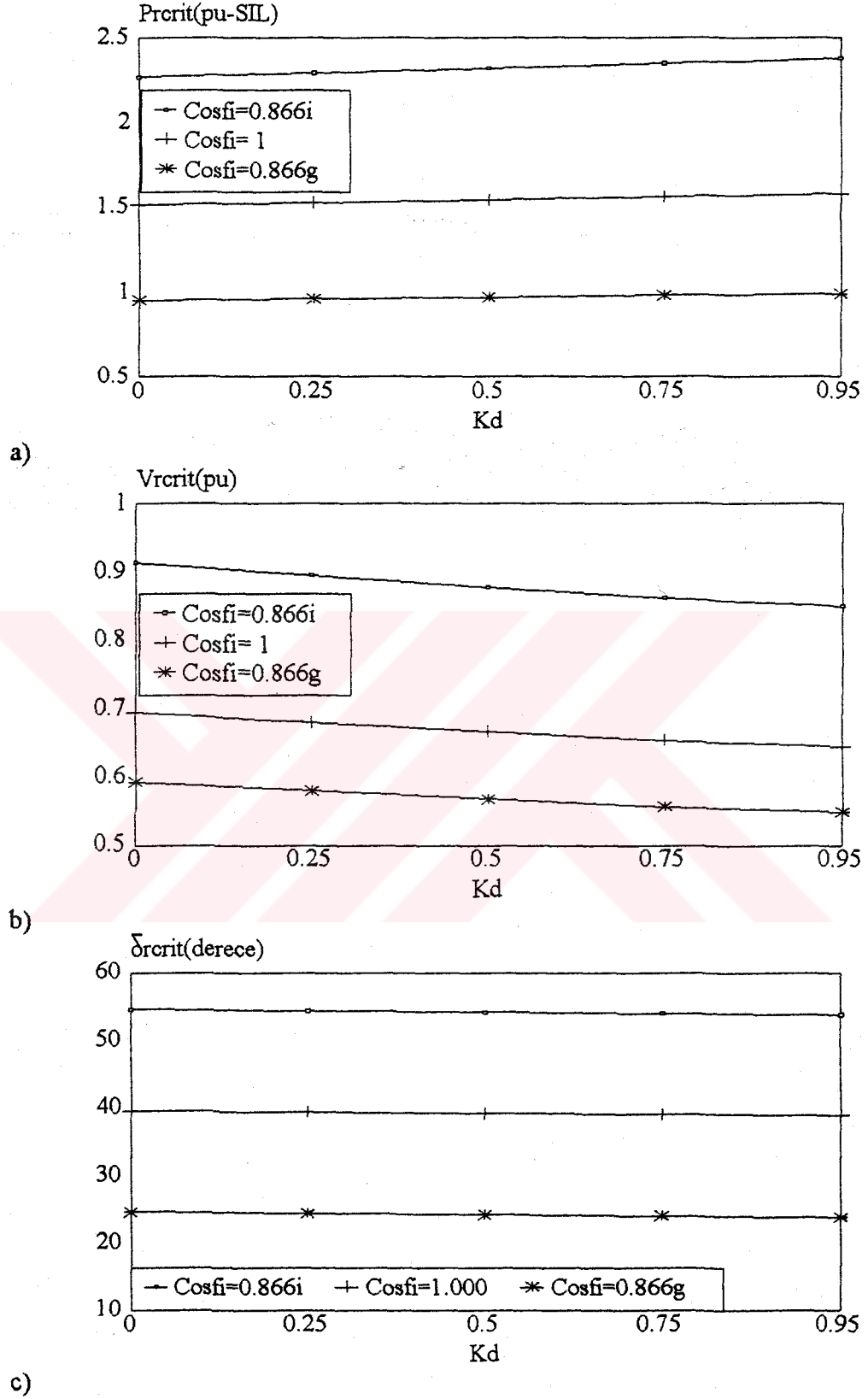
Şekil F.5. Model 5 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



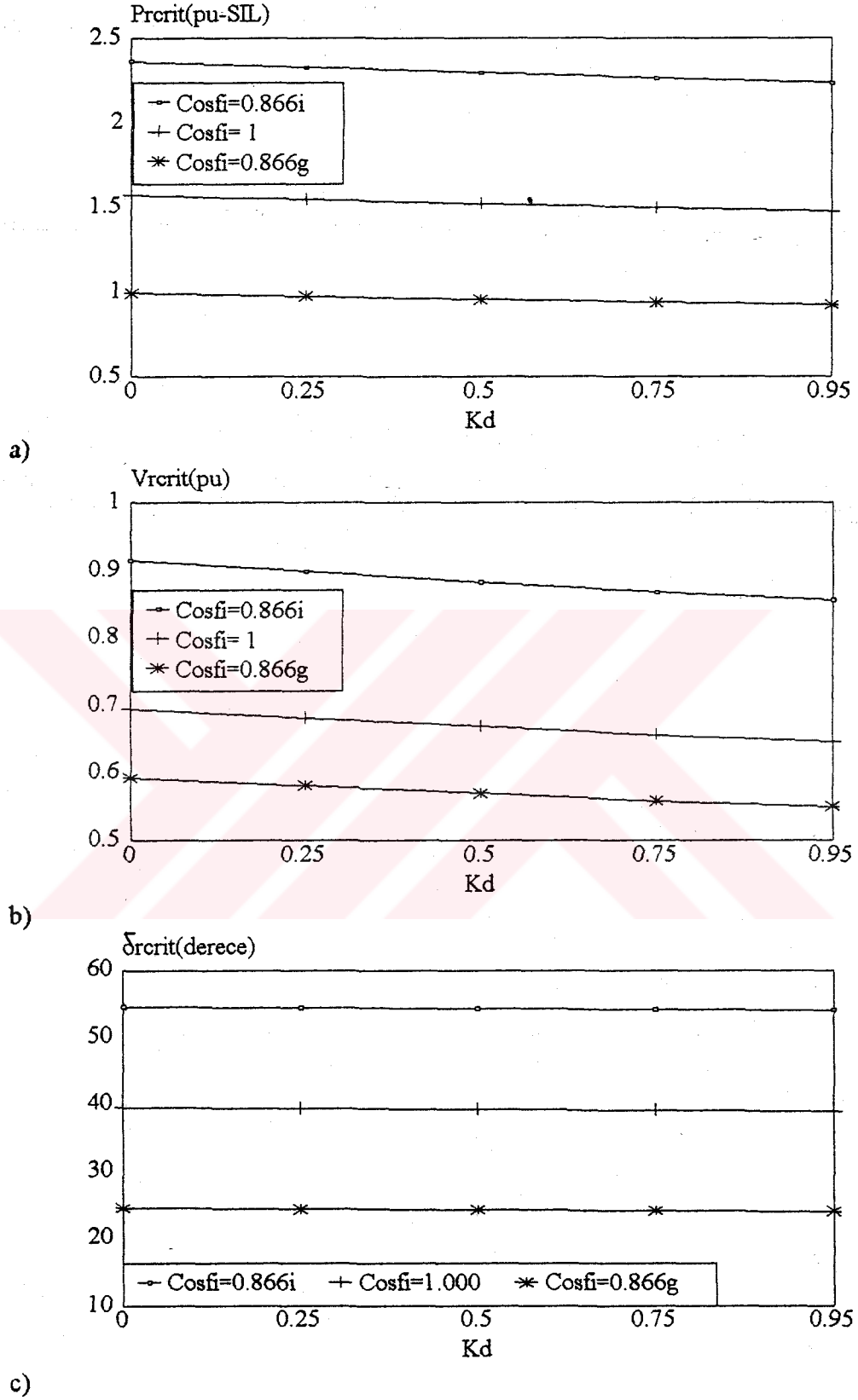
Şekil F.6. Model 6 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_d = 0.5$)



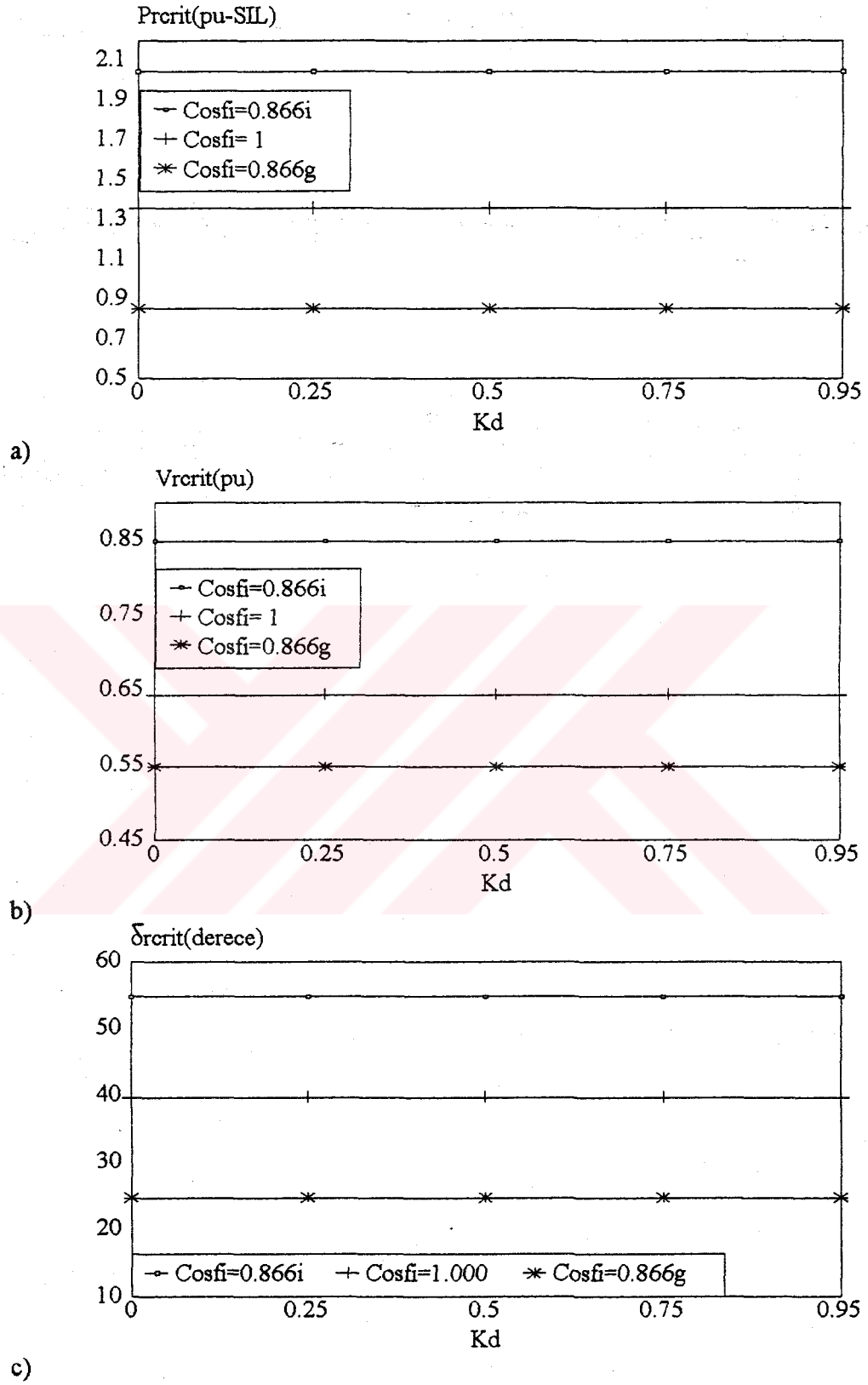
Şekil F.7. Model 1 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



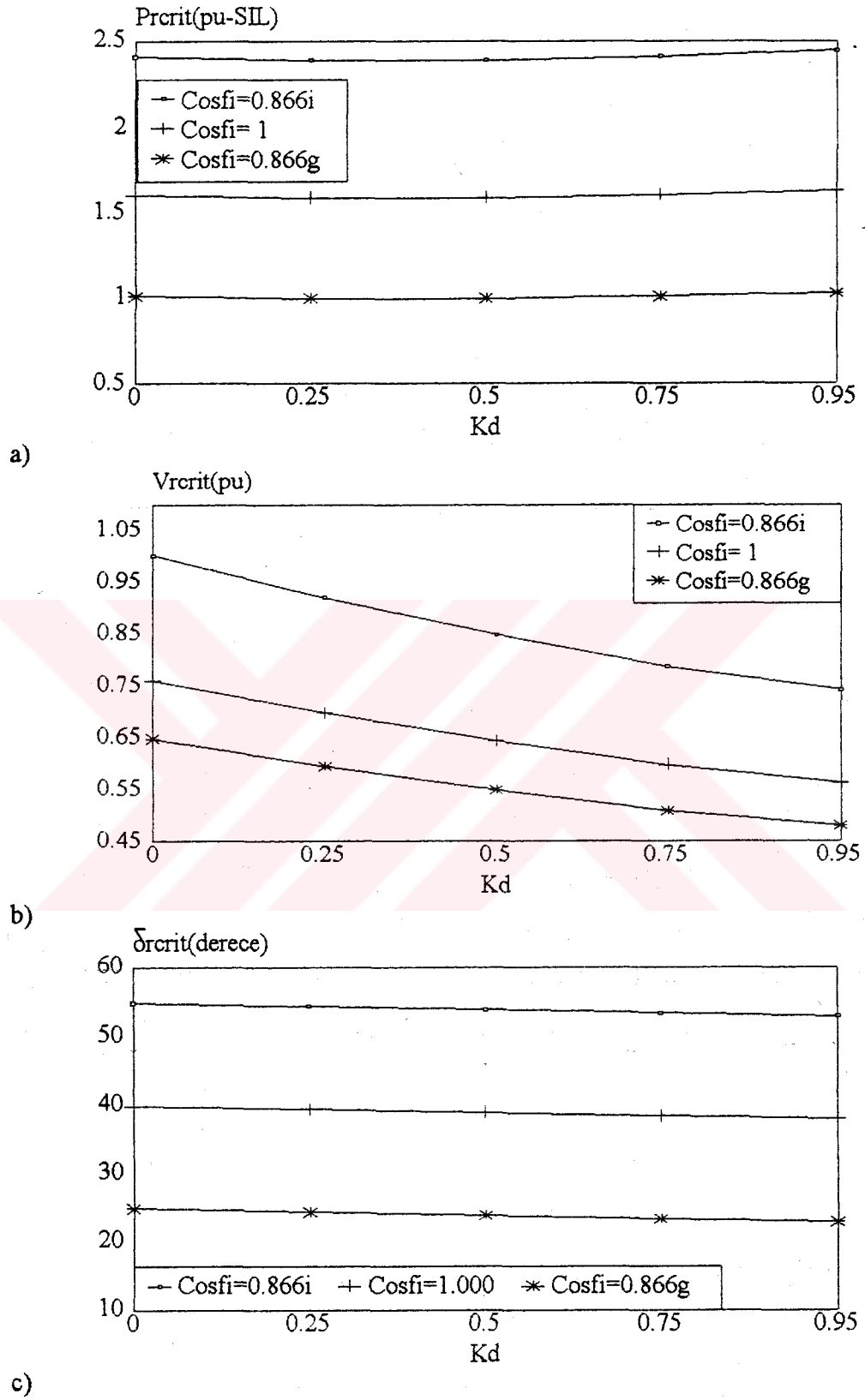
Şekil F.8. Model 2 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



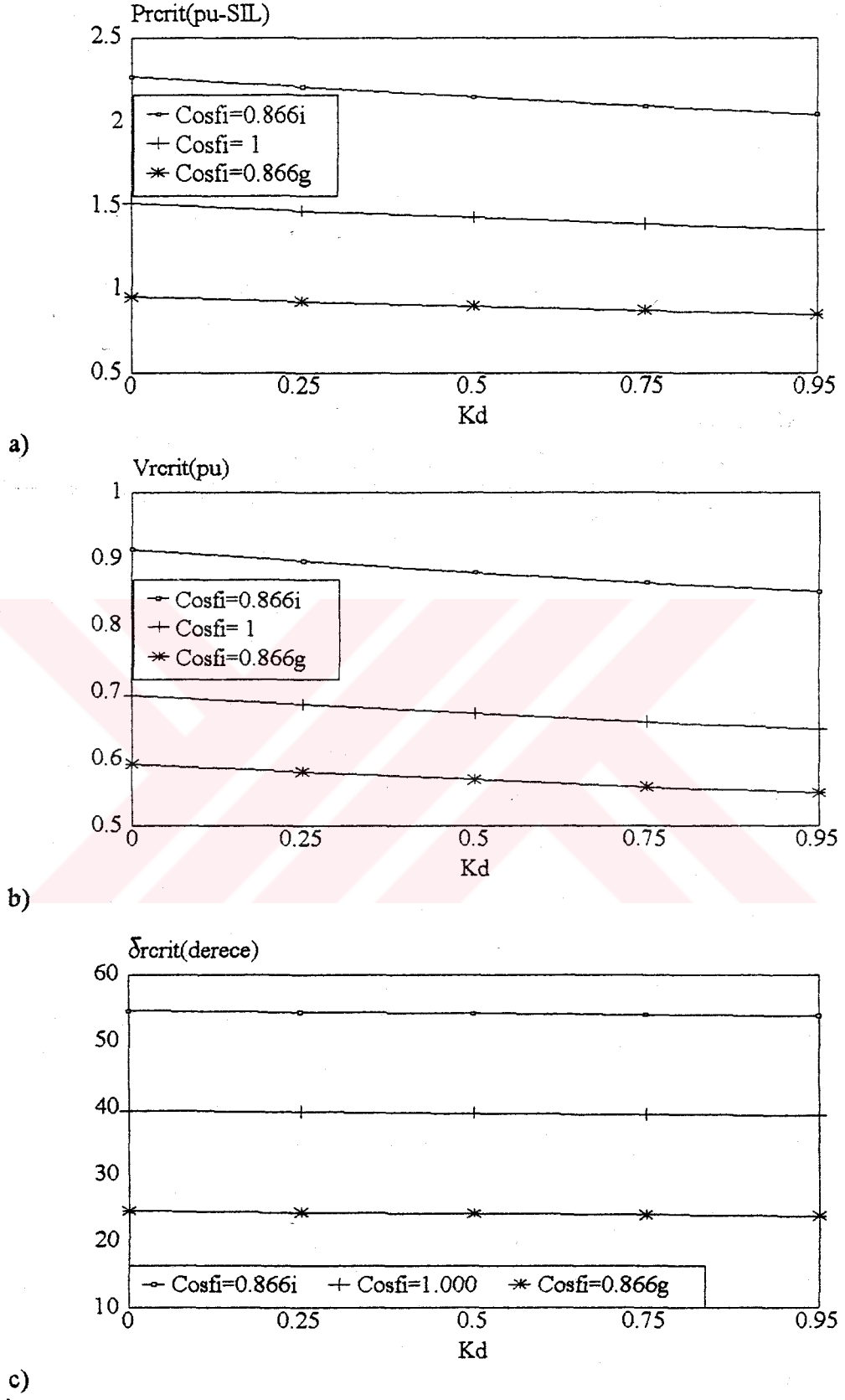
Şekil F.9. Model 3 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



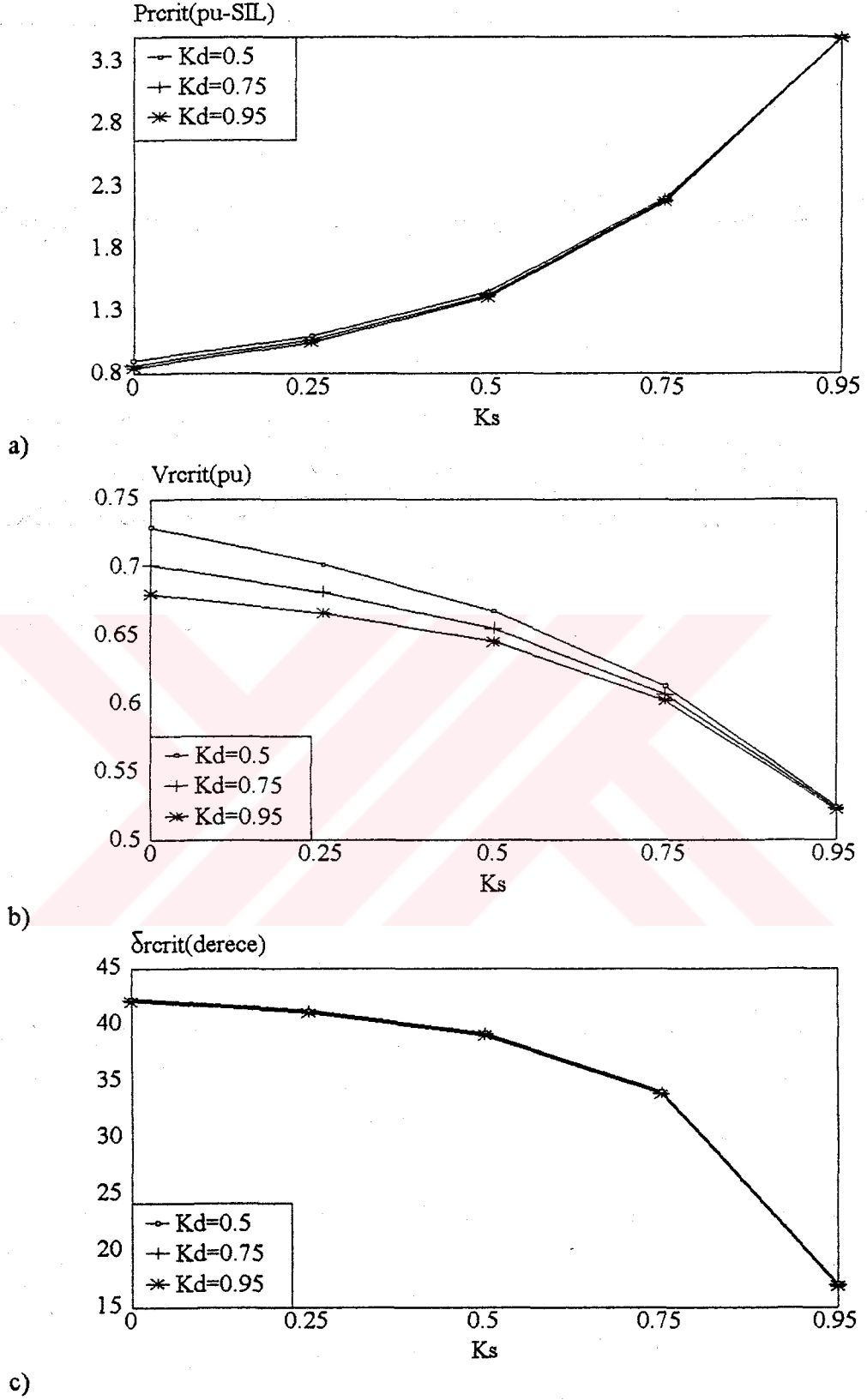
Şekil F.10. Model 4 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



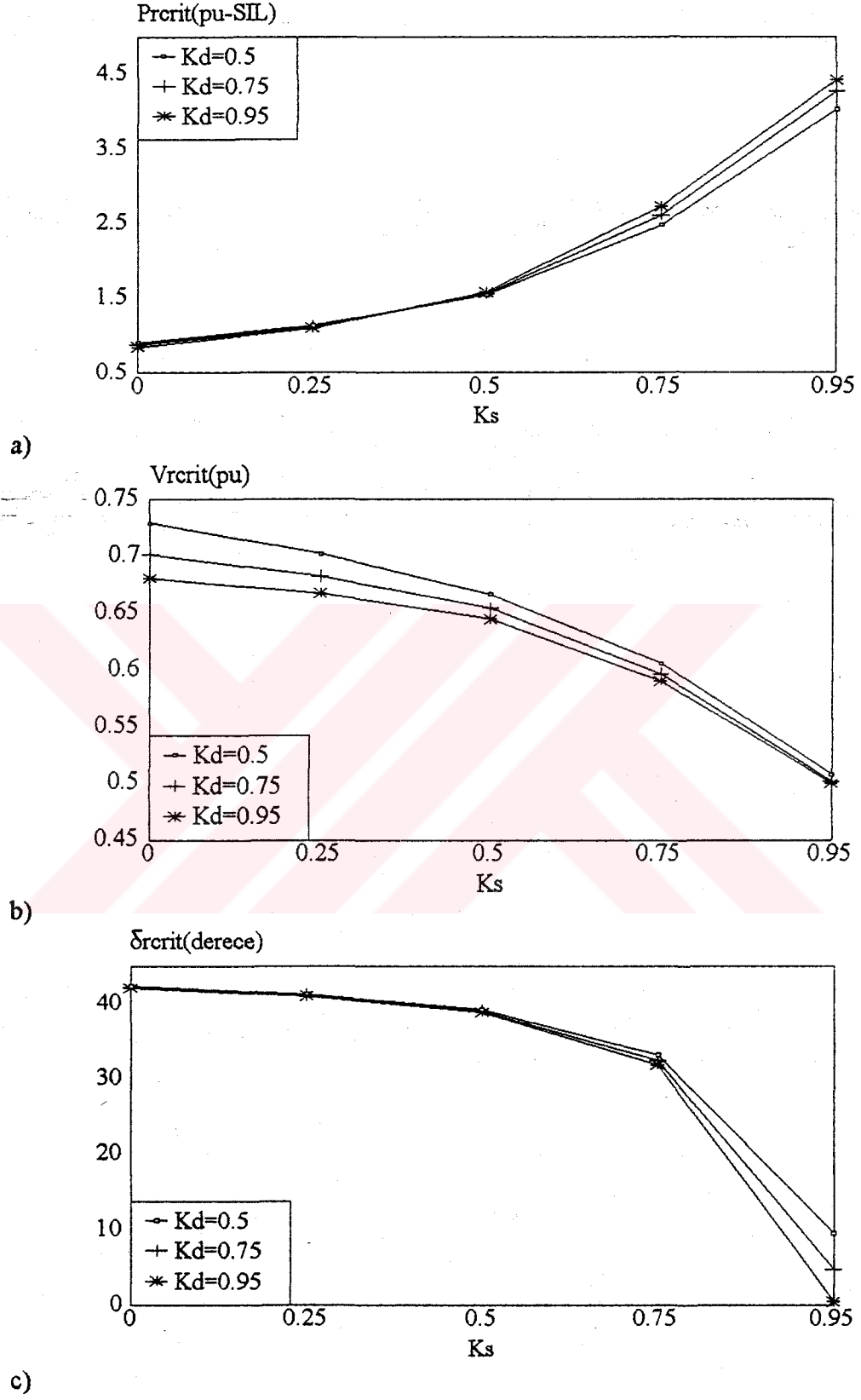
Şekil F.11. Model 5 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



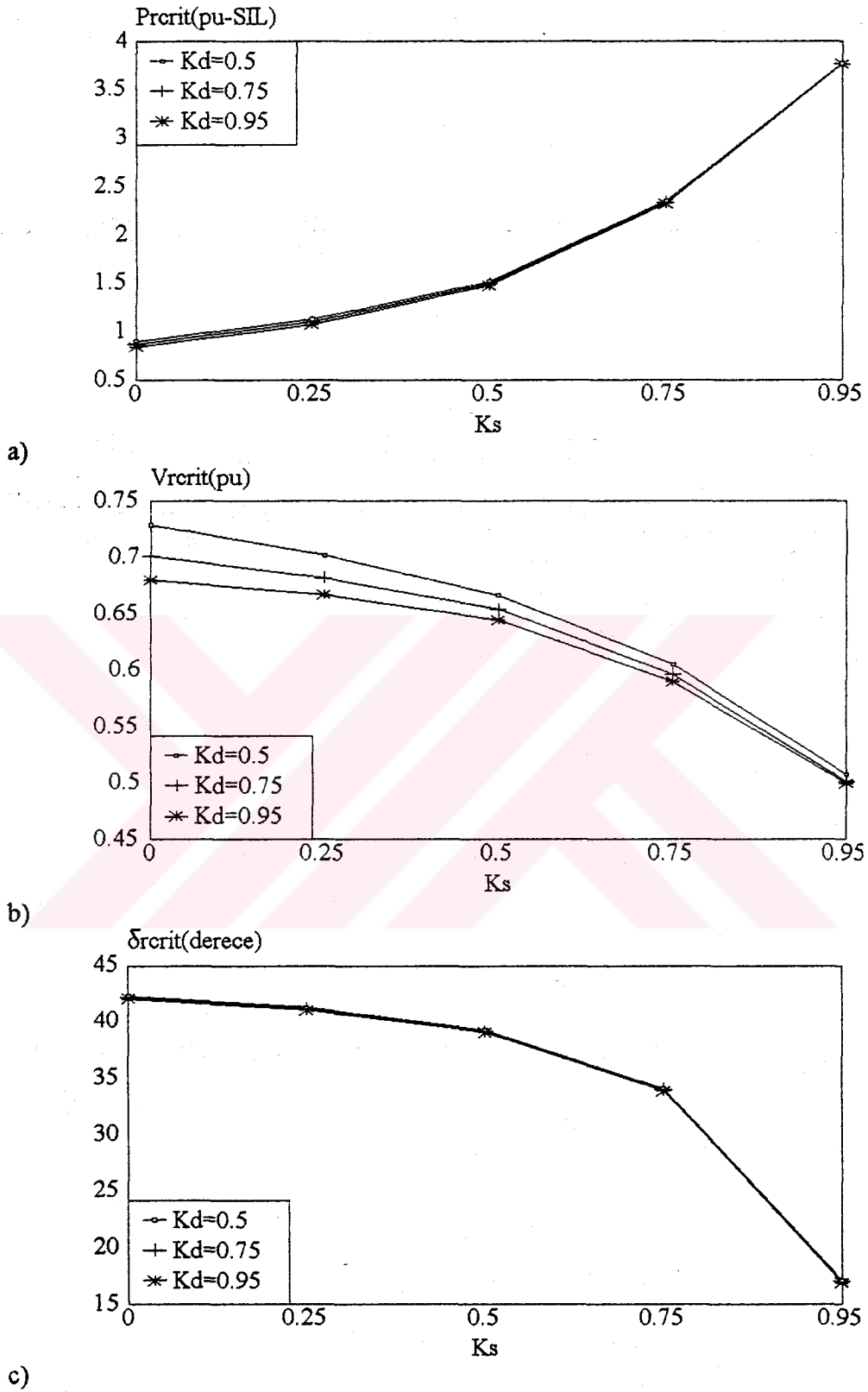
Şekil F.12. Model 6 için, şönt kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı güç faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $K_s=0.5$)



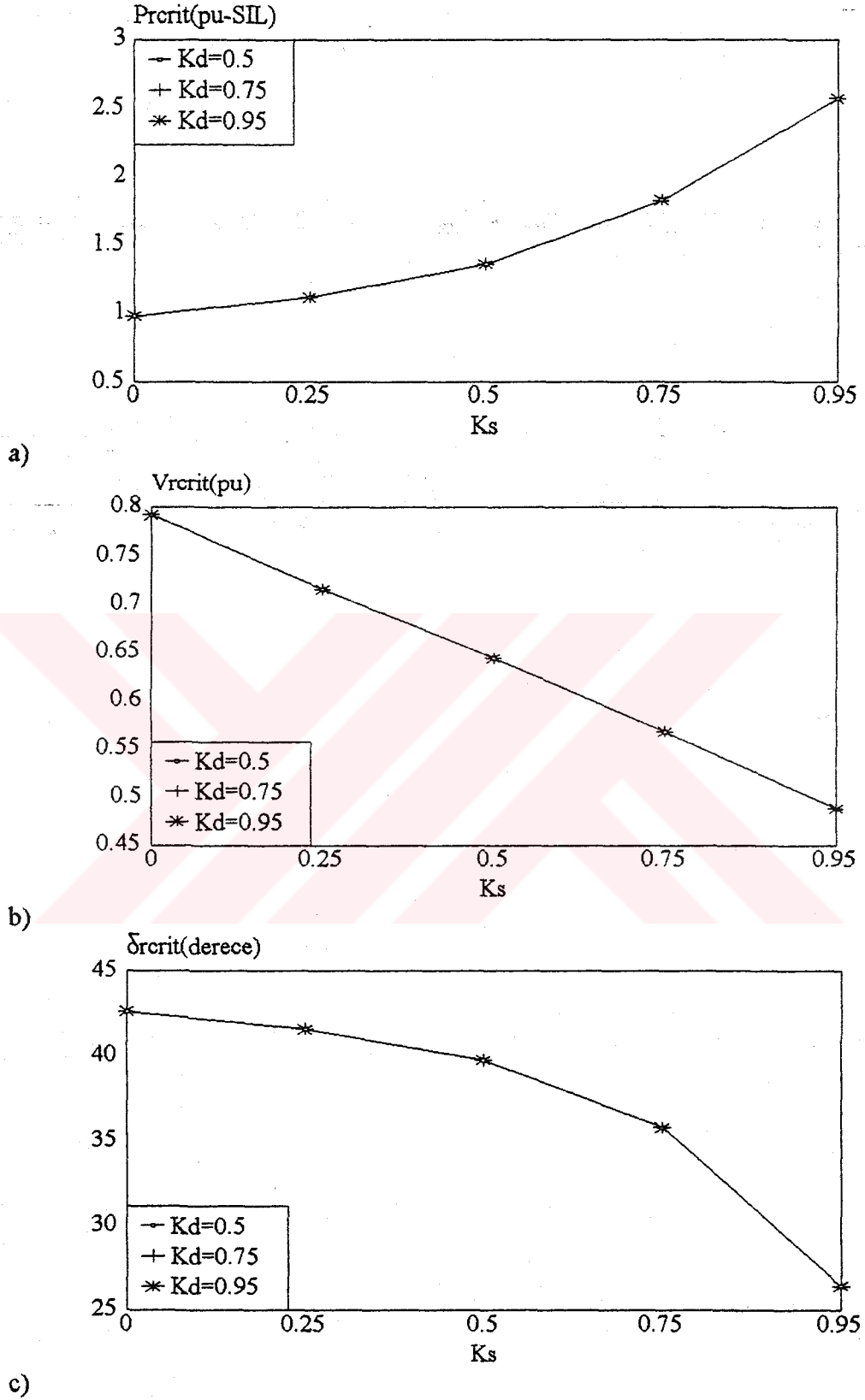
Şekil F.13. Model 1 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\phi=1.0$)



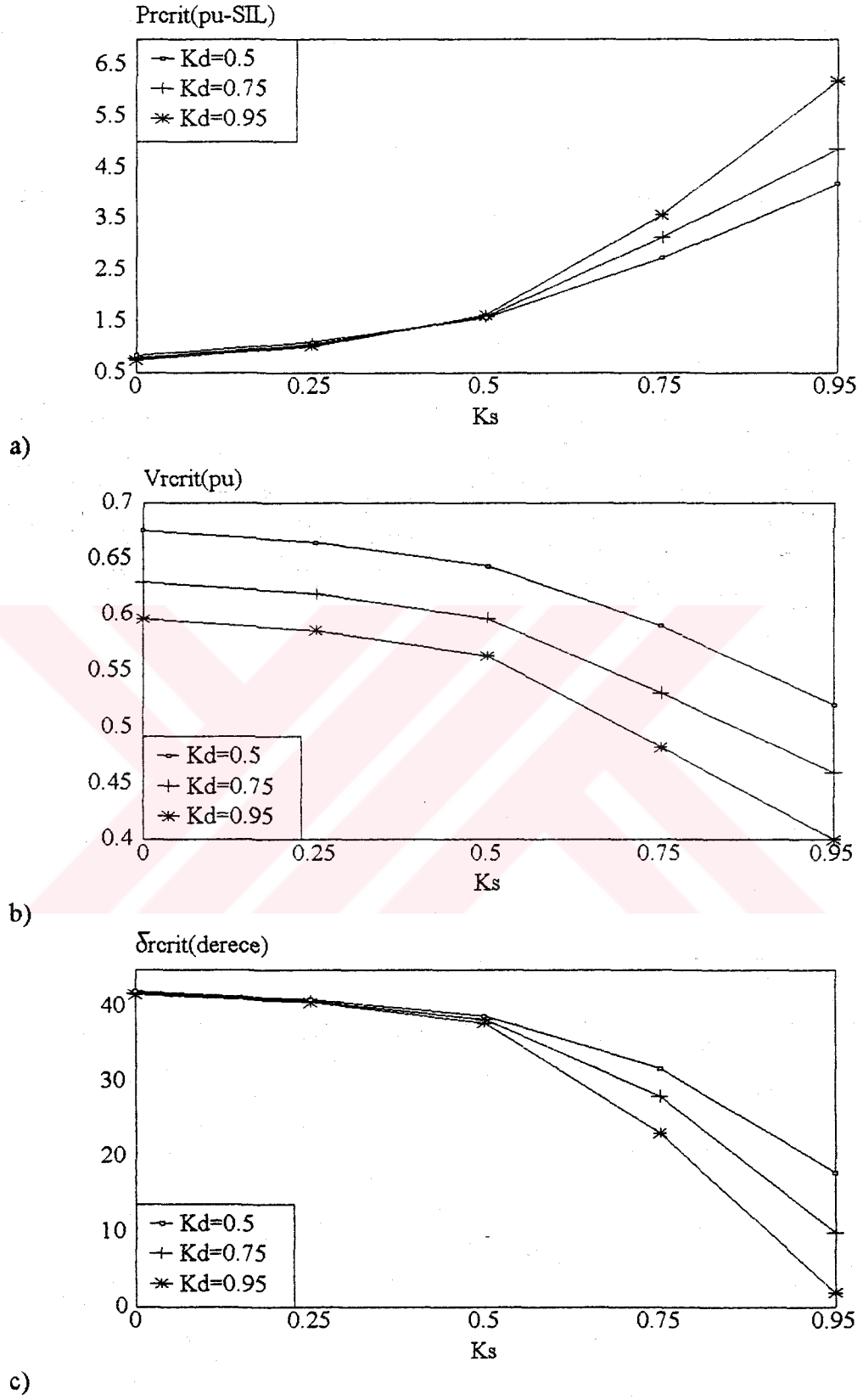
Şekil F.14. Model 2 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\phi=1.0$)



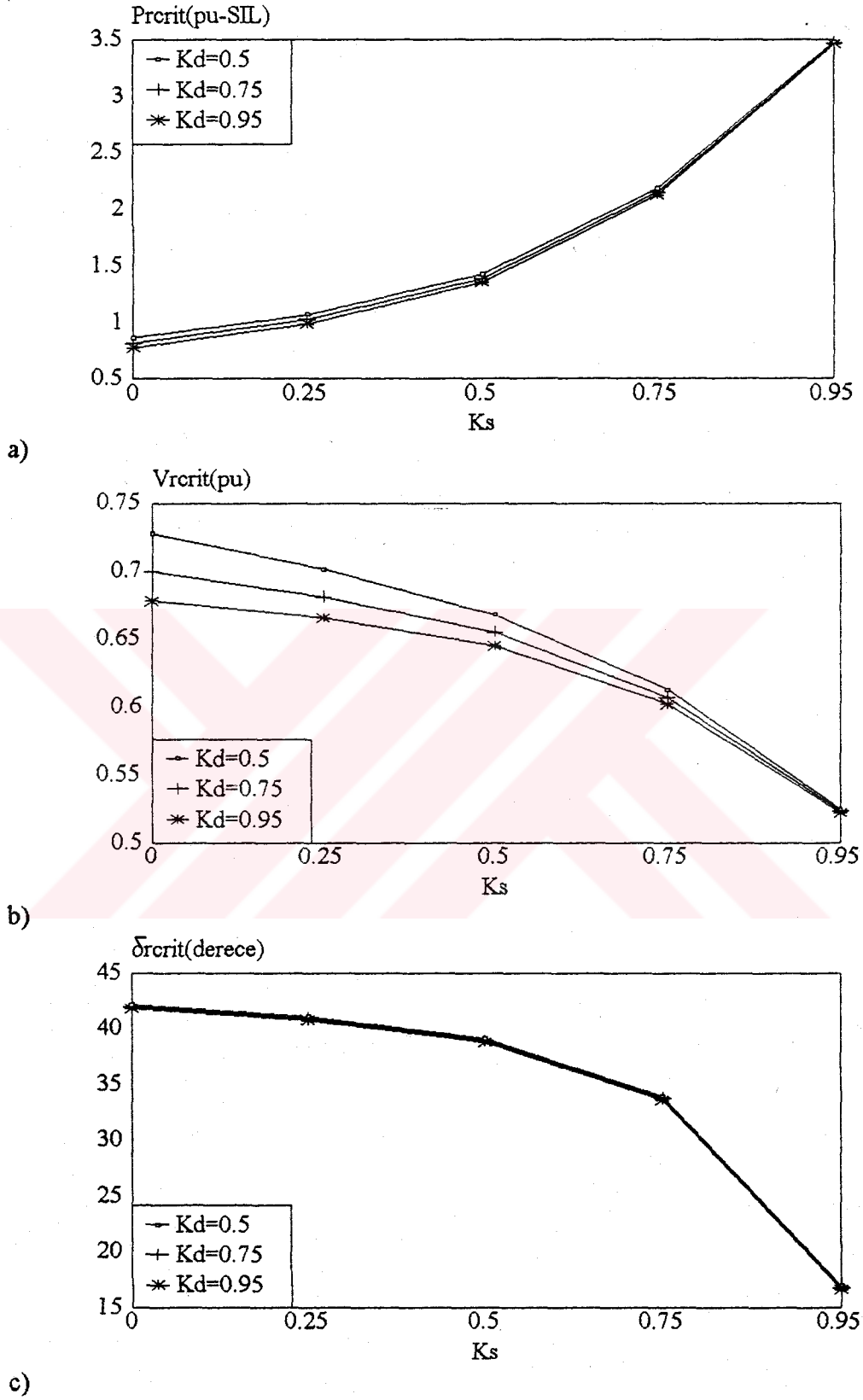
Şekil F.15. Model 3 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\varphi=1.0$)



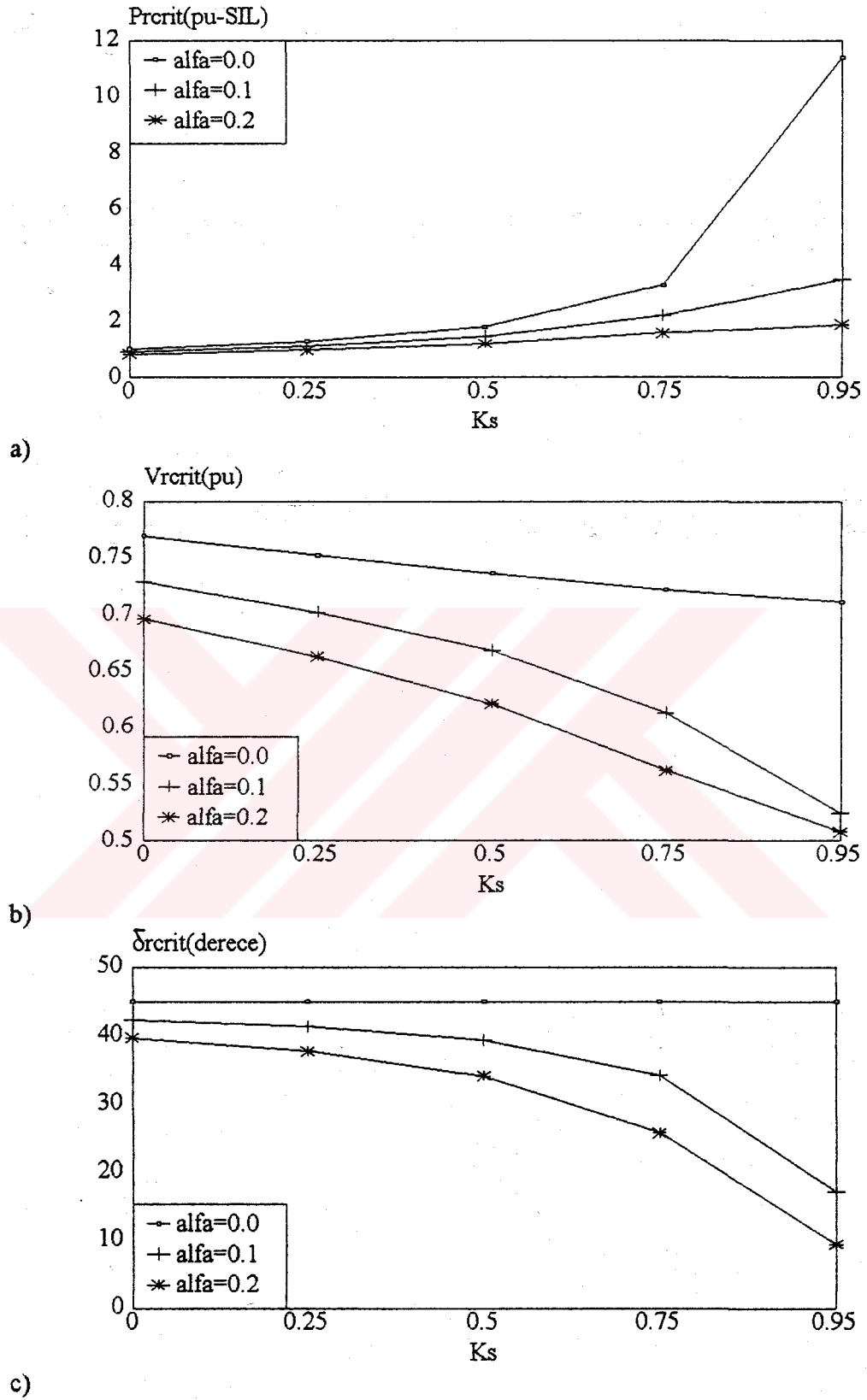
Şekil F.16. Model 4 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\varphi=1.0$)



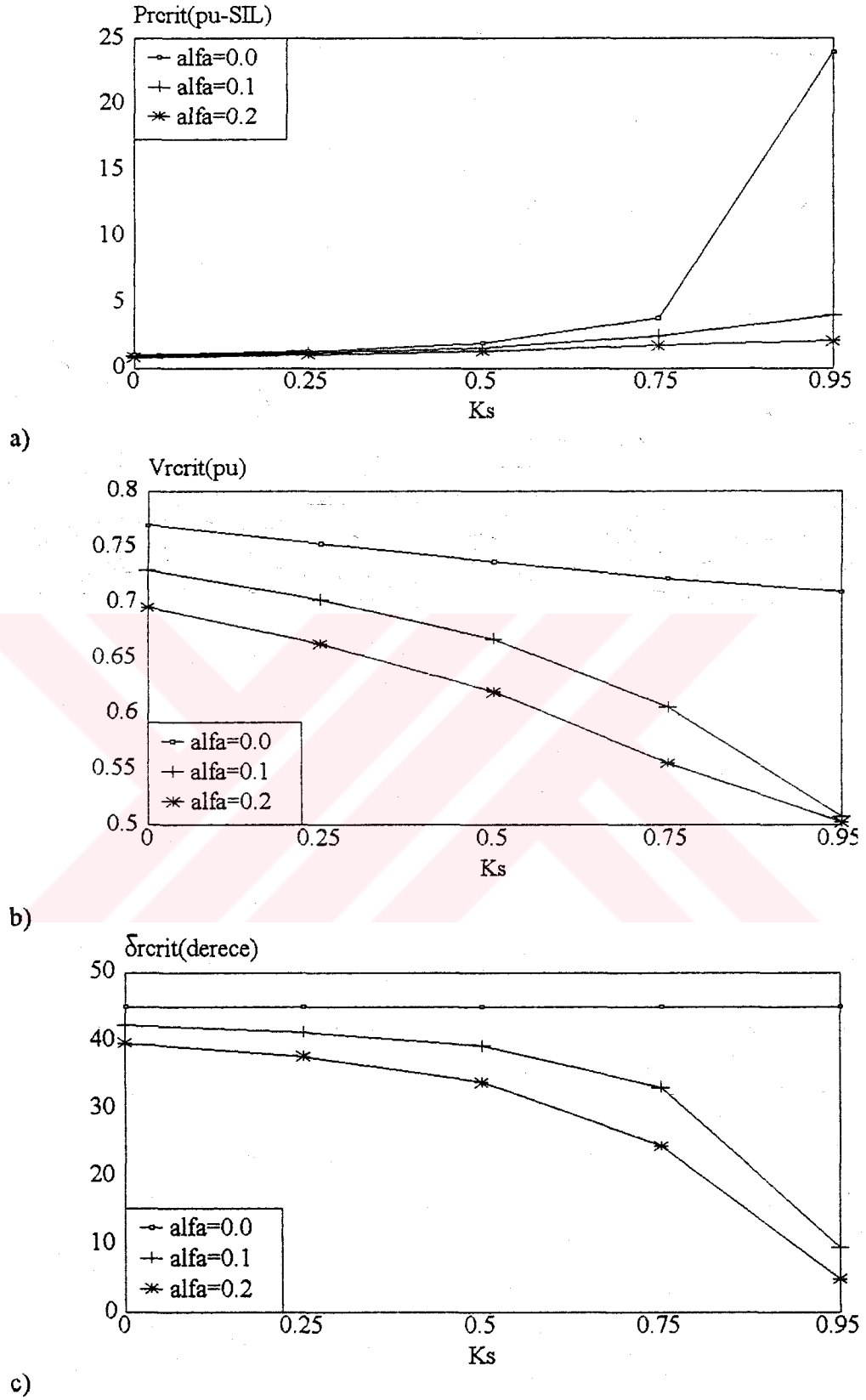
Şekil F.17. Model 5 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\phi=1.0$)



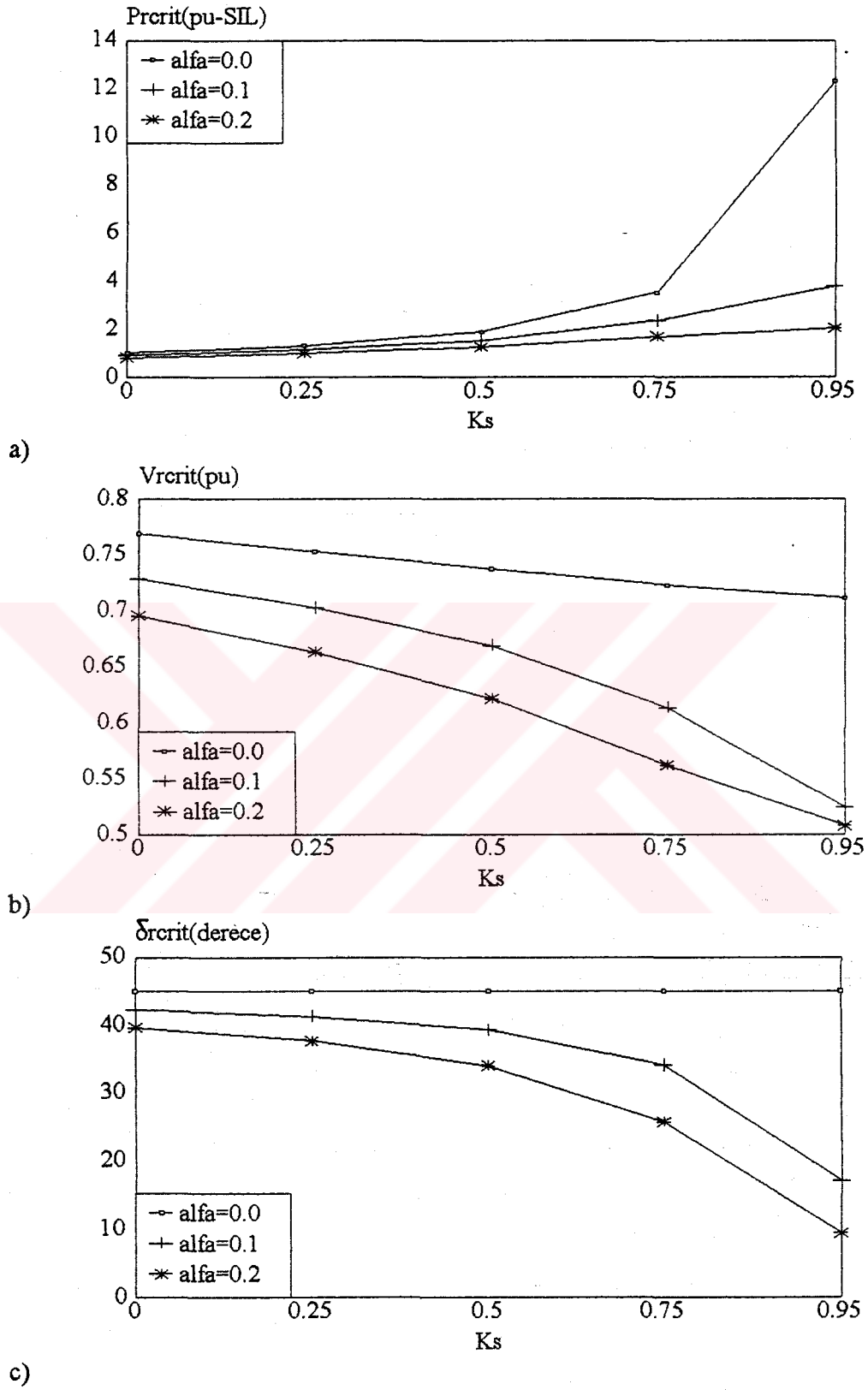
Şekil F.18. Model 6 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı şönt kompanzasyon yüzdeleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $\alpha = 0.1$, $\cos\phi=1.0$)



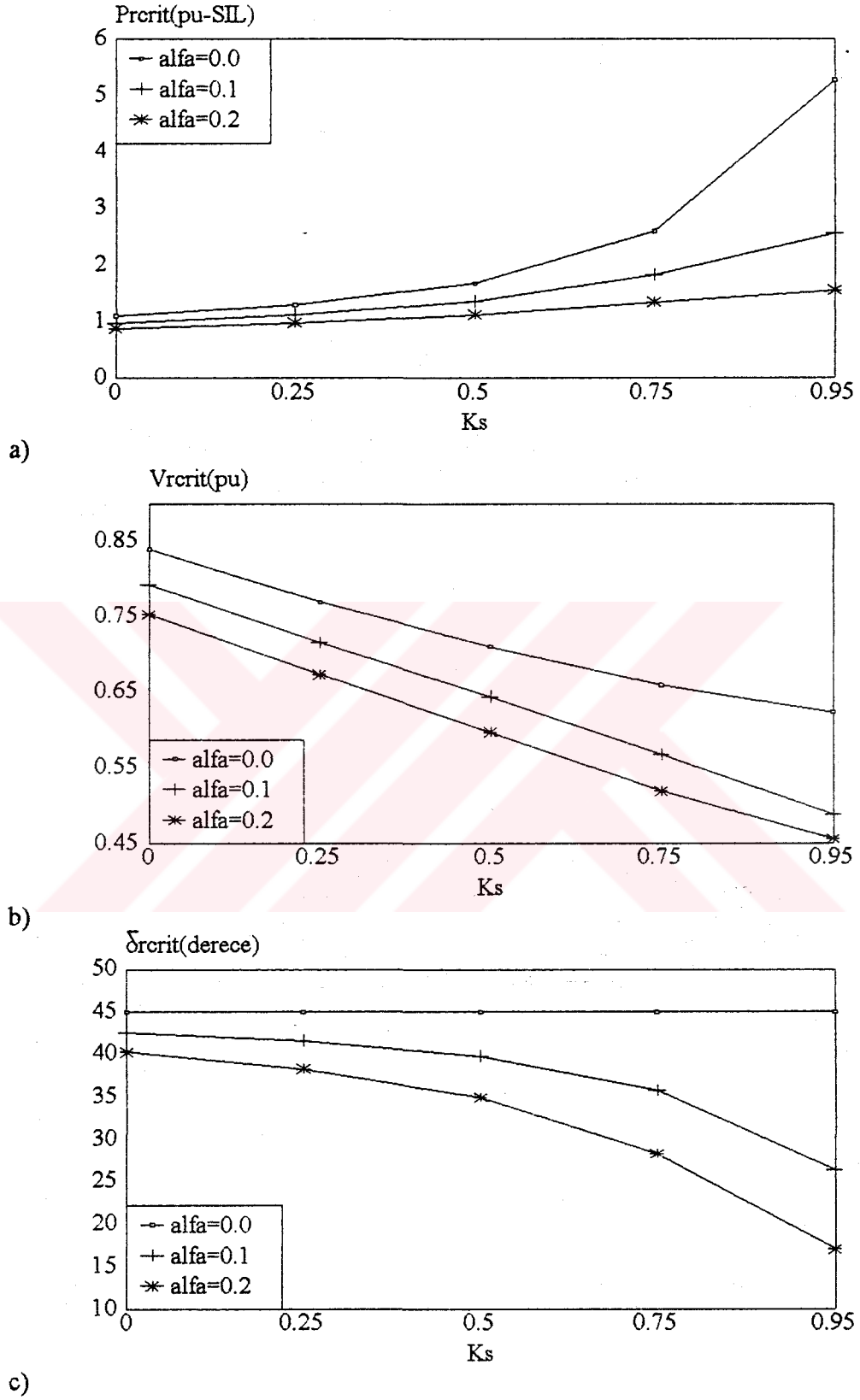
Şekil F.19. Model 1 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\phi=1.0$)



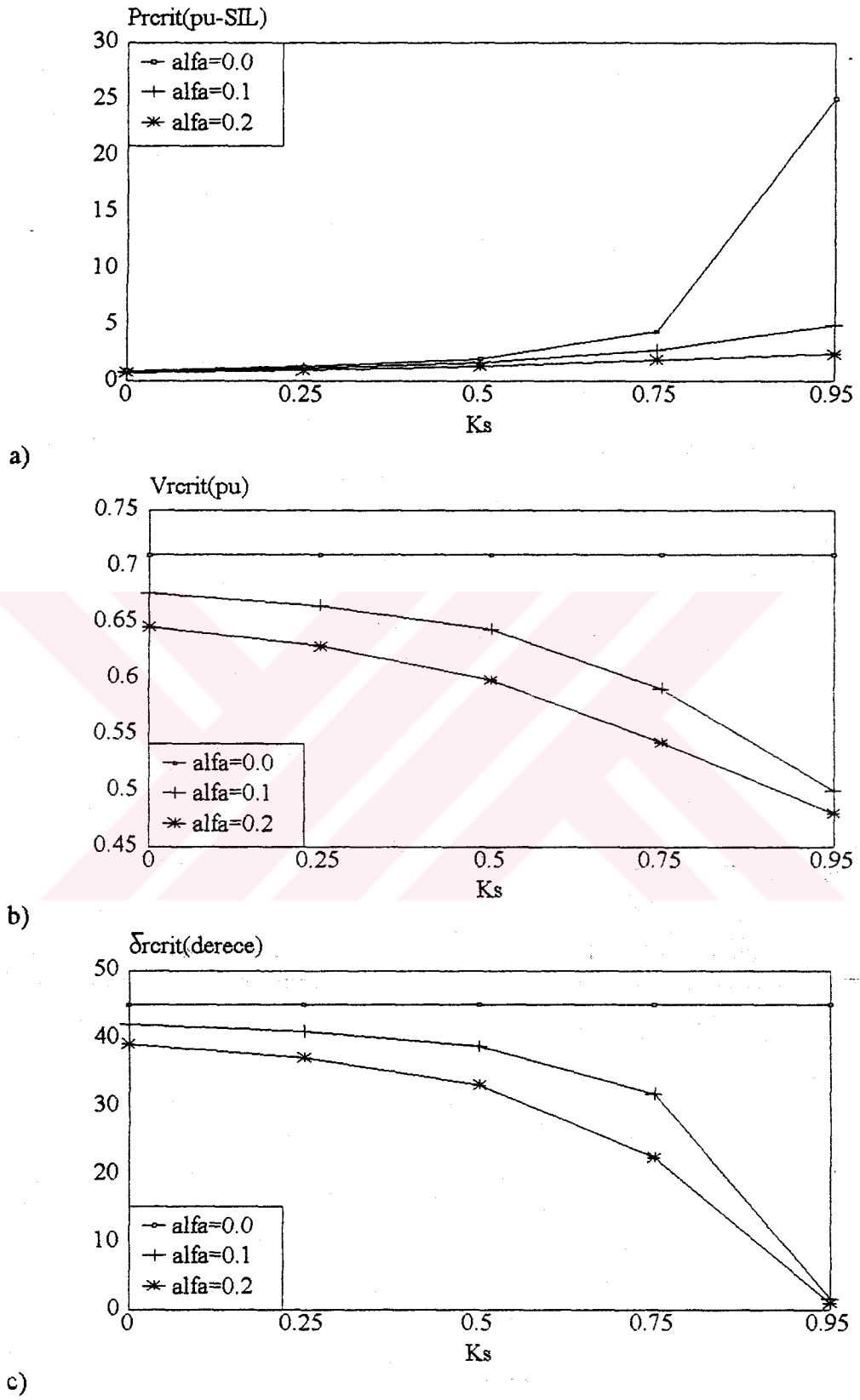
Şekil F.20. Model 2 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\phi=1.0$)



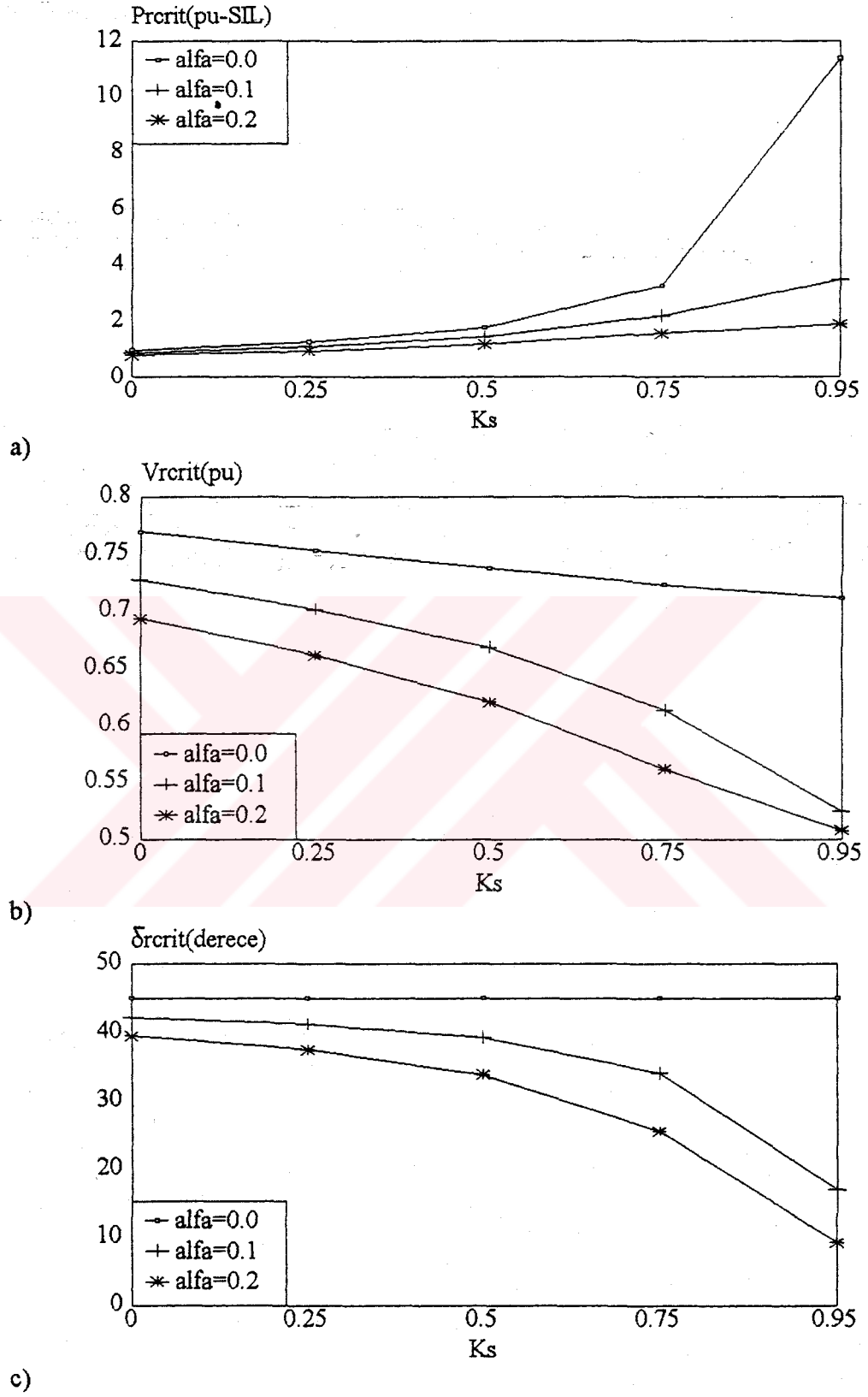
Şekil F.21. Model 3 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\varphi=1.0$)



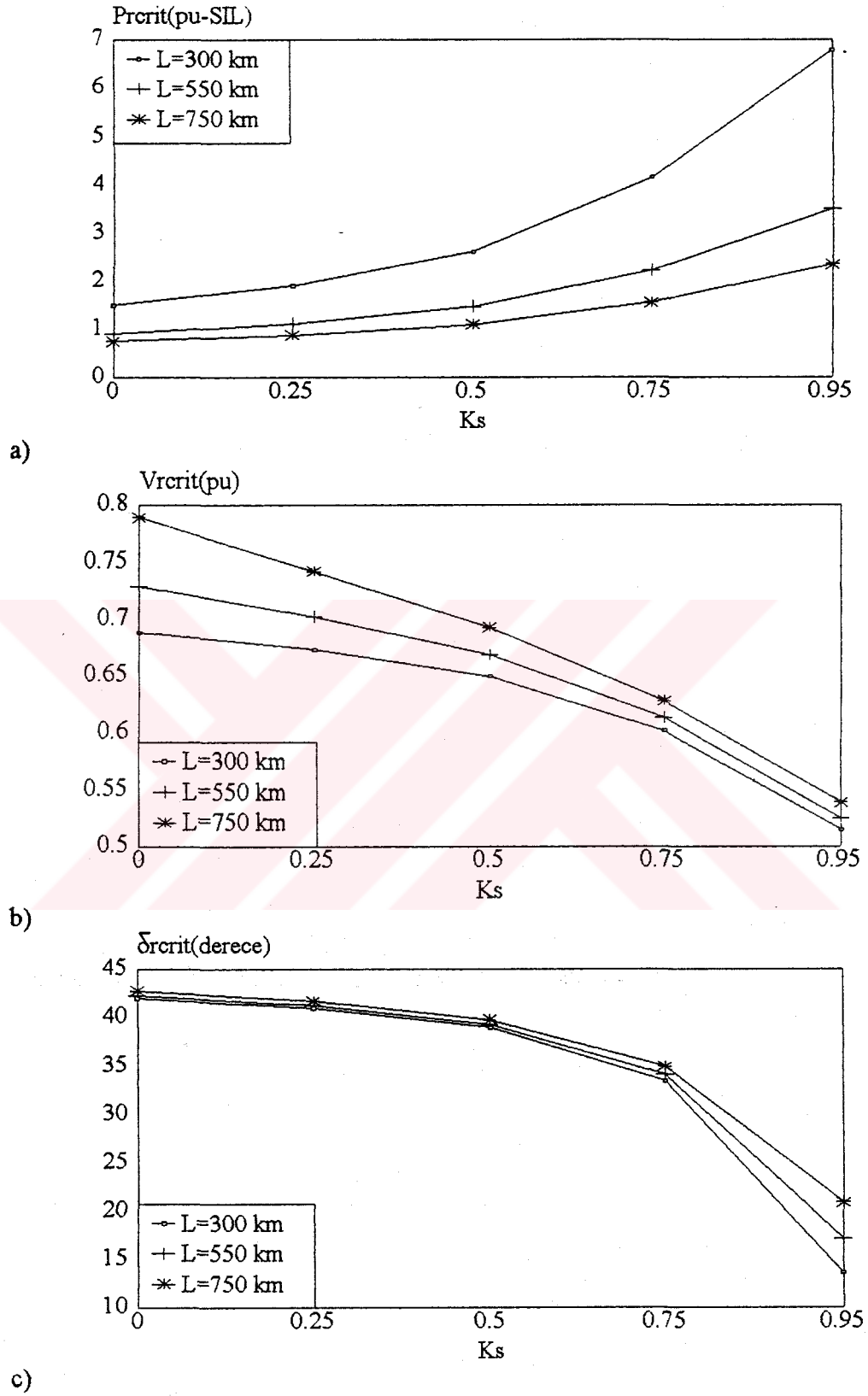
Şekil F.22. Model 4 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\phi=1.0$)



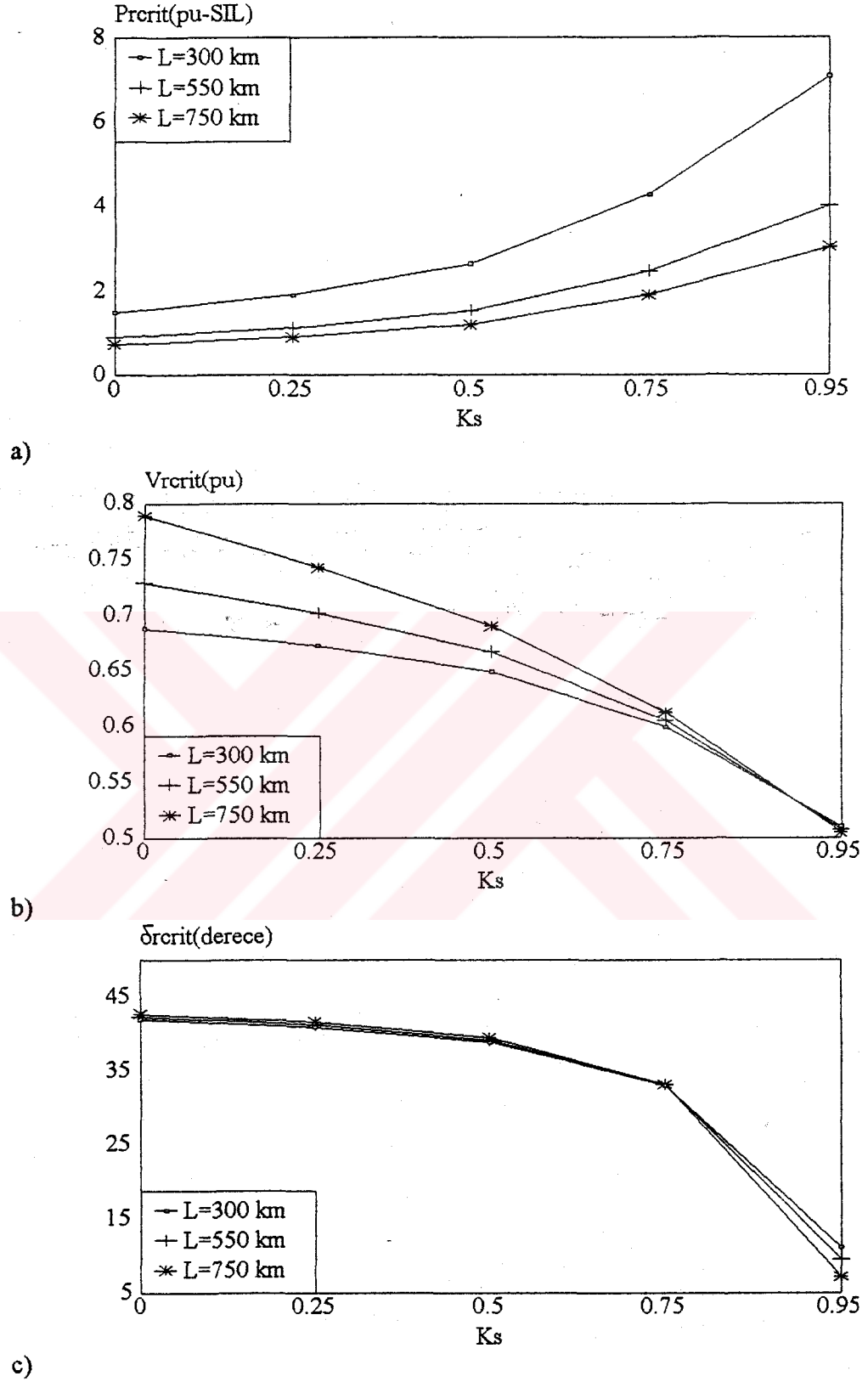
Şekil F.23. Model 5 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\phi=1.0$)



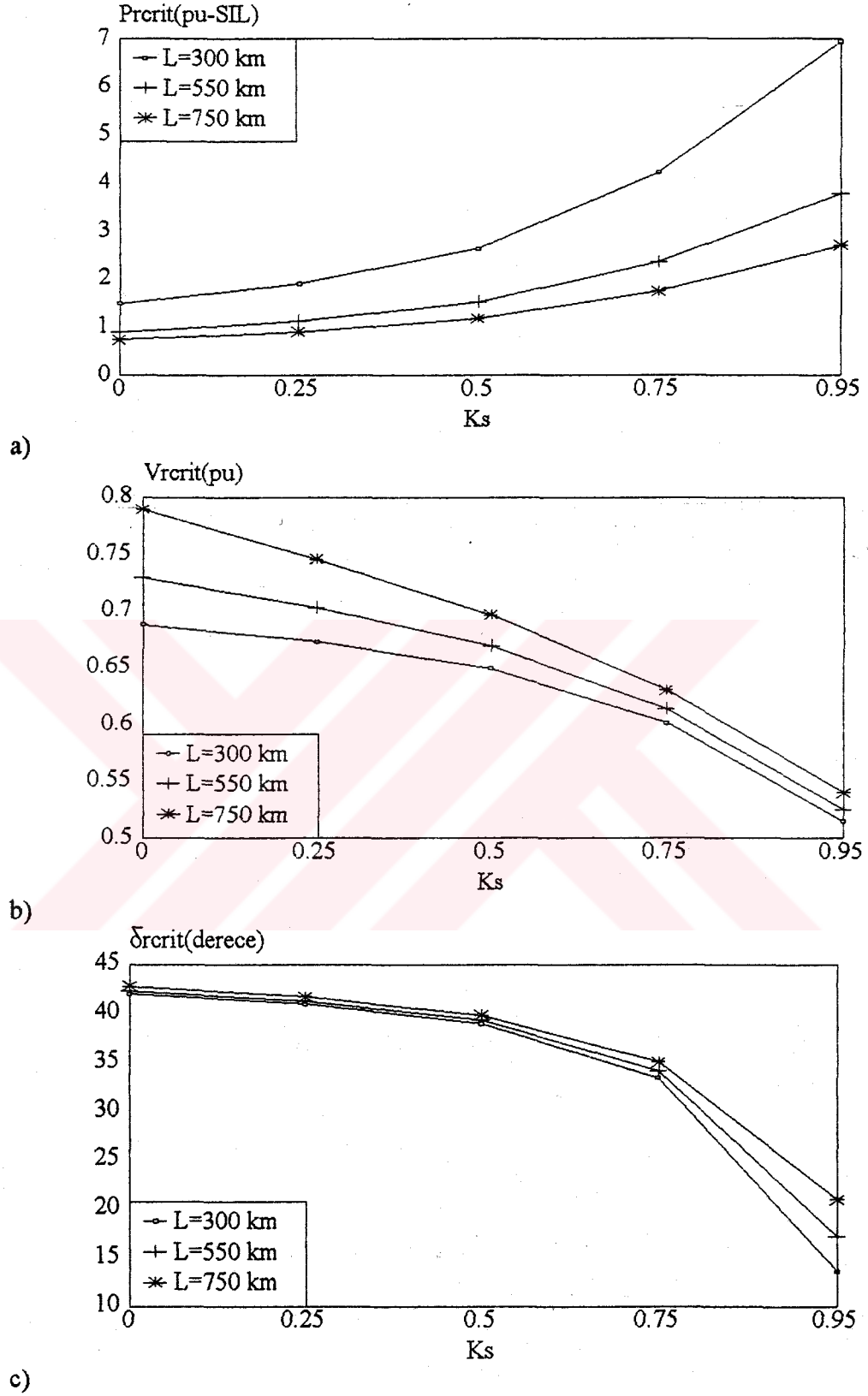
Şekil F.24. Model 6 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat kayıp faktörleri altında a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($L=550$ km, $K_d=0.5$, $\cos\varphi=1.0$)



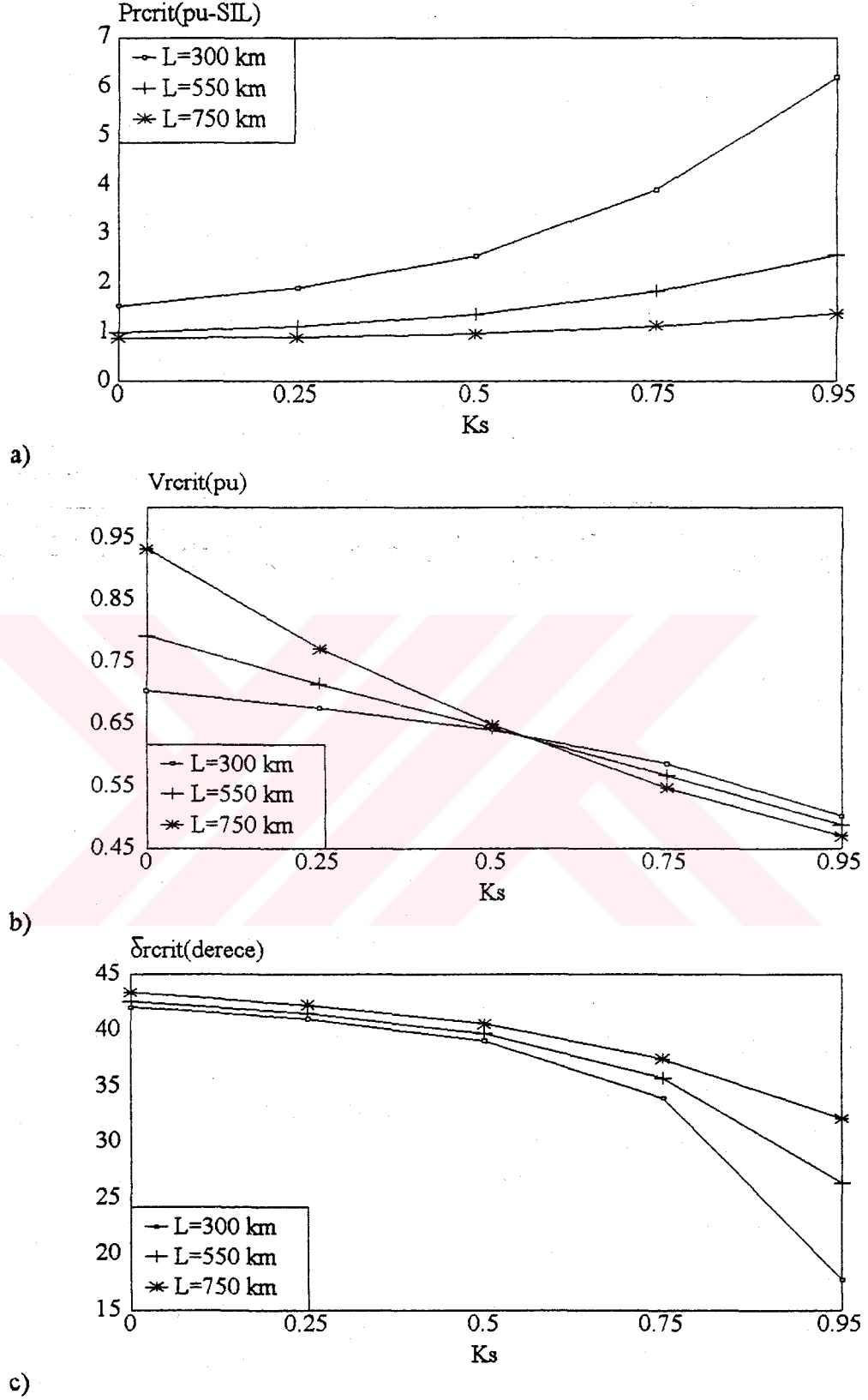
Şekil F.25. Model 1 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1.0$)



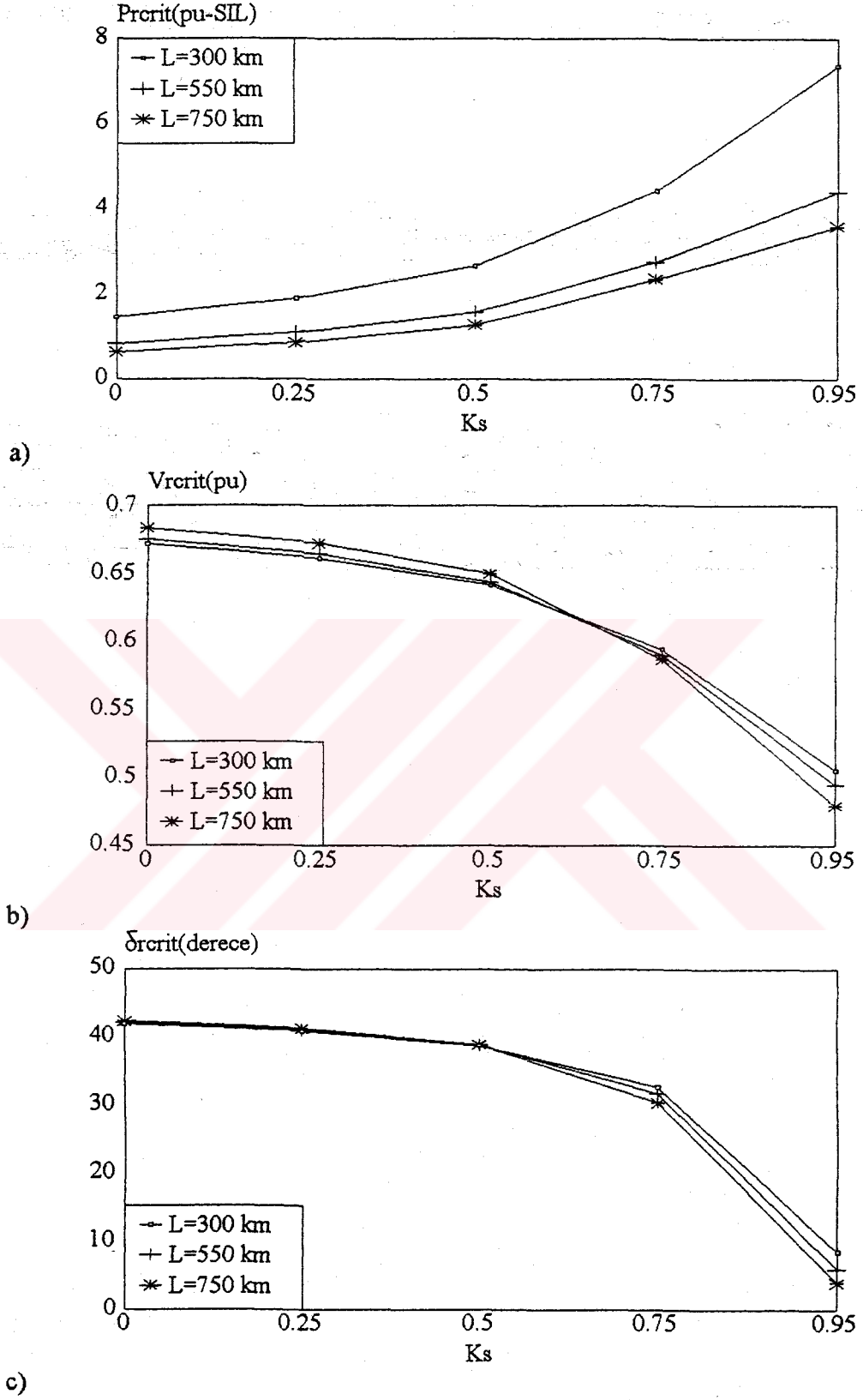
Şekil F.26. Model 2 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\varphi=1.0$)



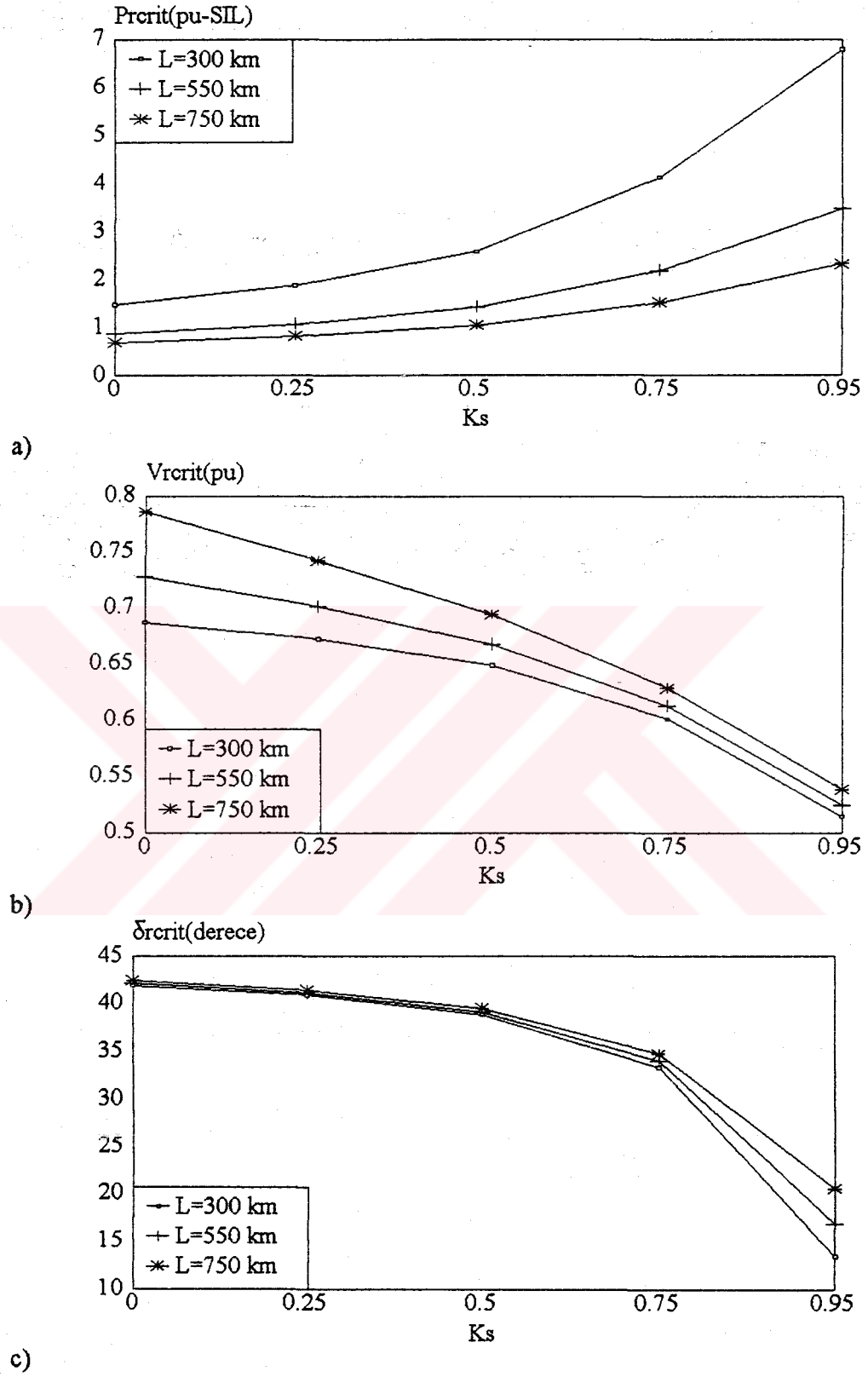
Şekil F.27. Model 3 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1.0$)



Şekil F.28. Model 4 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1.0$)



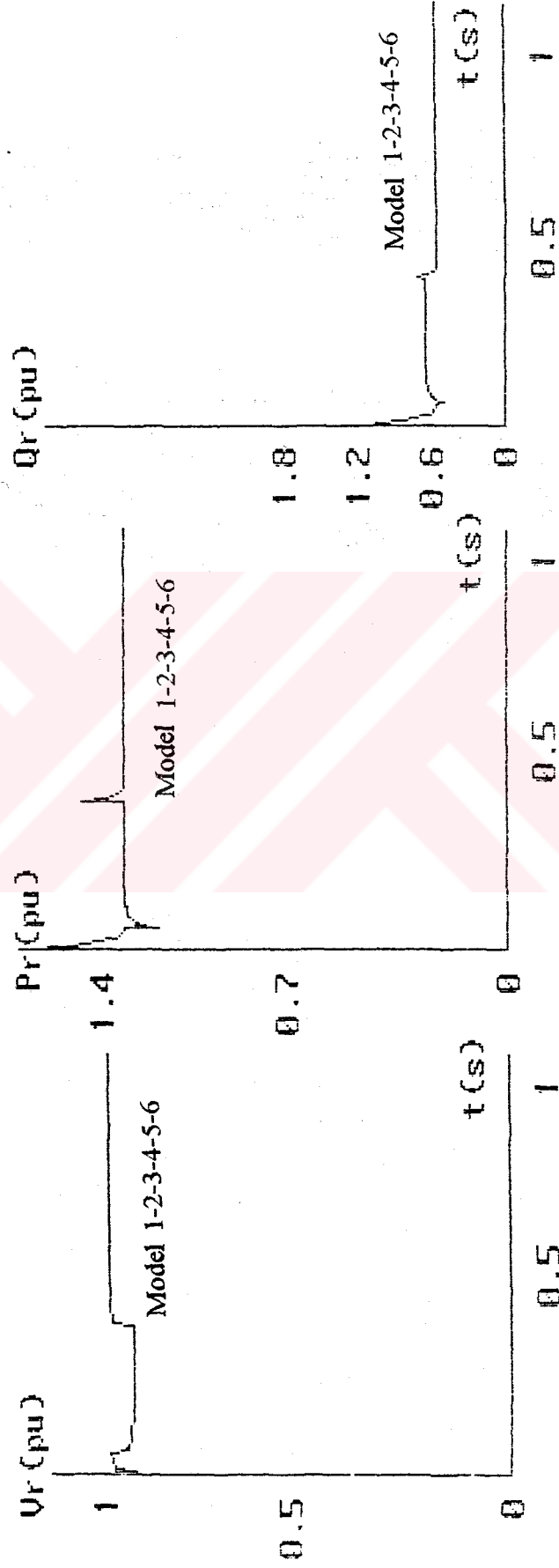
Şekil F.29. Model 5 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1.0$)



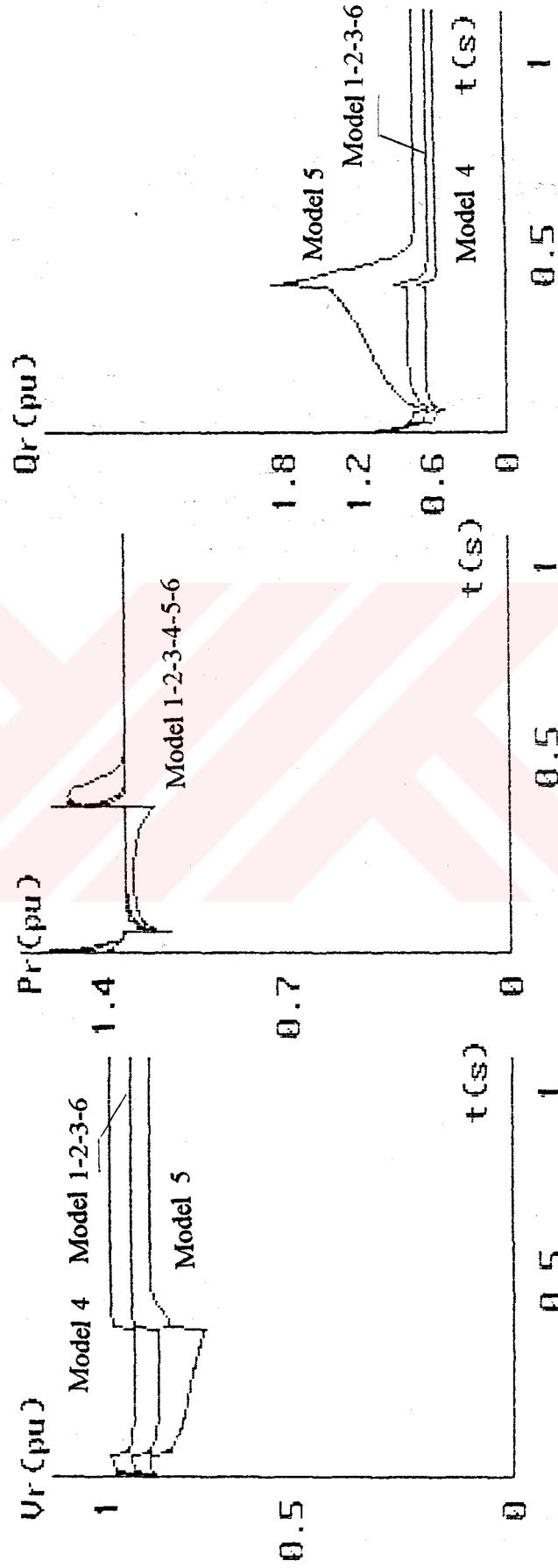
Şekil F.30. Model 6 için, seri kompanzasyon yüzdesinin artımı ile farklı hat uzunlukları için a) kritik güç, b) kritik gerilim c) kritik yük açısı değerlerinin değişimi ($K_d=0.5$, $\alpha=0.1$, $\cos\phi=1.0$)

EK C

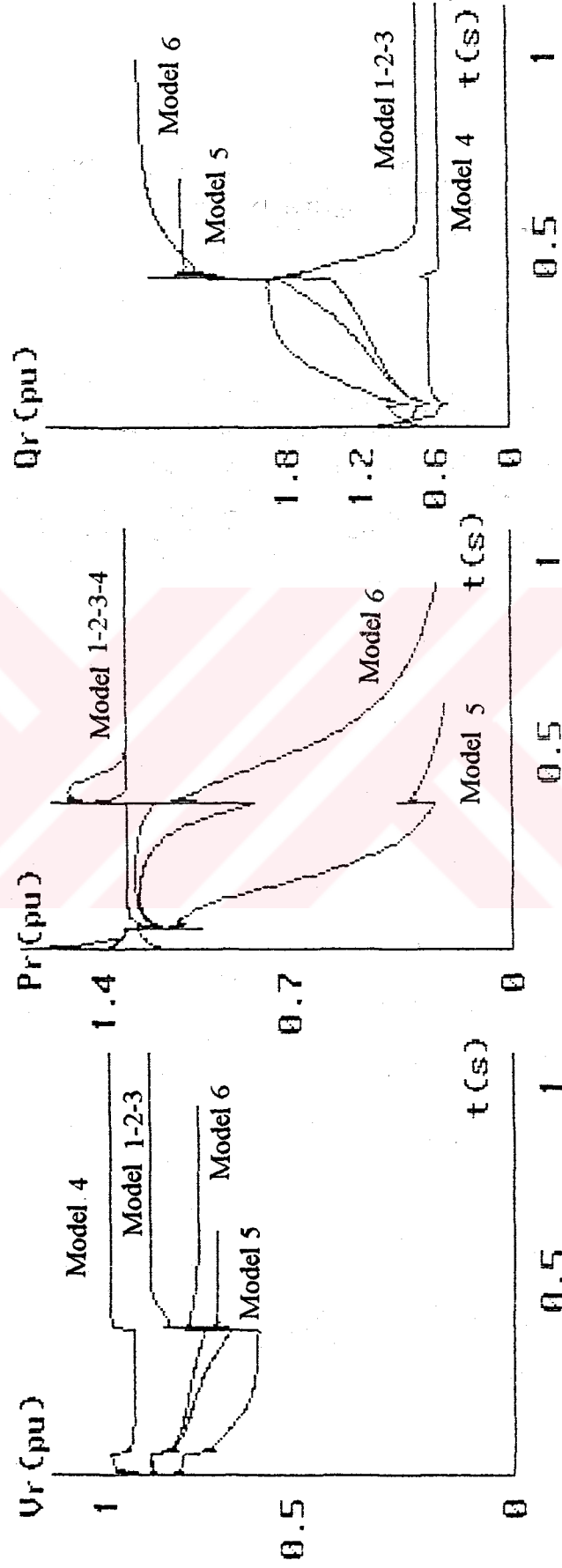
Dinamik Yüklerin Hat Modellerine Göre Etkileri



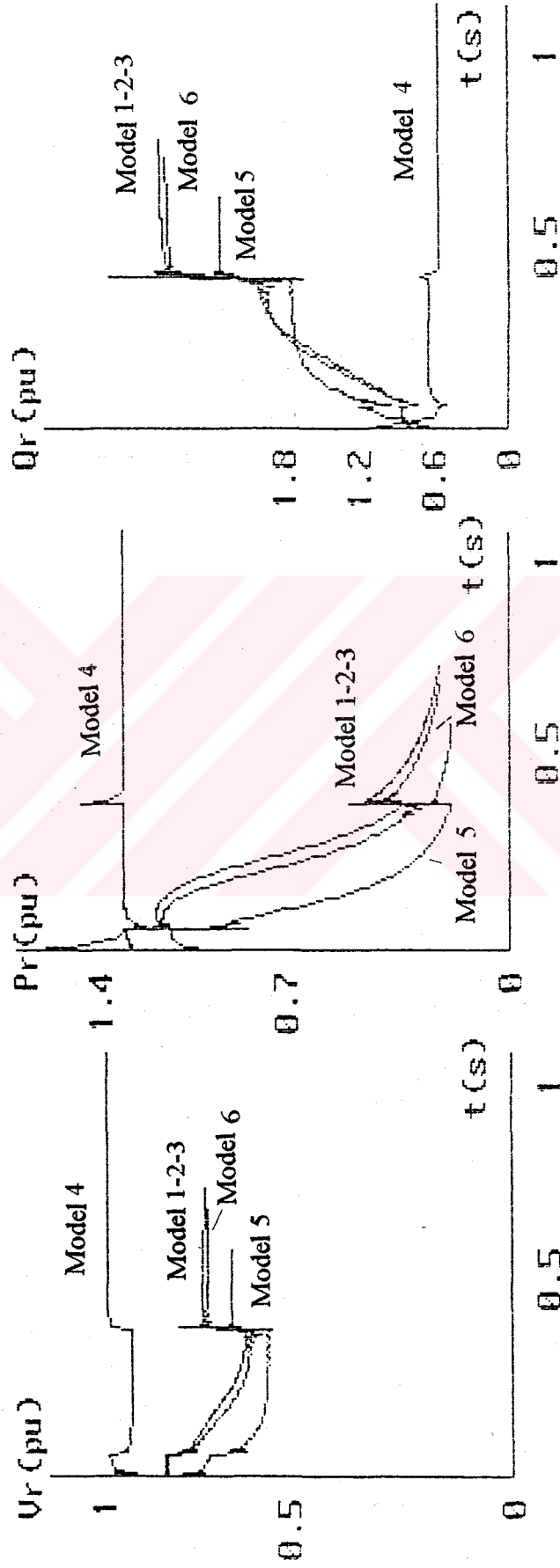
Şekil G.1. İletim hattına, % 0 Seri ($K_s = 0$), ve % 0 Şönt ($K_d = 0$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



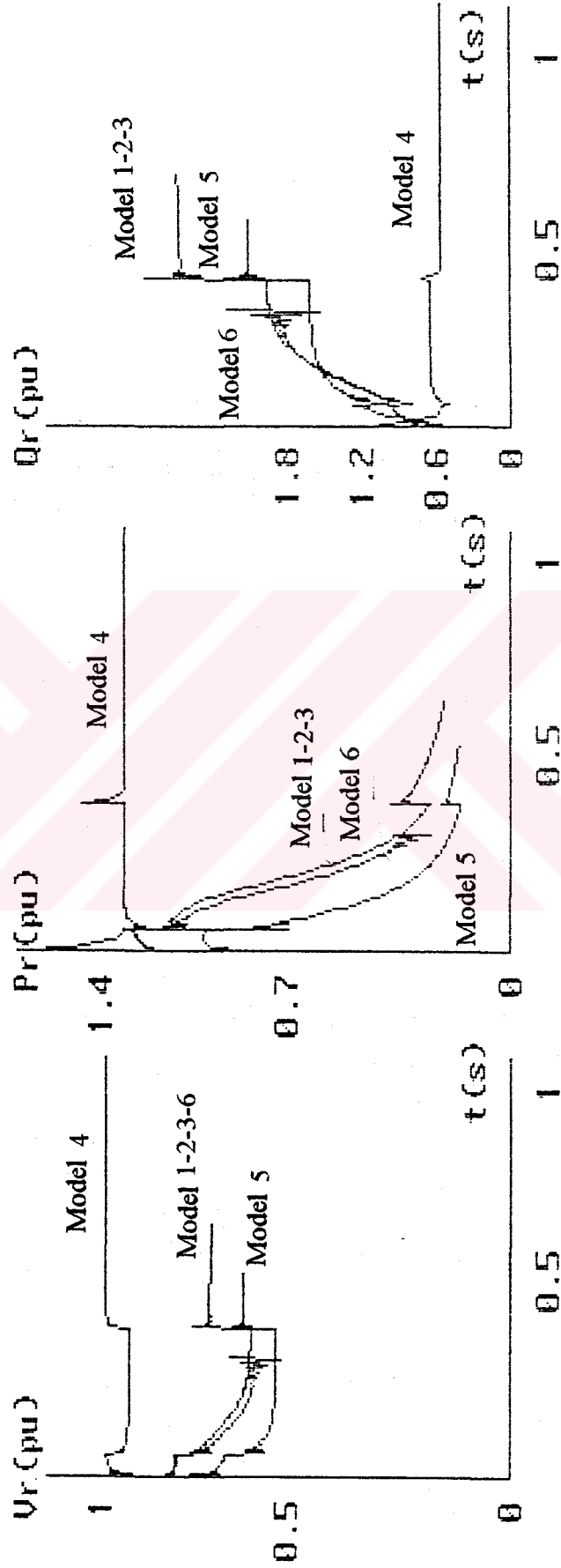
Şekil G.2. İletim hattına, % 0 Seri ($K_s=0$), ve % 25 Şönt ($K_d=0.25$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



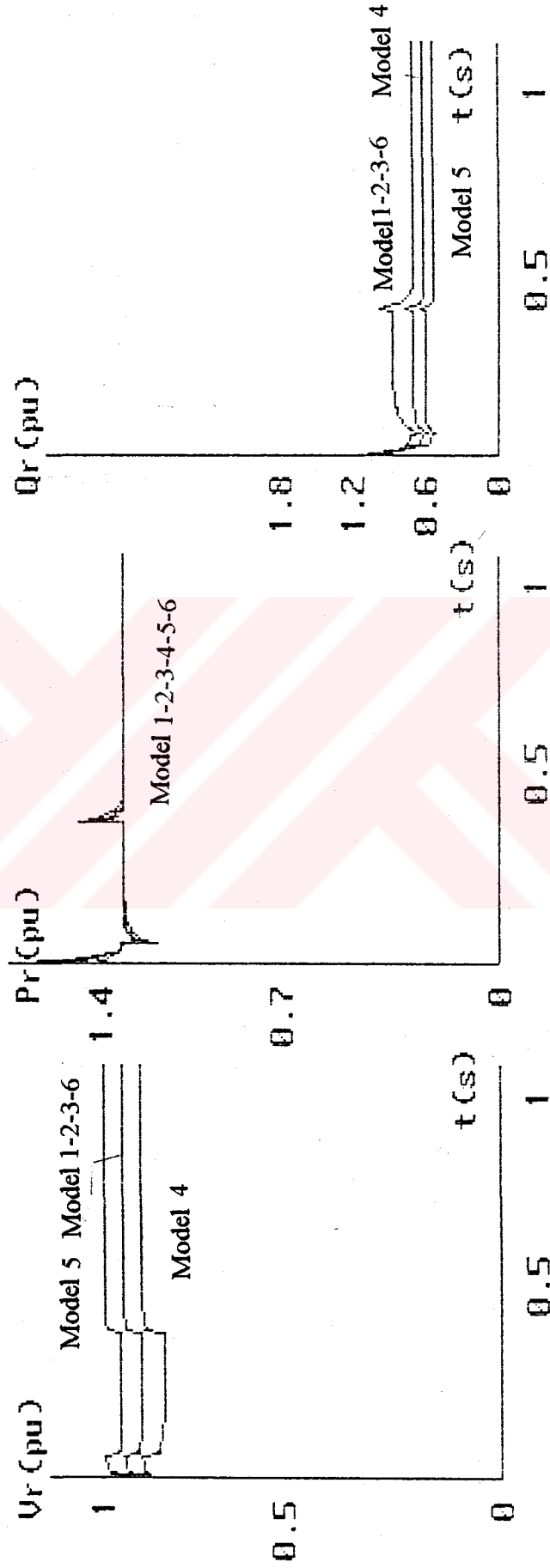
Şekil G.3. İletim hattına, % 0 Seri ($K_s=0$), ve % 50 Şönt ($K_d=0.50$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



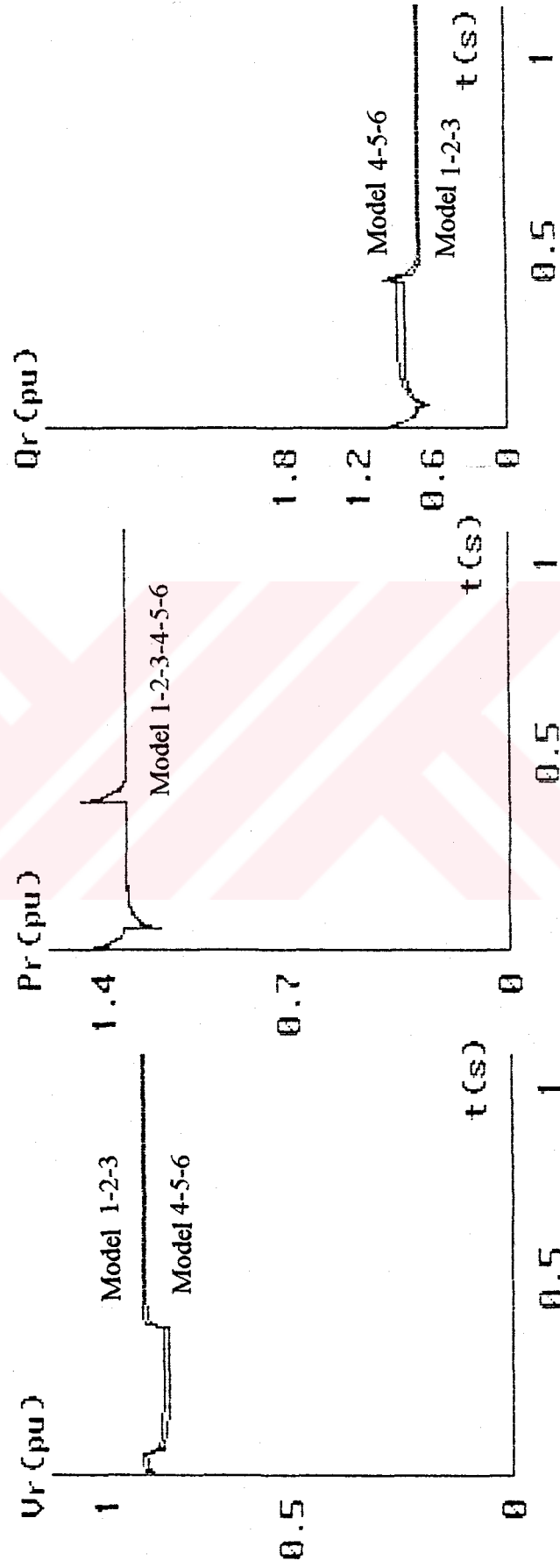
Şekil G.4. İletim hattına, % 0 Seri ($K_s=0$), ve % 75 Şönt ($K_d=0.75$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



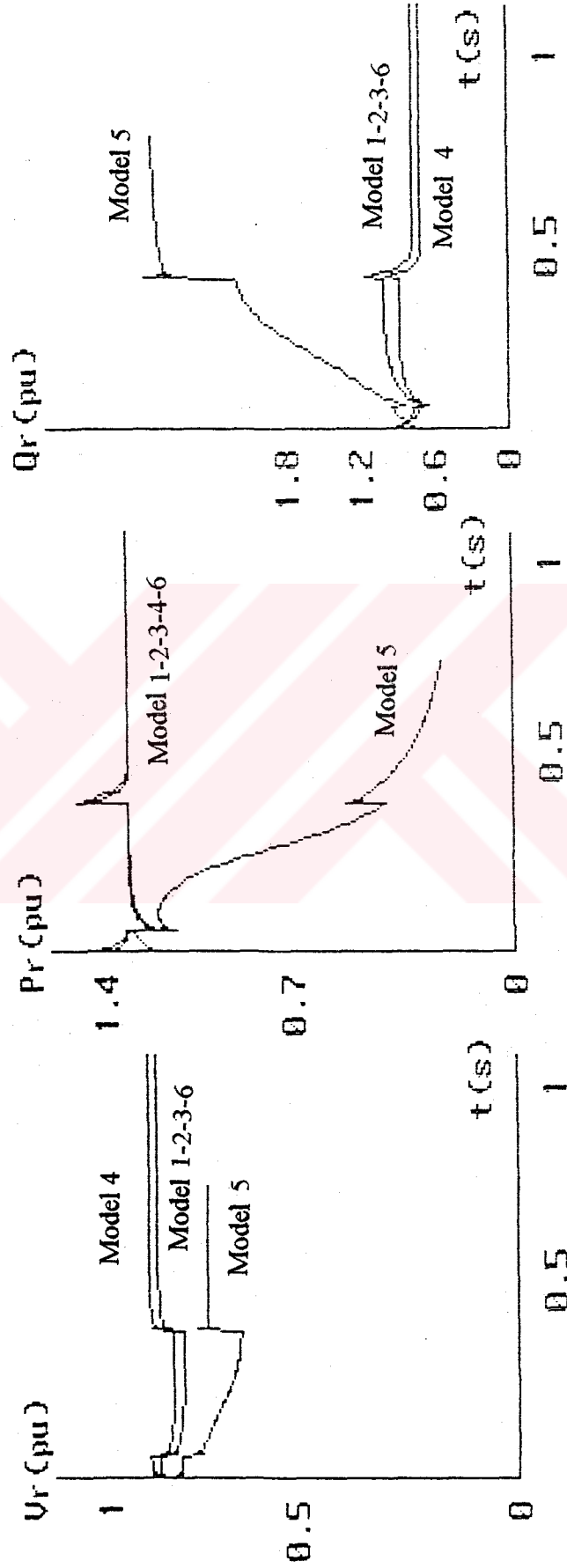
Şekil G.5. İletim hattına, % 0 Seri ($K_s=0$), ve % 95 Şönt ($K_d=0.95$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



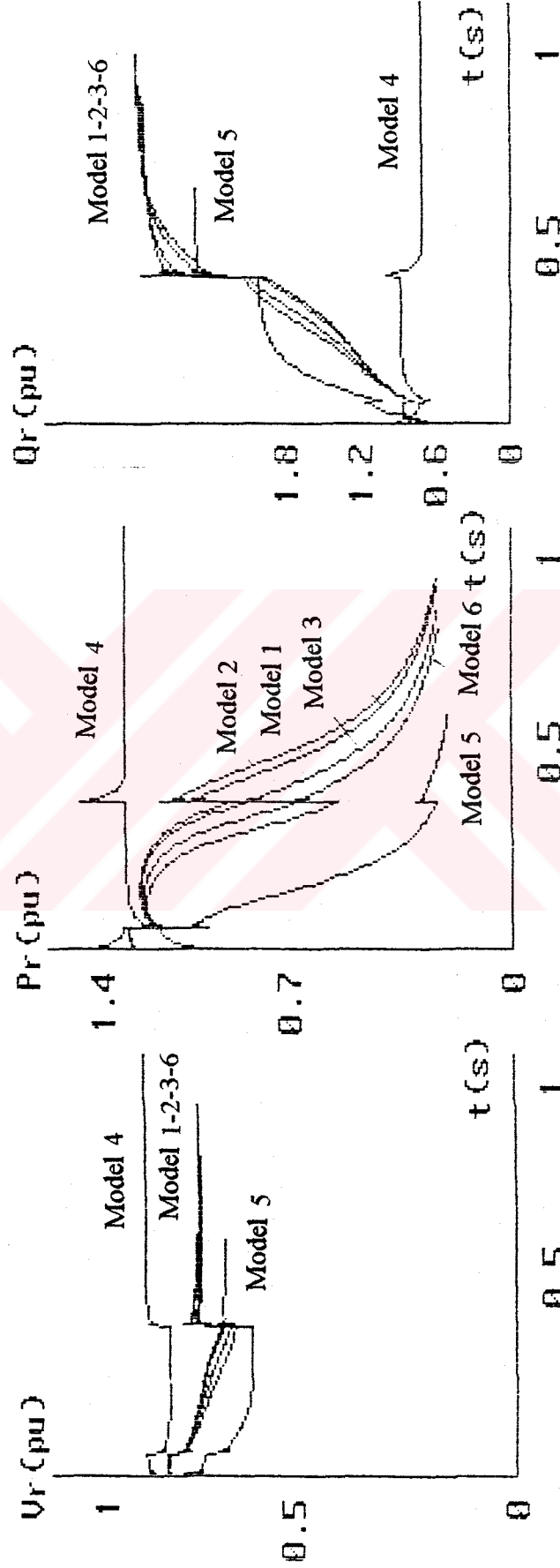
Şekil G.6. İletim hattına, % 25 Seri ($K_s=0.25$), ve % 0 Şönt ($K_d=0$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



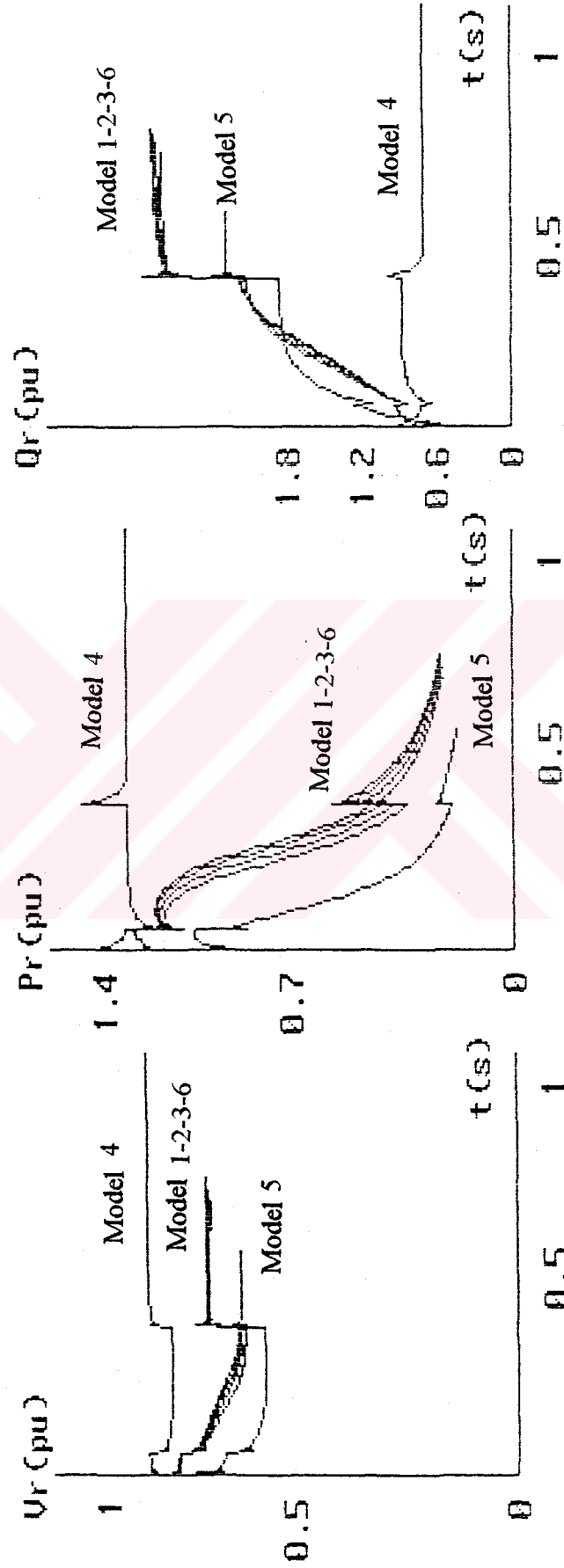
Şekil G.7. İletim hattına, %25 Seri ($K_s=0.25$), ve %25 Şönt ($K_d=0.25$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



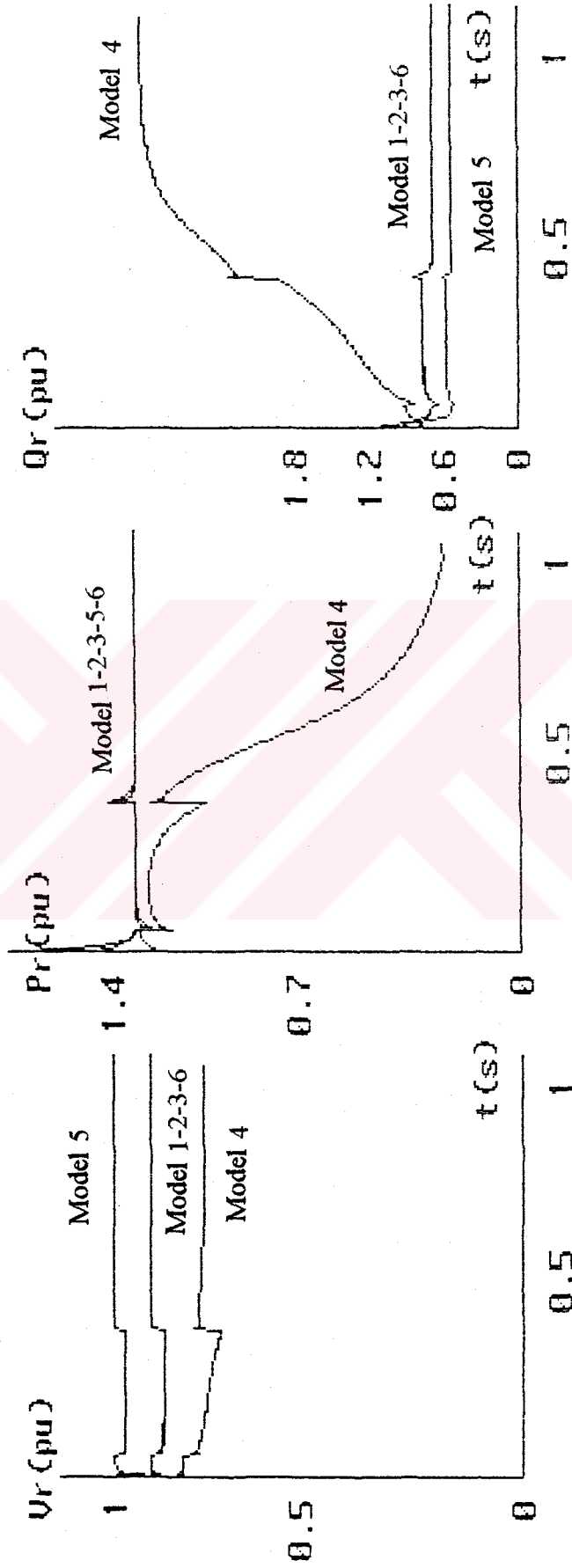
Şekil G.8. İletim hattına, % 25 Seri ($K_s = 0.25$), ve % 50 Şönt ($K_d = 0.50$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



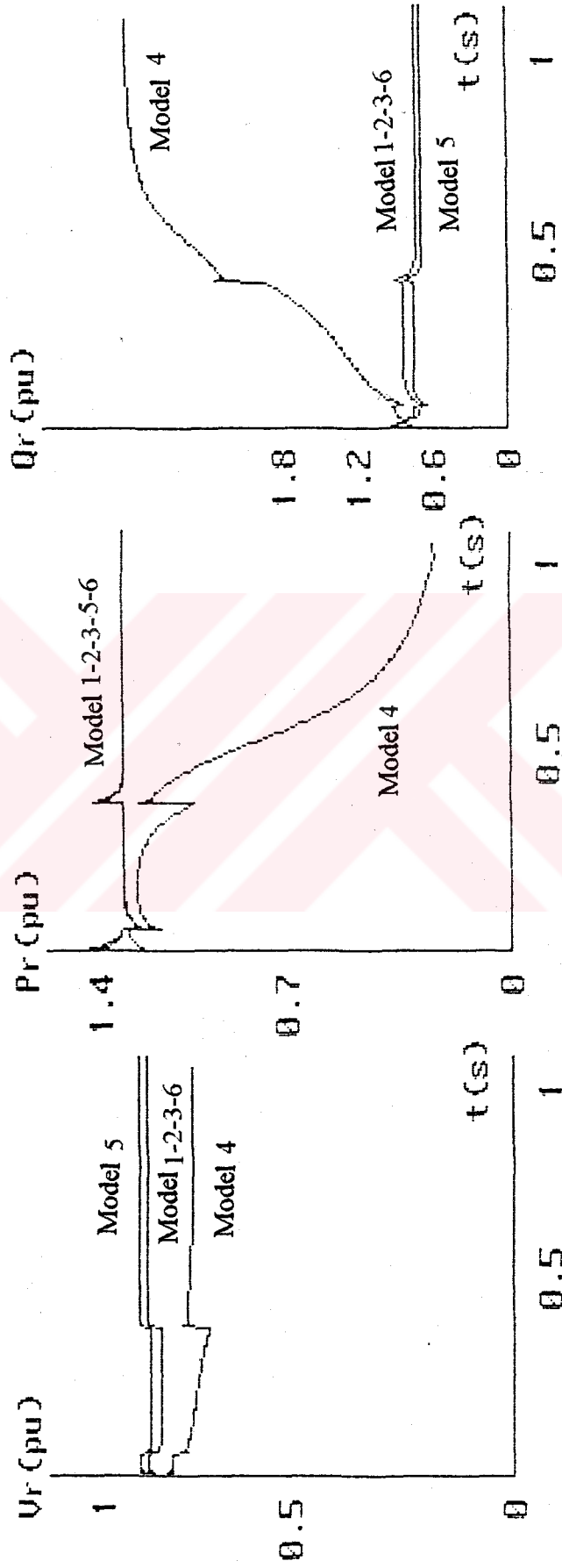
Şekil G.9. İletim hattına, % 25 Seri ($K_s = 0.25$), ve % 75 Şönt ($K_d = 0.75$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



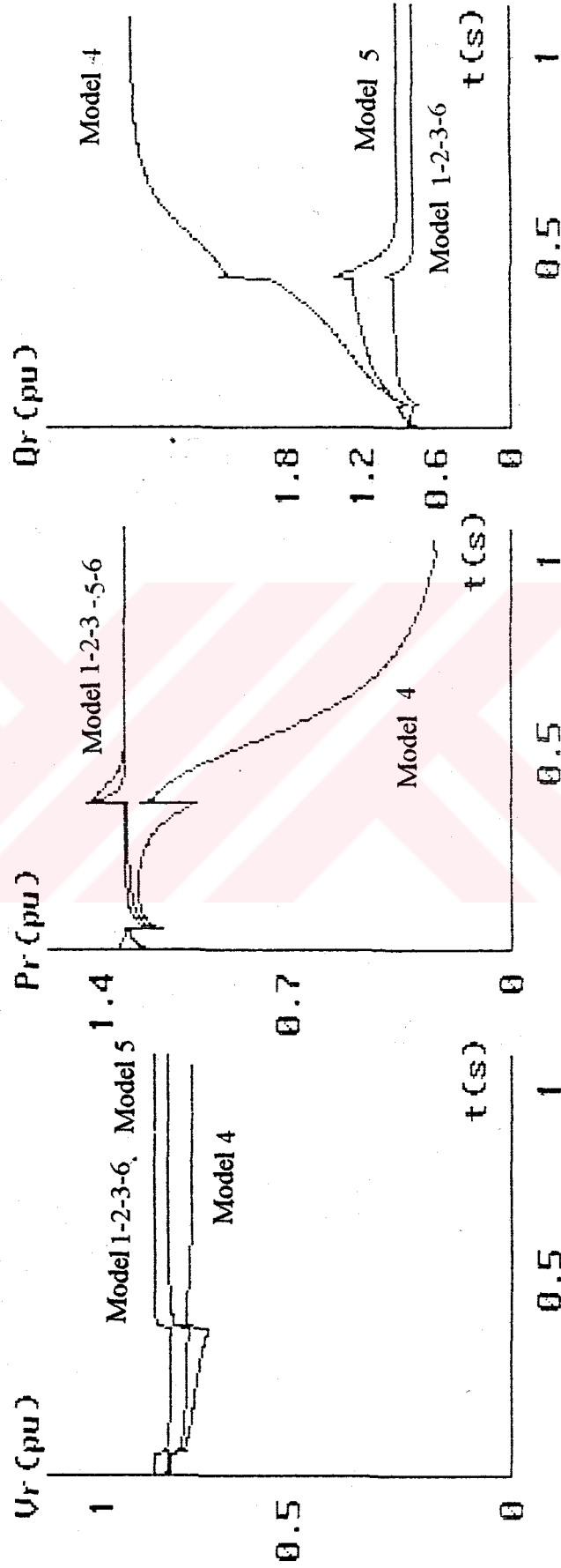
Şekil G.10. İletim hattına, % 25 Seri ($K_s=0.25$), ve % 95 Şönt ($K_d=0.95$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



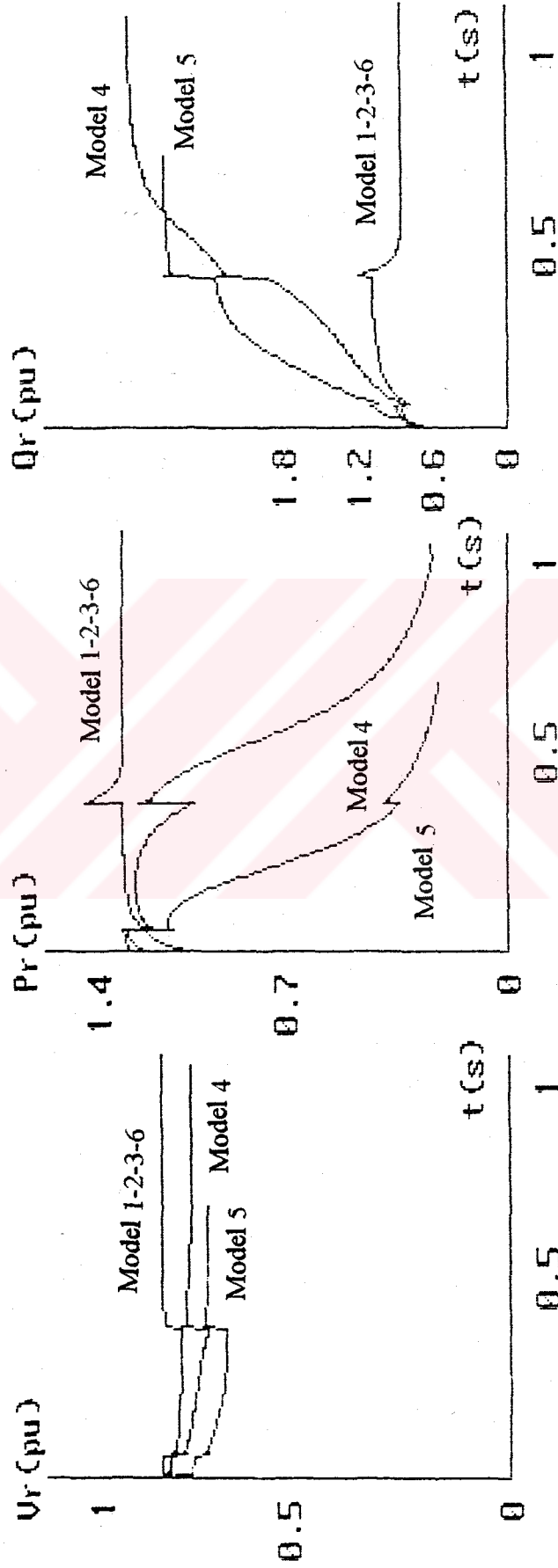
Şekil G.11. İletim hattına, % 50 Seri ($K_s=0.50$), ve % 0 Şönt ($K_d=0$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



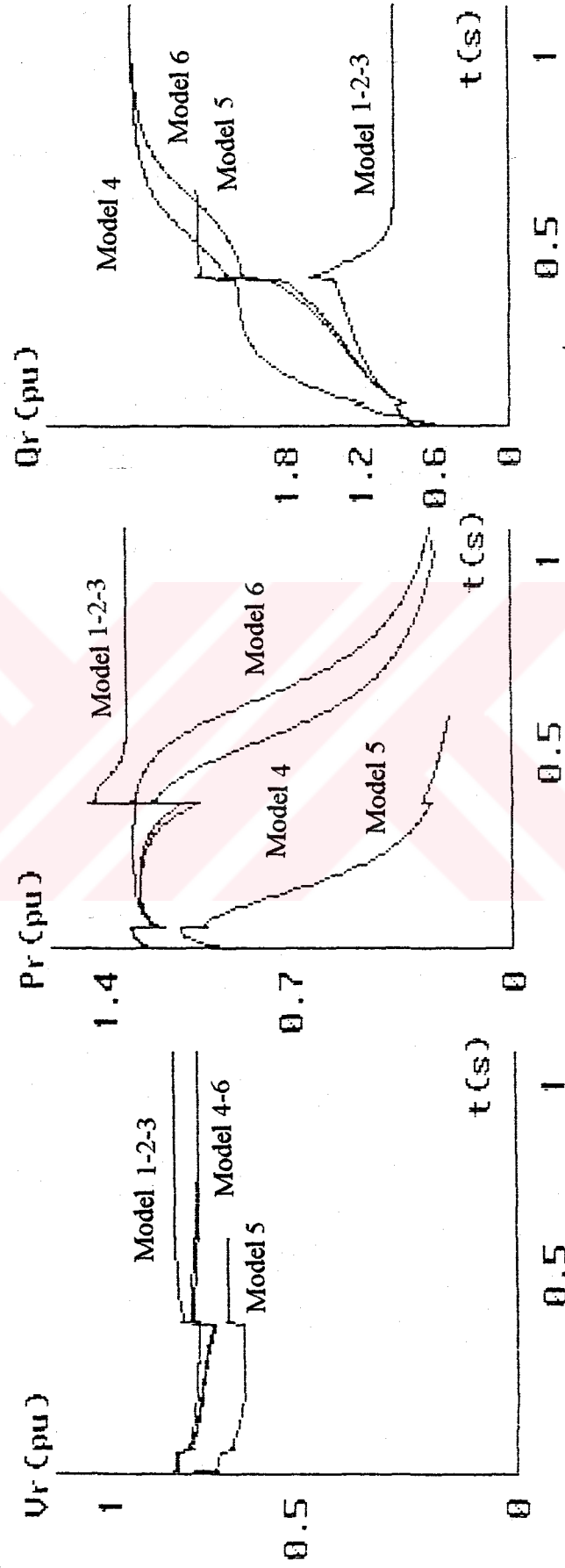
Şekil G.12. İletim hattına, % 50 Seri ($K_s=0.50$), ve % 25 Şönt ($K_d=0.25$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



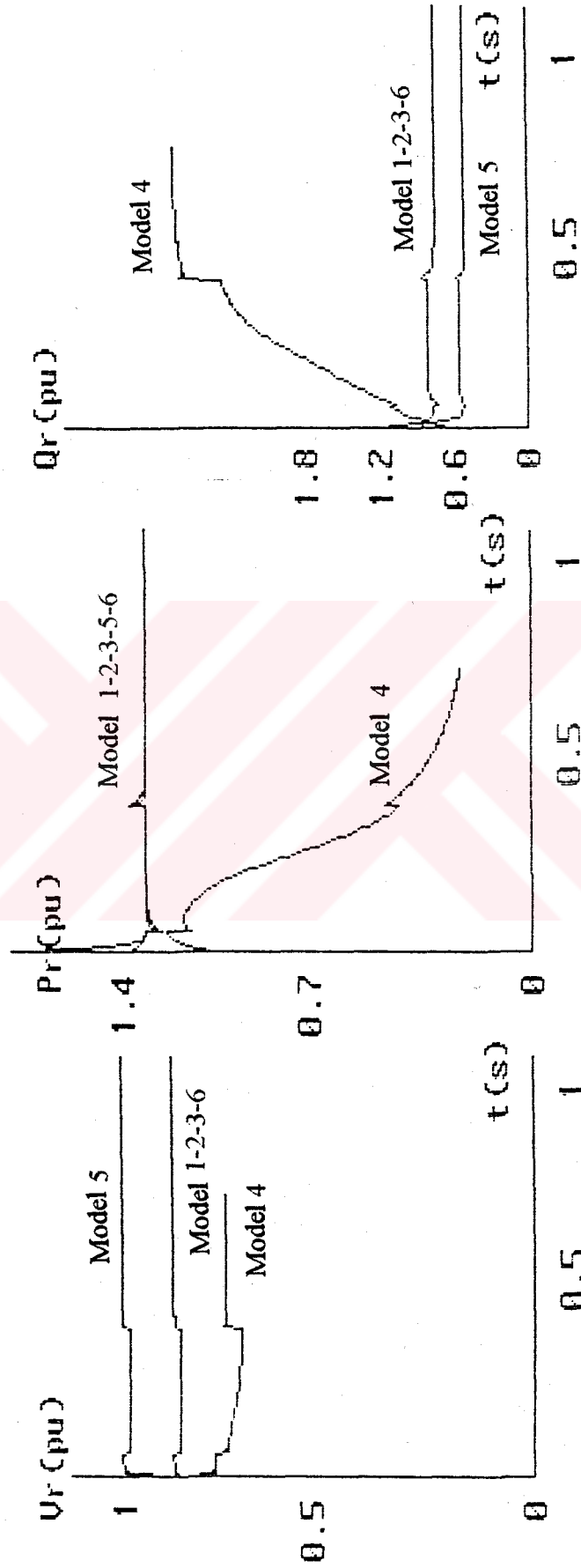
Şekil G.13. İletim hattına, % 50 Seri ($K_s=0.50$), ve % 50 Şönt ($K_d=0.50$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



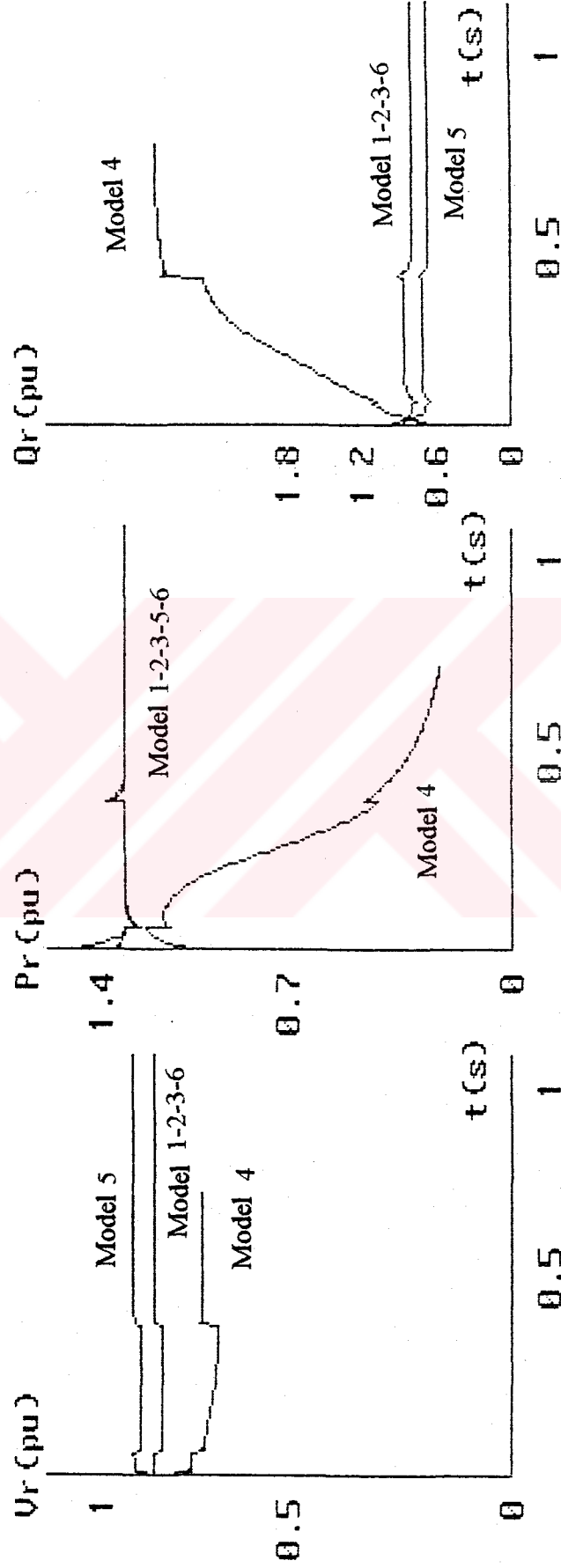
Şekil G.14. İletim hattına , % 50 Seri ($K_s=0.50$), ve % 75 Şönt ($K_d=0.75$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



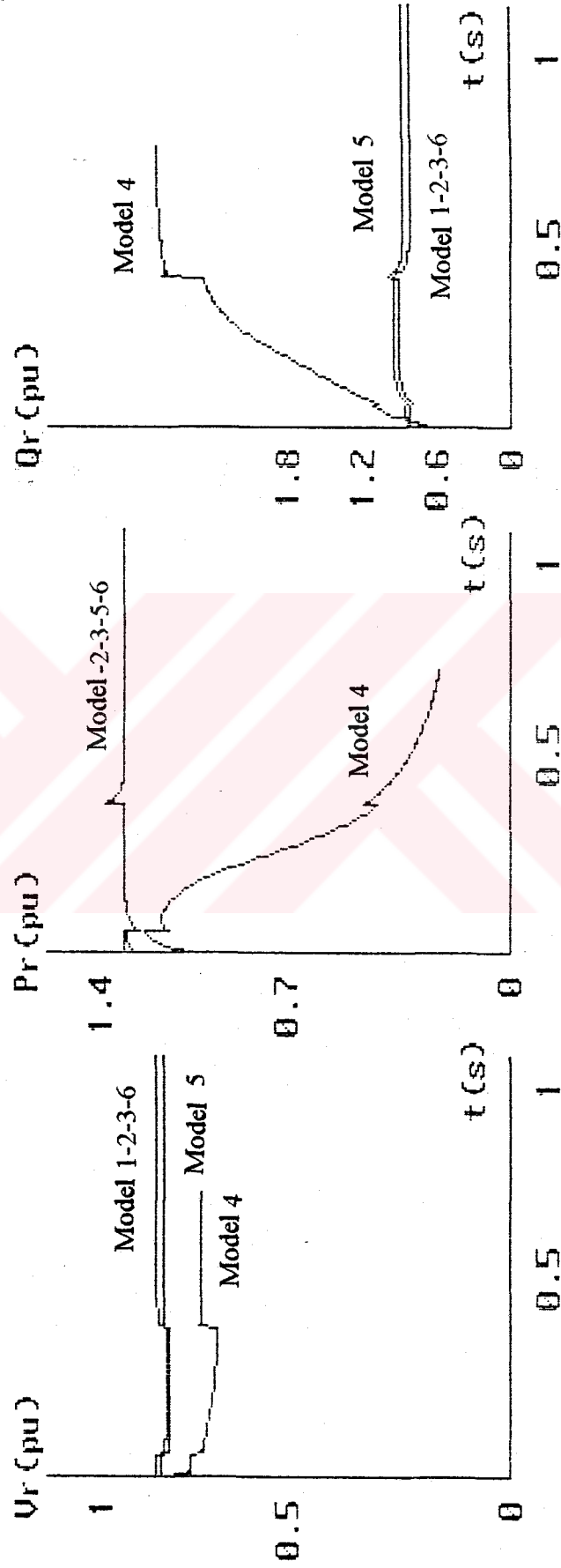
Şekil G.15. İletim hattına, % 50 Seri ($K_s=0.50$), ve % 95 Şönt ($K_d=0.95$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu elki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



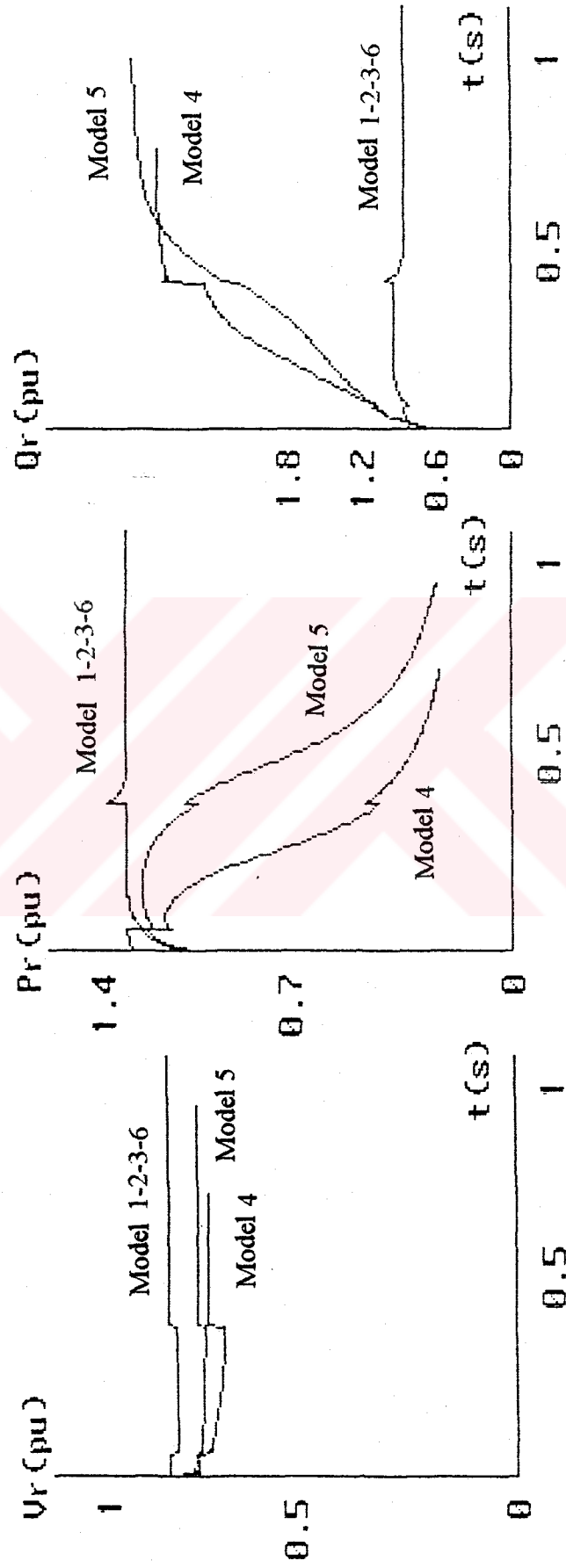
Şekil G.16. İletim hattına , % 75 Seri ($K_s=0.75$), ve % 0 Şönt ($K_d=0$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



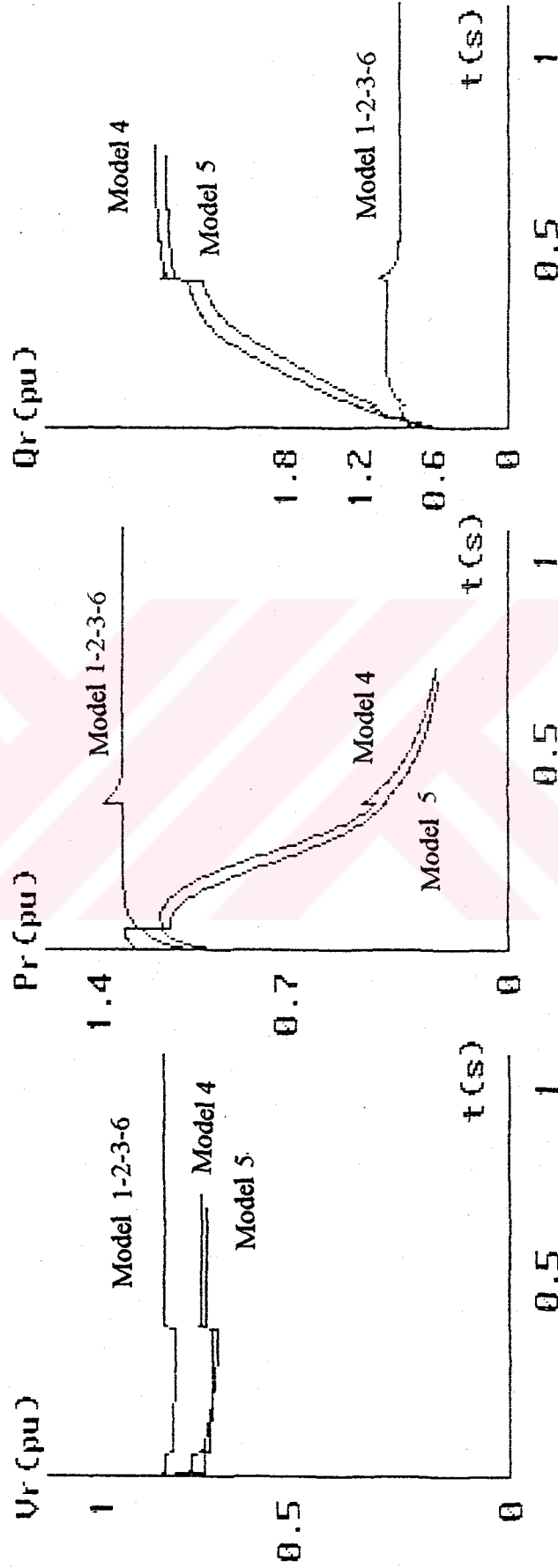
Şekil G.17. İletim hattına , % 75 Seri ($K_s=0.75$), ve % 25 Şönt ($K_d=0.25$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



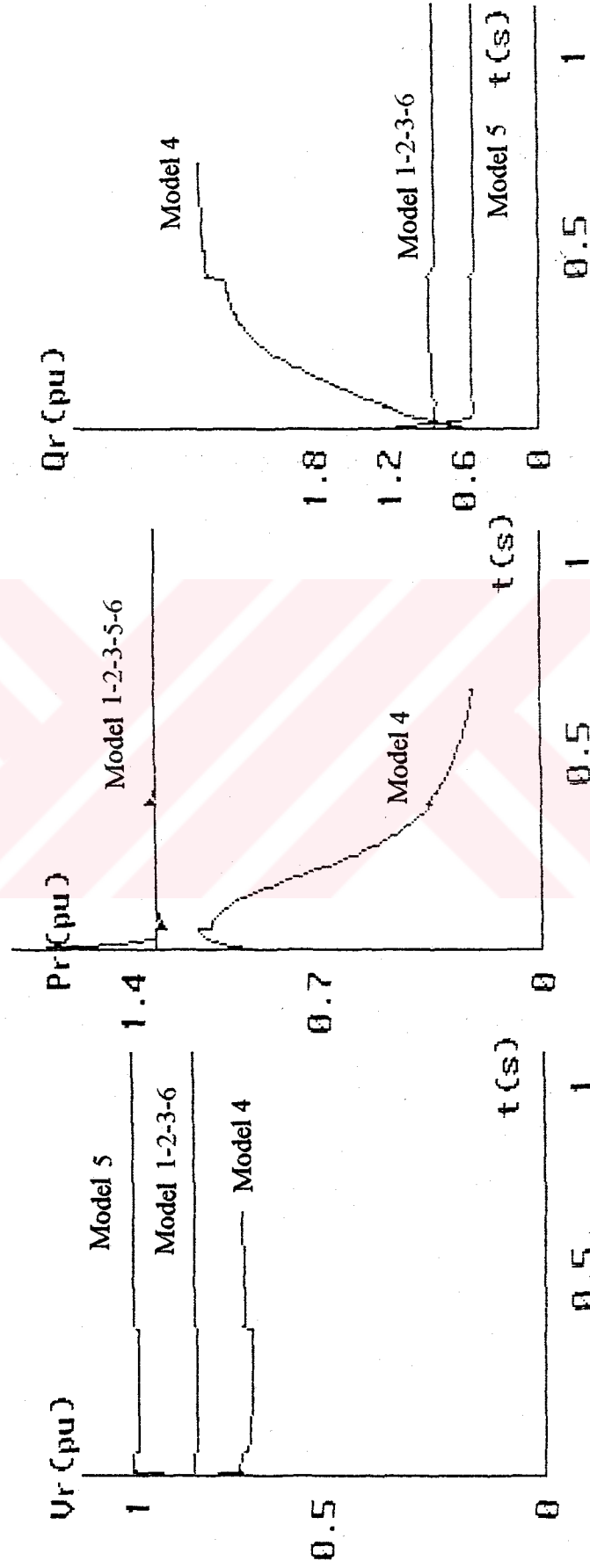
Şekil G.18. İletim hattına, % 75 Seri ($K_s=0.75$), ve % 50 Şönt ($K_d=0.50$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



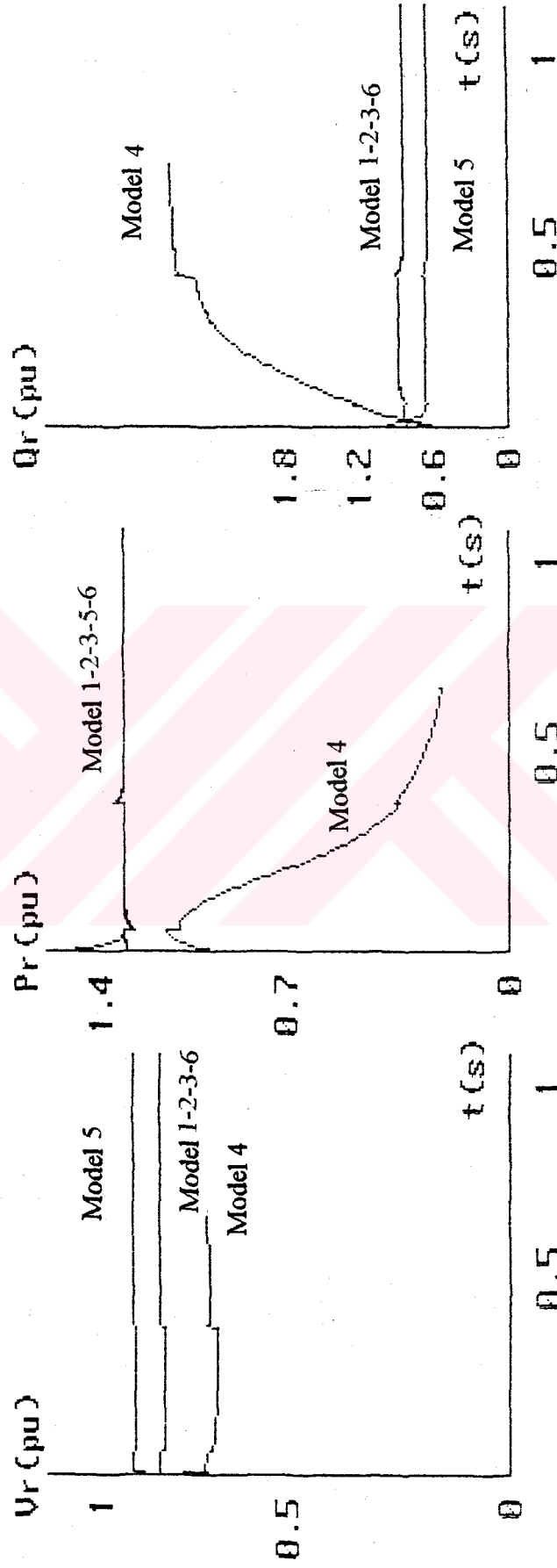
Şekil G.19. İletim hattına, % 75 Seri ($K_s=0.75$), ve % 75 Şönt ($K_d=0.75$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



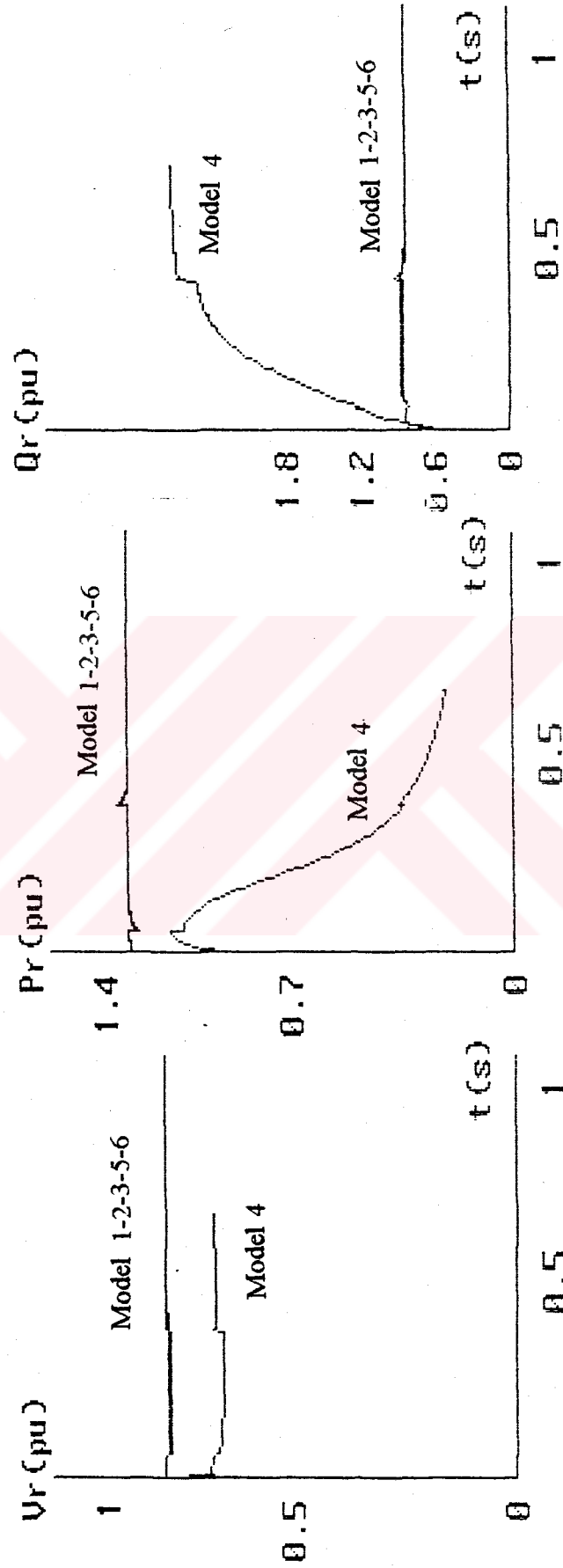
Şekil G.20. İletim hattına, % 75 Seri ($K_s=0.75$), ve % 95 Şönt ($K_d=0.95$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



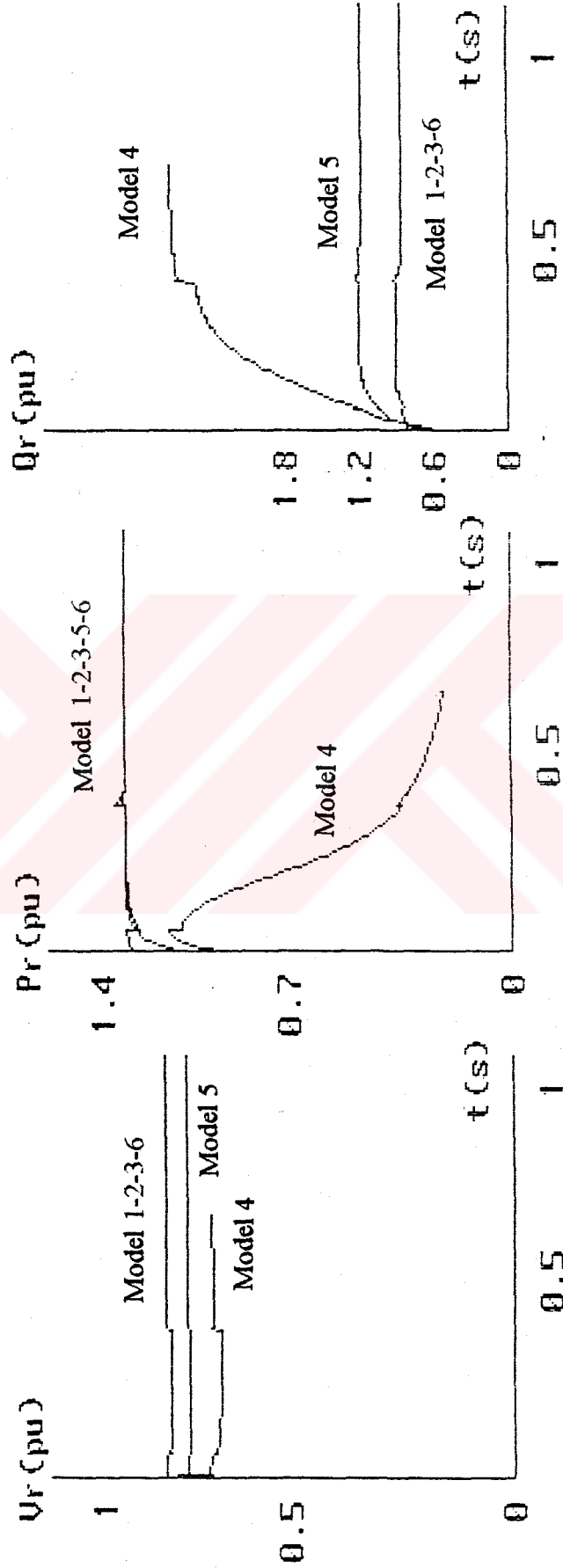
Şekil G.21. İletim hattına, % 95 Seri ($K_s=0.95$), ve % 0 Şönt ($K_d=0$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



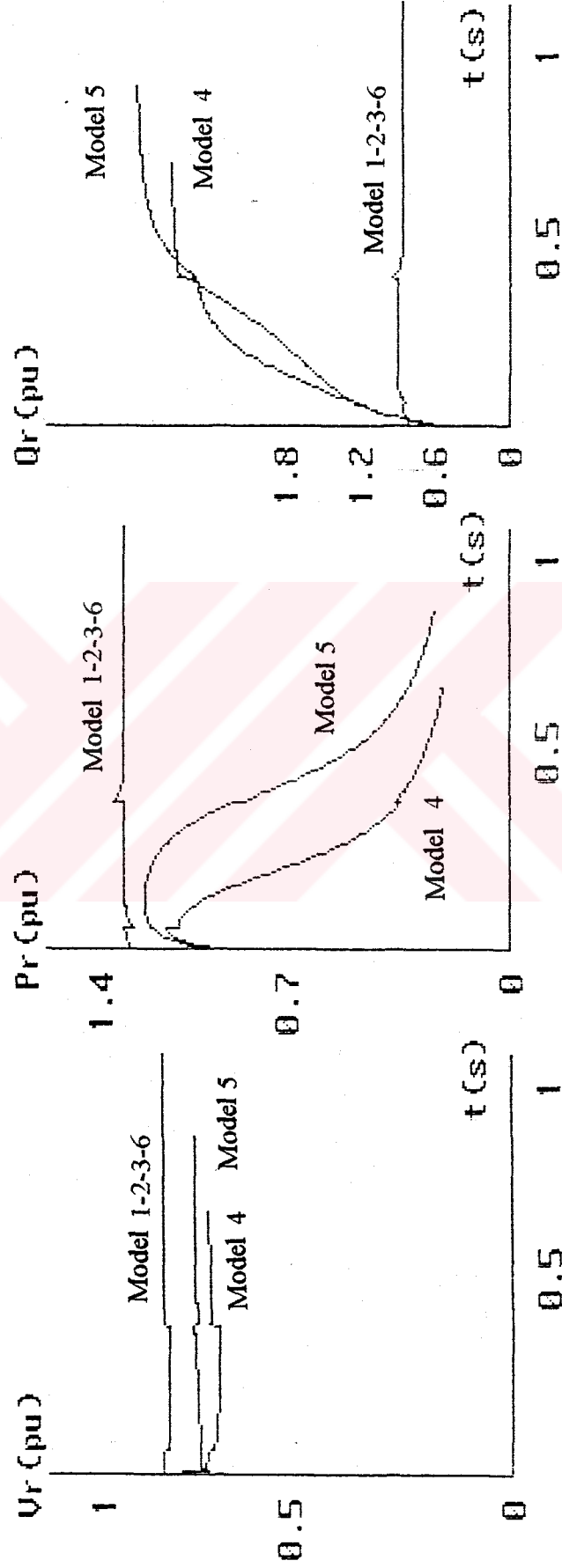
Şekil G.22. İletim hattına, % 95 Seri ($K_s=0.95$), ve % 25 Şönt ($K_d=0.25$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



Şekil G.23. İletim hattına, % 95 Seri ($K_s=0.95$), ve % 50 Şönt ($K_d=0.50$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



Şekil G.24. İletim hattına, % 95 Seri ($K_s=0.95$), ve % 75 Şönt ($K_d=0.75$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.



Şekil G.25. İletim hattına, % 95 Seri ($K_s=0.95$), ve % 95 Şönt ($K_d=0.95$) kompanzasyon yapılması durumlarında, bozucu etki sonrası, asenkron motor yükünün a) uç geriliminin, b) çektiği aktif gücün, c) çektiği reaktif gücün değişimleri.

EK H

PROGRAMLAR

```
C *****
C N BARALI SİSTEMİN 2 BARALI SİSTEME İNDİRGENEREK *
C GERİLİM KARARLILIĞI ACISINDAN KRİTK DEĞERLERİNİN *
C HESAPLANMASI *
C *****
C
C NEL : Eleman (hat) sayısı
C N : Bara sayısı
C SB : Salınım bara no
C Sbase: Baz Güç
C pv : Reaktif güç kısıtlamalı PV bara sayısı
C py : İlgilenilen herhangi bir yük barası
C Qmak : Generatörün verebileceği maksimum reaktif güç
C Qmin : Generatörün verebileceği minimum reaktif güç
C Ybara: Bara Admitans Matrisi
C katpy: (i). baranın yükü için çarpan
C katqy: sistemin tüm yük baraları için çarpan
C katvy: sistemin tüm üretim baraları için çarpan
C
CC *****
C
C $debug
C c234567
C c ana : barin+elim+son+ara
C
C      call barino
C      call elims
C      call sons
C      call aras
C      stop
C      end
C
C      . subroutine barino
C $debug
C $large
C      COMMON NEL,N,SB,SBASE,EPS,pv,py
C      character *80 may
C      COMPLEX E(25),S(25),AI(25),ANM,V(50)
C      COMPLEX Z,YST,X,Y,Y1,YBARA,YSHT,VLF1,VLF2,VLF3,SLF,S
```

```

WB,YPQ complex
zlc(25),YIC(25),zbara(25,25),YBAR(25,25) INTEGER
NEL,SB,SBASE,KITER
DOUBLE PRECISION EPS,PB,QB
DIMENSION
IA(25),JA(25),Z(25),YST(25),YBARA(25,25),YSH
T(25,25) DIMENSION
AJAC(50,50),ER(25),EF(25),G(50,50),B(50,50),
AA(50,50) DIMENSION
P(25),Q(25),PK(25),QK(25),DP(25),DQ(25),EG(2 5)
DIMENSION
ACR(25),ADI(50),DPQ(50),DE(50),DER(50),DEI(5 0)
DIMENSION TETA(25),EV(25)
C
DIMENSION DV(25),AV(25),tut(25),Qmak(20),Qmin(20)
DIMENSION VCRT(25),ppk(25),qqk(25)
INTEGER PV,PY,i,j,tut
REAL katpy,katpq,katpv
C 1
READ(1,*) NEL,N,SB,SBASE,EPS,pv,py
DO 2 I=1,NEL
2 READ(1,*) IA(I),JA(I),Z(I),YST(I)
DO 12 K=1,N
12 READ(1,*) E(K),S(K)
do 13 ii=n-pv,n-1
13 read(11,*) Qmak(ii),Qmin(ii)
C
CALL YBUS(N,NEL,IA,JA,Z,YST,YBARA,YSHT)
C
write(*,*)' katpy * katpq * katpv degerlerini girin'
READ(*,*) katpy,katpq,katpv
c
DO 654 j=1,N-pv-1
if(j.eq.py) then
S(j)=katpy*S(j)
else
S(j)=katpq*S(j)
endif
654 continue
do 653 j=n-pv,n-1
S(j)=katpv*S(j)
653 continue
C
write(*,*)' YUK AKISI ANALIZI YAPILIYOR'
CALL FLOW(Qmak,Qmin,YBARA,YSHT,E,S,NEL,N,SB,SBASE,
EPS, #pv,pk,qk,er,ef)
write(*,*)' YUK AKISI ANALIZI TAMAMLANDI'
write(*,*)' -----'
C
CALL Zi(PY,n,pv,pk,qk,er,ef,YIC,SBASE,TEVEN)
C
DO 221 i=1,N
DO 221 j=1,N
YBAR(i,j)=(0.,0.)
221 YBAR(i,j)=ybar(i,j)+YBARA(i,j)
C

```

```

      CALL YBUSY(n,pv,py,YIC,YBAR)
C *****
      write(9,*) py,n,pk(py),qk(py),er(n)
      do 224 i=1,n
      do 224 j=1,n
224  write(9,*) YBAR(i,j)
      close(9)
C *****
      DO 225 i=1,N
      DO 225 j=1,N
      YBaRA(i,j)=(0.,0.)
225  YBaRA(i,j)=ybara(i,j)+YBAR(i,j)
C
655  return
      END

C *****
C   DECOUPLED YUK AKISI
C   (GENERATORLERDE REAKTIF GUC KISITLAMALARI MEVCUT)
C *****
      subroutine
      FLOW(Qmak,Qmin,YBARA,YSHT,E,S,NEL,N,SB,SBASE, EPS,
      #pv,pk,qk,er,ef)
      COMPLEX E(25),S(25),AI(25),ANM,V(50)
      COMPLEX Z,YST,X,Y,Y1,YBARA,YSHT,VLF1,VLF2,VLF3,SLF,S
      WB,YPQ complex z1c(25)
      INTEGER NEL,SB,SBASE,KITER
      DOUBLE PRECISION EPS,PB,QB
      DIMENSION
      IA(25),JA(25),Z(25),YST(25),YBARA(25,25),YSH
      T(25,25) DIMENSION
      AJAC(50,50),ER(25),EF(25),G(50,50),B(50,50),
      AA(50,50) DIMENSION
      P(25),Q(25),PK(25),QK(25),DP(25),DQ(25),EG(2 5)
      DIMENSION
      ACR(25),ADI(25),DPQ(50),DE(50),DER(50),DEI(5 0)
      DIMENSION TETA(25),EV(25)
      DIMENSION DV(25),AV(25),tut(25),Qmak(20),Qmin(20)
      INTEGER pv,tut
C
      NEK=N-1
      ANM=(0.000,-1.000)
C
      DO 12 K=1,N
C 12  READ(1,*) E(K),S(K)
      DO 13 K=1,N
      DO 13 L=1,N
      G(K,L)=REAL(YBARA(K,L))
      B(K,L)=AIMAG(YBARA(K,L))
23  CONTINUE
      DO 14 M=1,N
      ER(M)=REAL(E(M))
      EF(M)=AIMAG(E(M))
      teta(m)=atan(EF(M)/ER(M))
      ev(m)=sqrt(er(m)*er(m)+ef(m)*ef(m))
C
      AV(m)=ev(m)

```

```

C      P(M)=REAL(S(M))
      Q(M)=AIMAG(S(M))
14     CONTINUE
      KITER=1
15     WRITE(7,*) 'ITERASYON SAYISI :',KITER
      J=1
C
20     IF(J.EQ.SB) GOTO 100
      AP=0.0
      AQ=0.0
      DO 50 L=1,N AP=AP+EV(J)*EV(L)*(G(J,L)*COS(TETA(J)-
      TETA(L))+B(J,L)* :SIN(TETA(J)-TETA(L)))
      AQ=AQ+EV(J)*EV(L)*(G(J,L)*SIN(TETA(J)-TETA(L))-
      B(J,L)* :COS(TETA(J)-TETA(L)))
50     CONTINUE
      PK(J)=AP
      QK(J)=AQ
100    J=J+1
      IF(J.GT.N) GOTO 200
      GOTO 20
200    DO 300 M=1,N
      IF(M.EQ.SB) GOTO 300
      DP(M)=P(M)-PK(M)
300    CONTINUE
      DO 301 Mn=1,N-pv-1
      DQ(Mn)=Q(Mn)-QK(Mn)
301    CONTINUE
C *****
C
C      REAKTIF GUC SINIRLARININ KONTROLU
C
C *****
      if(kiter.lt.2) goto 124
      maksay=0
C
      DO 302 Mn=N-pv,N-1
C *****
      if(Qk(Mn).GT.Qmak(Mn)) then
      Q(mn)=Qk(Mn)
      Qk(Mn)=Qmak(Mn)
      DQ(Mn)=Qk(Mn)-Q(Mn)
      maksay=maksay+1
      tut(maksay)=Mn
      else
C      ev(mn)=av(mn)
      endif
C
      if(Qk(Mn).LT.Qmin(Mn)) then
      Q(mn)=QK(Mn)
      Qk(Mn)=Qmin(Mn)
      DQ(Mn)=Qk(Mn)-Q(Mn)
      maksay=maksay+1
      tut(maksay)=Mn
      else
C      ev(mn)=av(mn)

```

```

endif
C *****
C write(*,*) mn,tut(maksay),maksay,DQ(mn),q(mn)
C *****
302 CONTINUE
C *****
C MAX DEGER HESABI
C
C
124 PB=0.0
DO 400 M=1,N
IF(M.EQ.SB) GOTO 400
IF(ABS(DP(M)).LE.PB) GOTO 400
PB=ABS(DP(M))
400 CONTINUE
C
C WRITE(7,*) 'EPSILON *****'
C WRITE(7,*) PB
QB=0.0
DO 450 J=1,N-1-pv
IF(J.EQ.SB) GOTO 450
IF(ABS(DQ(J)).LE.QB) GOTO 450
QB=ABS(DQ(J))
450 CONTINUE
C WRITE(7,*) QB
C WRITE(*,*) PB,QB
C c IF((PB.LE.EPS).AND.(QB.LE.EPS).and.(VB.LE.EP S))
GOTO 2000 IF((PB.LE.EPS).AND.(QB.LE.EPS)) GOTO 2000
C IF(PB.LE.EPS) GOTO 2000
C
C WRITE(7,*) 'EPS BITTI *****'
C
C JAKOBIYENIN HESABI
C
C
C J1 in HESABI
C
21 DO 600 I=1,N-1
DO 600 J=1,N-1
IF(I.EQ.J) THEN
AJAC(I,J)=-EV(J)*EV(J)*B(J,J)-QK(I)
ELSE AJAC(I,J)=EV(I)*EV(J)*(G(I,J)*SIN(TETA(I)-
teta(j))-B(I,J)*:COS(TETA(I)-teta(j)))
ENDIF
600 CONTINUE
C
C
C J2 nin HESABI
C
DO 700 I=1,N-1
DO 700 J=1,N-1
IF(I.EQ.J) THEN
AJAC(I,J+NEK)=0.
ELSE
AJAC(I,J+NEK)=0.

```

```

      ENDIF
700 CONTINUE
C
C      J3 un HESABI
C
      DO 800 I=1,N-1
      DO 800 J=1,N-1
      IF(I.EQ.J) THEN
      AJAC(I+NEK,J)=0.
      ELSE
      AJAC(I+NEK,J)=0.
      ENDIF
800 CONTINUE
C
C      J4 un HESABI
C
      DO 900 I=1,N-1-pv
      DO 900 J=1,N-1
      IF(I.EQ.J) THEN AJAC(I+NEK,J+NEK)=-
      EV(I)*EV(I)*B(J,J)+QK(I)
      ELSE AJAC(I+NEK,J+NEK)=EV(I)*EV(J)*(G(I,J)*SIN(TE
      TA(I)-teta(j))-B(I,J)* :COS(TETA(I)-teta(j)))
      ENDIF
900 CONTINUE
C
C
C      J4'
C
      if(maksay.eq.0) goto 109
      msay=0
      DO 902 I=N-pv,N-pv+maksay-1
      jj=I
C
      msay=msay+1
      ii=tut(msay)
      DO 901 J=1,N-1
C
      IF(I.EQ.J) THEN
C      AJAC(I+NEK,J+NEK)=-EV(II)*EV(II)*B(J,J)+QK(II)
      AJAC(I+NEK,J+NEK)=-EV(II)*EV(II)*B(II,II)+QK(II)
C
      ELSE
      if(j.eq.ii) then
      IF(JJ.EQ.II) GOTO 131
C
      AJAC(I+NEK,J+NEK)=EV(II)*EV(Jj)*(G(II,jJ)*SIN
      (TETA(II) :-teta(j))-B(II,jj)*COS(TETA(II)-teta(jj)))
C
131 bos=0
      else
C
      AJAC(I+NEK,J+NEK)=EV(II)*EV(J)*(G(II,J)*SIN(T ETA(II)
      :-teta(j))-B(II,J)*COS(TETA(II)-teta(j)))
      endif
      ENDIF
901 CONTINUE

```

```

c      write(*,*)' I, II ',I,II
902 CONTINUE
C
C pivot
C
      msay=0
      do 751 ik=1,maksay
      msay=msay+1
      do 751 i=1,N-1-pv
      J=N-pv+msay-1
      JJ=tut(msay)
      AJAn=ajac(I+NEK,J+NEK)
      AJAC(I+NEK,J+NEK)=ajac(I+NEK,nek+JJ)
      ajac(I+NEK,nek+JJ)=ajan
c      write(*,*)' pivot',j,jj
751 CONTINUE
C
C
109 M=2*NEK-pv+maksay
      WRITE(*,*) ' M ',m
C      DO 303 I=1,M
C 303 WRITE(33,*) (AJAC(I,J),J=1,M)
C
C ***** TERS JACOB *****
C
      DO 110 K=1,M
      DO 120 J=1,M
      IF(J.NE.K) THEN
      AJAC(K,J)=AJAC(K,J)/AJAC(K,K)
      ELSE
      GOTO 120
      END IF
120 CONTINUE
      AJAC(K,K)=1/AJAC(K,K)
      DO 130 I=1,M
      IF(I.EQ.K) THEN
      GOTO 130
      ELSE
      END IF
      DO 140 J=1,M
      IF(J.NE.K) THEN
      AJAC(I,J)=AJAC(I,J)-AJAC(I,K)*AJAC(K,J)
      ELSE
      GOTO 140
      END IF
140 CONTINUE
      AJAC(I,K)=-AJAC(I,K)*AJAC(K,K)
130 CONTINUE
110 CONTINUE
C
C      Vp=Vp+DVp 'nin HESAPLANMASI
C
      DO 999 I=1,2*N-2
      DPQ(I)=0.
      DE(I)=0.

```

```

999 CONTINUE
c
  DO 950 I=1,N-1
    DPQ(I)=DP(I)
950 CONTINUE
    DO 951 I=1,N-1-pv
      DPQ(I+NEK)=DQ(I)
951 CONTINUE
c
  if(maksay.eq.0) goto 953
  msay=0
  DO 952 I=N-pv,n-pv+maksay-1
    msay=msay+1
    II=tut(msay)
    DPQ(I+NEK)=DQ(II)
952 CONTINUE
953 DO 1000 I=1,M
  ADE=0.0
  DO 1050 J=1,M
    ADE=ADE+AJAC(I,J)*DPQ(J)
1050 CONTINUE
  DE(I)=ADE
1000 CONTINUE
  DO 1100 I=1,N-1
1100 DER(I)=DE(I)
  DO 1150 I=1,N-1
1150 DEI(I)=DE(I+NEK)
c
  DO 1200 I=1,N-1
c
  ER(I)=ER(I)+DER(I)
c
  EF(I)=EF(I)+DEI(I)
  TETA(I)=TETA(I)+DER(I)
1200 CONTINUE
  DO 1201 I=1,N-1-pv
    EV(I)=EV(I)+DEI(I)
1201 CONTINUE
c
  if(maksay.eq.0) goto 1203
  msay=0
  DO 1202 I=N-pv,n-pv+maksay-1
    msay=msay+1
    II=TUT(MSAY)
    EV(II)=EV(II)+DEI(I)
1202 CONTINUE
1203 WRITE(*,*) 'EV(I)'
c *****
  do 304 mm=n-pv,n-1
    if((Q(Mm).LE.Qmak(Mm)).and.(Q(Mm).GE.Qmin(Mm)))
    then ev(Mm)=av(Mm)
    else
    endif
  304 CONTINUE
c *****
  KITER=KITER+1
  GOTO 15
c

```

YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI
KÜLTÜR VE TURİZM KURULU
KÜLTÜR VE TURİZM KURULU

```

2000 DO 2100 I=1,N
      EG(I)=EV(I)
      ER(I)=EG(I)*COS(TETA(I))
      EF(I)=EG(I)*SIN(TETA(I))
      V(I)=CMPLX(ER(I),EF(I))
C      WRITE(8,*) K,I,EG(I)
2100 CONTINUE
C
cc      WRITE(8,*) ' ***** YUK AKISI ***** '
cc      WRITE(8,87)
cc 87  FORMAT(1X,T10,'--',T15,'--
      ',T30,'MEGAWATT',T40,'MEGAVAR') SWB=(0.0,0.0)
      DO 40 I=1,N
      DO 45 J=1,N
      IF(I.EQ.J) GO TO 45
      YPQ=-YBARA(I,J)
      VLF1=CONJG(V(I))
      VLF2=V(I)-V(J)
      VLF3=V(I)*VLF1
      SLF=VLF1*VLF2*YPQ+VLF3*YSHT(I,J)
      SLF=SBASE*CONJG(SLF)
      IF(I.NE.SB) GO TO 53
      SWB=SWB+SLF
53  KONT=CABS(SLF)
      IF(KONT.EQ.0) GO TO 45
cc      WRITE(8,88) I,J,SLF
cc 88  FORMAT(1X,T10,I2,T15,I2,T30,F8.3,3X,T40,F8.3)
45  CONTINUE
40  CONTINUE
cc      WRITE(8,*) ' -----'
cc      WRITE(8,*) ' SALINIM BARASI GUCU:',SWB,'MVA'
cc      WRITE(8,*) ' -----'
C
      PK(N)=REAL(SWB)
      QK(N)=AIMAG(SWB)
      DO 5001 I=1,N-1
      PK(I)=PK(I)*SBASE
5001 QK(I)=QK(I)*SBASE
C
      WRITE(8,*) ' BARA GUCLERI BARA GERILIMLERI
      ' WRITE(8,*) ' -----'
      DO 5000 I=1,N
      S(I)=CMPLX(PK(I),QK(I))
c 5000 WRITE(8,85) I,PK(I),QK(I),EG(I),ER(I)
      teta(i)=(180.)*TETA(I)/3.1415926
5000 Write(8,85) I,PK(I),QK(I),EG(I),teta(i)
      85 FORMAT(3X,I2,3X,'(',F10.4,',',F10.4,')',5X,'(',F7.
4,',',F10.4,')')
c      WRITE(8,*) ' -----'
cc      WRITE(8,*) ' ITERASYON SAYISI=',KITER
cc      WRITE(8,*) ' -----'
      close(8)
      RETURN
      END

```

```

c *****
c SALINIM BARASI ile iLGİLENİLEN BARA DISINDAKİ
c BARALARDA GUCLERİN ESDEĞER ADMİTANSLARA DONUSTURULMESİ
c *****
c
c bu subroutine py,teven eklendi
c
c      subroutine zi(PY,n,pv,pk,qk,er,ef,YIC,SBASE,TEVEN)
c234567
c      dimension pk(25),qk(25),er(25),ef(25),v(25)
c      complex zlc(25),YIC(25)
c      INTEGER pv,PY
c      SBS=sbase
c      SBAS=100.
c      do 1 i=1,N
c
c      c      if(i.lt.(n-pv)) then
c      pk(i)=-1.*pk(i)
c      qk(i)=-1.*qk(i)
c      c      else
c      c      endif
c      c      sil
c      fi=atan(qk(i)/pk(i))
c      v(i)=sqrt(er(i)*er(i)+ef(i)*ef(i))
c      zl=(V(i)**2)*cos(fi)/(pk(i)/SBAS)
c      zlr=zl*cos(fi)
c      zli=zl*sin(fi)
c      zlc(i)=cmplx(zlr,zli)
c      YIC(I)=1./zlc(i)
c      if(i.eq.PY) then
c      TEVEN=zl
c      else
c      endif
c      write(*,*) ' *** ',i,zl
c      1 continue
c      return
c      end
c *****
c
c ELDE EDİLEN YENİ ADMİTANSLARIN, Ybara'nın
c KOSEGEN ELEMANLARINA EKLENMESİ
c
c *****
c      subroutine ybUSY(n,pv,py,YIC,YBAR)
c      COMPLEX YBAR(25,25),YIC(25)
c      INTEGER PY,pv
c
c      c      do 3 i=1,n
c      do 3 j=1,n
c      if(i.eq.py.and.j.eq.py) GOTO 3
c      if(i.eq.n.and.j.eq.n) GOTO 3
c      if(j.eq.i) then
c      ybar(i,j)=ybar(i,j)+YIC(I)
c      else
c      ybar(i,j)=ybar(i,j)
c      endif

```

```

3  continue
   return
   end
C *****
C
C  BARA ADMITANS MATRISININ KURULMASI
C *****
   SUBROUTINE YBUS(N,NEL,IA,JA,Z,YST,YBARA,YSHT)
   COMPLEX Z,YST,X,Y,Y1,YBARA,YSHT,VLF1,VLF2,VLF3,SLF,S
   WB,YPQ DIMENSION
   IA(25),JA(25),Z(25),YST(25),YBARA(25,25),YSH
   T(25,25)
C
C
C
   DO 7 I=1,NEL
   DO 7 J=1,NEL
   YSHT(I,J)=(0.0,0.0)
7  CONTINUE
   DO 3 I=1,NEL
   Y=1/Z(I)
   Y1=YST(I)
   IB=IA(I)
   JB=JA(I)
   YBARA(IB,JB)=-Y
   YBARA(JB,IB)=-Y
   YBARA(IB,IB)=YBARA(IB,IB)+Y+Y1
   YBARA(JB,JB)=YBARA(JB,JB)+Y+Y1
   YSHT(IB,JB)=Y1
   YSHT(JB,IB)=Y1
3  CONTINUE
   RETURN
   END
C
C *****
C  Ybara 'nin DUZENLENMESI
C *****

   subroutine elims
c234567
   complex ybara(20,20),y2i(20,20),yi2(20,20)
   integer py,say
c   read(2,*) n,ii,jj
   read(2,*) py,n,pk,qk,vn
   do 1 i=1,n
   do 1 j=1,n
1  read(2,*) ybara(i,j)
   close(2)
c
   say=0
   ii=1
   jj=py
c
c   satır
c

```

```

100  do 3 i=1,n
      3  y2i(ii,i)=ybara(ii,i)
        do 4 i=1,n
          4  ybara(ii,i)=ybara(jj,i)
            do 5 i=1,n
              5  ybara(jj,i)=y2i(ii,i)
c
c      sütun
c
        do 6 i=1,n
          6  yi2(i,ii)=ybara(i,ii)
            do 7 i=1,n
              7  ybara(i,ii)=ybara(i,jj)
                do 8 i=1,n
                  8  ybara(i,jj)=yi2(i,ii)
c
        say=say+1
        ii=2
        jj=n
        if(say.gt.1) goto 200
        goto 100
c
c sonuc
c
200  write(10,*) n,pk,qk,vn
c      write(10,*) n
        do 9 i=1,n
          do 9 j=1,n
            9  write(10,*) ybara(i,j)
          close(10)
        return
      end
c*****
c  Yeni (nxn)'lin Bara ADMITANS MATRISININ
c  (2x2) ' lik duruma indirgenmesi
c*****
c
c subroutine sons
c
c234567
c ybc for
C
C      A-BDC
C
      COMPLEX YA(25,25),YB(25,25),YC(25,25),YD(25,25),zbar
      a COMPLEX
      YBARA(25,25),YDC(20,20),YBDC(20,20),YABDC(3, 3) C
      READ(3,*) N,pk,qk,vn
      write(*,*) n,pk,qk,vn
c
      DO 2 I=1,N
      DO 2 J=1,N
        read(3,*) ybara(i,j)
      2  CONTINUE
      close(3)
C

```

```

      DO 4 I=1,2
      DO 4 J=1,2
C     4 YA(I,J)=YBARA(I,J)
C
      DO 5 I=1,2
      DO 5 J=1,N-2
C     5 YB(I,J)=YBARA(I,J+2)
C
      DO 6 I=1,N-2
      DO 6 J=1,2
C     6 YC(I,J)=YBARA(I+2,J)
C
      DO 7 I=1,N-2
      DO 7 J=1,N-2
C     7 YD(I,J)=YBARA(I+2,J+2)
C
C     ***** YERİNDE TERS ALMA*****
C
      M=N-2
      DO 110 K=1,M
      DO 120 J=1,M
      IF(J.NE.K) THEN
      YD(K,J)=YD(K,J)/YD(K,K)
      ELSE
      GOTO 120
      END IF
C     120 CONTINUE
      YD(K,K)=1./YD(K,K)
      DO 130 I=1,M
      IF(I.EQ.K) THEN
      GOTO 130
      ELSE
      END IF
      DO 140 J=1,M
      IF(J.NE.K) THEN
      YD(I,J)=YD(I,J)-YD(I,K)*YD(K,J)
      ELSE
      GOTO 140
      END IF
C     140 CONTINUE
      YD(I,K)=-YD(I,K)*YD(K,K)
C     130 CONTINUE
C     110 CONTINUE
C
C     s
C
C     D.C
      DO 200 I=1,N-2
      DO 200 J=1,2
      YDC(I,J)=(0.,0.)
      DO 200 K=1,n-2
C     200 YDC(I,J)=YDC(I,J)+YD(I,K)*YC(K,J)
C
C     s
C

```

```

C      B.D.C
C
      DO 300 I=1,2
      DO 300 J=1,2
      YBDC(I,J)=(0.,0.)
      DO 300 K=1,n-2
300   YBDC(I,J)=YBDC(I,J)+YB(I,K)*YdC(K,J)
C
C      S
C
C      A - BDC
C
      DO 350 I=1,2
      DO 350 J=1,2
350   YABDC(I,J)=(0.,0.)
      DO 400 I=1,2
      DO 400 J=1,2
400   YABDC(I,J)=YA(I,J)-YBDC(I,J)
C
      kk=2
      write(12,*) kk,pk,qk,vn
      do 654 i=1,kk
      do 654 j=1,kk
654   write(12,*) YABDC(i,j)
      close(12)
C
      return
      END
C*****
C
C  INDIRGENMIS SISTEMIN KRITIK DEGERLERININ HESAPLANMASI
C
C *****
subroutine aras
$debug
c234567
      complex ybara(2,2),Zh,yh,a,b
      read(4,*) n,p,q,vs
      do 100 i=1,n
      do 100 j=1,n
100   read(4,*) ybara(i,j)
      close(4)
C ek
C      read(99,*) aci,beta,zs
C
      Zh=1./((-1.,0)*(ybara(1,2)))
      yh=ybara(1,1)+ybara(1,2)
C
      A=1+(Zh)*(yh)
      B=Zh
C
      a1=real(a)
      a2=aimag(a)
      b1=real(b)
      b2=aimag(b)
C
C      DELTA

```

```

c
PI=3.1415926
tafi=q/p
AK1=a1*(b2-b1*tafi)+a2*(b1+b2*tafi)
AK2=a1*(b1+b2*tafi)+a2*(-b2+b1*tafi)

c
delta=(pi/4.)+0.5*(atan((ak2)/(-ak1)))

c
VR

c
AK3=b1*cos(delta)+b2*sin(delta)
AK4=a1*cos(delta)+a2*sin(delta)
VR=VS/(2.*ak4)

c
PR

c
PAY=2*ak3*ak4-(a1*b1+a2*b2)
PAYDA=4*ak4*ak4*(b1*b1+b2*b2)
write(*,*) ak1,ak2,ak3,ak4,pay,payda,a,b,delta
PR=PAY/PAYDA
PR=VS*VS*pr

c
radyan -- derece'ye
delt=180.*delta/3.1415926

c
write(14,*) 'DELTAcrt  : ',delt
write(14,*) 'VRcrt      : ',VR
write(14,*) 'PRcrt      : ',PR
AA=CABS(A)
VBOS=VS/AA
write(14,*) 'Vbos       : ',Vbos

c
read(99,*) aci,beta,zs
write(14,*) '-----'
Vkrt=(VBOS*.5)/(cos((beta-aci)/2))
pya=(Cos(aci))*(Vbos*Vbos/Zs) pyda=4.*(Cos((beta-aci)/2.))**2
pkrt=pya/pyda
write(14,*) 'Vkrt       : ',Vkrt
write(14,*) 'Pkrt       : ',Pkrt
close(14)

c
return
end

```

**AT.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**
ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Ali YALÇIN, 1960 İstanbul doğumlu olup, ilk ve orta öğrenimini Sakarya' da tamamlamıştır. 1983 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Fakültesi, Enerji kolundan mezun olmuştur. 1985 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Eğitimi tamamlamıştır.

Evli ve bir çocuk babası olan Mehmet Ali YALÇIN, halen Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.