

95065

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NONLİNEER YÜKLER İÇEREN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ

Elek. Yük. Müh. Mehmet UZUNOĞLU

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 11 Eylül 2000
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
: Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK (KOÜ)
: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
: Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)

Celal Kocatepe
Hüseyin Çakır
Semra Öztürk
Nurettin Umurkan
Özcan Kalenderli

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 2000

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTIMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Gerilim Kararlılığı	2
1.1.1 Geçici hal gerilim kararlılığı	3
1.1.2 Sürekli hal gerilim kararlılığı	4
1.2 Nonsinüoidal Büyüklükler ve Kararlılık	5
2. GÜÇ SİSTEM GERİLİM KARARLILIĞI	8
2.1 Yük Karakteristikleri	8
2.2 İletim Hatları	10
2.3 Radyal İletim Hattı için P-V Eğrilerinin Analitik Olarak Elde Edilmesi	11
2.4 Kritik Değerlerin Elde Edilmesi	12
2.5 Gerilim Kararlılığının Radyal Sistemler için İncelenmesi	16
2.6 Dinamik Gerilim Kararlılığı	18
2.6.1 Dinamik yük modelleri	19
2.7 Gerilim Kararsızlığında Özel Durumlar	20
2.8 Harmoniklerin Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkileri	20
3. HARMONİK TEORİSİ	22
3.1 Giriş	22
3.2 Fourier Serileri ve Analizi	22
3.2.1 Fourier serisi	22
3.2.2 Fourier analizi	24
3.2.3 Fourier dönüşümü	25
3.2.4 Ayrık Fourier dönüşümü	25
3.3 Harmonik Büyüklüklerin Temel Tanım ve Kavramları	26
3.3.1 Güç sistem harmoniklerinin tanımı	26
3.3.2 Nonsinüoidal durumda elektrik büyüklükleri	27
3.3.3 Harmoniklerin faz dizi bileşenleri	30
3.3.4 Toplam harmonik distorsiyonu	31

3.3.5	Toplam talep distorsiyonu.....	31
3.3.6	Transformatör K-faktörü.....	32
3.3.7	Distorsiyon güç faktörü	33
4.	GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ VE SİSTEM ELEMANLARININ HARMONİKLERE BAĞLI OLARAK MODELLENMESİ	35
4.1	Harmonik Üreten Elemanlar	35
4.2	Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler	36
4.2.1	Motorlar ve generatörler	37
4.2.2	Transformatörler	38
4.2.3	Güç kabloları	39
4.2.4	Kondansatörler	39
4.2.5	Elektronik elemanlar	40
4.2.6	Ölçü aletleri	40
4.2.7	Anahtarlama elemanları	41
4.2.8	Röleler.....	41
4.2.9	Gaz boşalmalı aydınlatma elemanları.....	41
4.2.10	Konverterler	41
4.2.11	Ark fırınları	43
4.3	Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri.....	44
4.4	Harmoniklerin Güç Sistem Cevabı.....	45
4.4.1	Seri rezonans	47
4.4.2	Paralel rezonans	47
4.5	Harmonikler için Çözümler	48
4.6	Harmonik Standartları	49
4.7	Güç Sistem Elemanlarının Harmoniklere Bağlı Olarak Modellenmesi	51
4.7.1	Temel devre elemanlarının harmoniklere bağlı eşdeğerleri.....	51
4.7.2	Harmoniklerin neden olduğu kayıplar	53
4.7.3	İletim hatlarının modellenmesi.....	54
4.7.4	Paralel elemanların modellenmesi	55
4.7.5	Seri elemanların modellenmesi	56
4.7.6	Pasif elemanların modellenmesi.....	57
5.	TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE REZONANS ŞARTLARI	59
5.1	Giriş	59
5.2	Harmonik Kaynağı Olarak Tristör Kontrollü Reaktör	59
5.3	Sabit Kapasiteli Tristör Kontrollü Reaktör İçeren Statik VAR Kompanzatorünün Kontrolü	62
5.4	Kararlılık ve Harmonikler	65
5.5	Tristör Kontrollü Reaktör ve Rezonans Şartı.....	65
5.6	Tristör Kontrollü Reaktörün Analizi	66
5.6.1	Tristör kontrollü reaktörün Fourier matris metodu ile analizi	66
5.6.2	Tristör kontrollü reaktörün durum değişkenleri metodu ile analizi	69
5.7	Örnek Sistem için Analiz	70
6.	LİNEER YÜKLER İÇEREN ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ	73

6.1	Giriş	73
6.2	Dengeli Sistemlerde Güç Akışı	73
6.2.1	Dengeli sistemlerde Newton-Raphson yöntemi ile güç akışı algoritması	73
6.2.2	Jakobyen matrisi elemanlarına ait bağıntılar	77
6.2.3	Gerilim kontrollü baralar (PV baraları)	78
6.3	Lineer Güç Akışı ile Sürekli Hal Gerilim Kararlılık Analizi	79
7.	NONLİNEER YÜKLER İÇEREN ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ	81
7.1	Giriş	81
7.2	Harmonik Güç Akışı	83
7.2.1	Harmonik güç akış algoritması	85
7.3	Harmonik Güç Akışı ile Sürekli Hal Gerilim Kararlılık Analizi	92
8.	SAYISAL UYGULAMALAR	99
8.1	Sayısal Uygulama 1	99
8.2	Sayısal Uygulama 2	107
8.3	Sayısal Uygulama 3	113
8.4	Sayısal Uygulama 4	117
9.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	125
	KAYNAKLAR	131
	EKLER	138
	Ek 1 Harmonik Güç Akışına Dayalı Gerilim Kararlılık Analizi için Bilgisayar Programı Yazılımı	138
	Ek 2 Rezonans Analizi için Yazılan Bilgisayar Programları	155
	ÖZGEÇMİŞ	157

SİMGE LİSTESİ

A, B, C, D	İletim hattının genelleştirilmiş devre sabitleri
B	Süseptans
C	Kapasite
c_h	Fourier serisi h. bileşen katsayısı
$\cos\phi$	Güç faktörü
D	Distorsiyon gücü
DF_i	Akım için distorsiyon faktörü
DF_v	Gerilim için distorsiyon faktörü
f	Frekans
f_1	Temel frekans
$\bullet^{(h)}$	
g_k	k. baranın h. harmonik yük akımı (Fazör büyüklük)
$g_{r,k}^{(h)}$	k. baranın h. harmonik aktif yük akımı
$g_{i,k}^{(h)}$	k. baranın h. harmonik reaktif yük akımı
h	Harmonik mertebesi
h_r	Rezonans frekansının harmonik mertebesi
H(t)	Anahtarlama fonksiyonu
HD_I	Akım için tekil harmonik distorsiyonu
HD_V	Gerilim için tekil harmonik distorsiyonu
$\Delta I^{(h)}$	h. harmoniğe ilişkin akım hata vektörü
I	Akımın genliği
$\bullet^{(h)}$	
I_k	k. baranın h. harmonik hat akımı (Fazör büyüklük)
$I_{r,k}^{(h)}$	k. baranın h. harmonik aktif hat akımı
$I_{i,k}^{(h)}$	k. baranın h. harmonik reaktif hat akımı
I_d	Konverterin dc yük akımı
I_μ	Mıknatıslama akımı
J	Jakobyen matrisi
k	Nonlineer akım katsayısı
L	Endüktans
ΔM	Hata matrisi (vektörü)
N_h	Temel bileşen dahil gözönüne alınan harmonik sayısı
ΔP	Aktif güç hata matrisi

P	Aktif güç
$P_i^{(h)}$	i. baranın h. harmonik aktif gücü
P_k	Kayıp güç
P_{kritik}	Kritik güç
p	Tristörlü konverterde darbe sayısı
ΔQ	Reaktif güç hata matrisi
Q	Reaktif güç
$Q_i^{(h)}$	i. baranın h. harmonik reaktif gücü
$R^{(h)}$	h. harmonik için omik direnç
r_{dc}	Doğru akım direnci
R	Direnç
S	Kompleks güç
T	Periyot
THD_I	Akım için toplam harmonik distorsiyonu
THD_V	Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu
X	Reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
X_L	Endüktif reaktans
V	Gerilim genliği
V_{kritik}	Kritik gerilim
Y	Admitans
Y_{bara}	Bara admitans matrisi
Y_π	İletim hattına ilişkin π eşdeğer admitansı
Z	Empedans
Z_C	Karakteristik empedans
Z_π	İletim hattına ilişkin π eşdeğer empedansı
Δ	Fark operatörü (hata gösterim vektörü)
δ	Yük açısı
$\delta_i^{(h)}$	i. baranın h. harmonik geriliminin faz açısı
δ_{kritik}	Kritik yük açısı
ϕ_h	Fourier serisi h. bileşen faz açısı
σ	Tristörün iletim açısı
ω	Açısal frekans
ω_0	Doğal frekans veya Açısal frekans (temel frekansta)

KISALTMA LİSTESİ

DF	Distorsiyon Faktörü (Distortion Factor)
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FC-TCR	Sabit Kapasiteli Tristör Kontrollü Reaktör (Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor)
IEE	Institute of Electrical Engineers (England)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (U.S.A)
pf	Güç Faktörü (Power Factor)
rms	Efektif Değer
Std	Standart
TDD	Toplam Talep Distorsiyonu (Total Demand Distortion)
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu (Total Harmonic Distortion)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi	10
Şekil 2.2	Sabit güçlü yüküns adım cevabı	19
Şekil 4.1	Üç fazlı 6 darbeleri konverter (Yarı kontrollü doğrultucu).....	42
Şekil 4.2	Üç fazlı 12 darbeleri konverter (Yarı kontrollü doğrultucu).....	43
Şekil 4.3	Seri rezonans.....	47
Şekil 4.4	Paralel rezonans	47
Şekil 4.5	Dağılmış rezonans.....	48
Şekil 4.6	İletim hattının h. harmonik için nominal- π modeli ve eşdeğer- π modeli	54
Şekil 4.7	Paralel elemanın modellenmesi (h. harmonik için)	56
Şekil 4.8	Seri elemanın modellenmesi (h. harmonik için).....	56
Şekil 4.9	Lineer yüklerin modellenmesi	57
Şekil 4.10	Pasif yük modelleri	58
Şekil 5.1	Tristör kontrollü reaktöre ait temel elemanlar, gerilim ve akım dalga şekilleri	60
Şekil 5.2	Tristör kontrollü reaktörün iletim açılarına karşılık gelen süseptans değerleri	62
Şekil 5.3	Sürekli halde FC-TCR içeren kompanzatörün gerilim-reaktif güç bağıntısı	63
Şekil 5.4	Sabit kapasiteli-tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörleri.....	66
Şekil 5.5	TCR için, değişken gerilim kaynaklı ve değişken admitanslı model ve ideal akım kaynaklı model.....	68
Şekil 5.6	TCR'de harmonik akımların maksimum genlikleri	69
Şekil 7.1	Üç fazlı 6 darbeleri konverter bağlantı şeması	82
Şekil 8.1	Sadece lineer yükler içeren örnek güç sistemi.....	99
Şekil 8.2	Lineer ve nonlinear yükler içeren örnek güç sistemi	100
Şekil 8.3	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=0.3) elde edilen 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi	104
Şekil 8.4	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=0.6) elde edilen 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi	104
Şekil 8.5	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=0.9) elde edilen 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi	105
Şekil 8.6	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=1.5) elde edilen 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi	105
Şekil 8.7	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=0.3) elde edilen 2 nolu baranın kritik gerilim değişimi	106
Şekil 8.8	Lineer ve nonlinear güç akışından (k=1.5) elde edilen 2 nolu baranın kritik gerilim değişimi	106

Şekil 8.9 FC-TCR içeren örnek sistem	107
Şekil 8.10 $V_2^{(1)}$ 'in σ 'ya göre değişimi	108
Şekil 8.11 $V_2^{(5)}$ 'in σ 'ya göre değişimi.....	109
Şekil 8.12 HD_{V_2} 'nin σ 'ya göre değişimi	109
Şekil 8.13 Q_2 'nin σ 'ya göre değişimi	110
Şekil 8.14 $V_2^{(1)}$ 'in σ 'ya göre değişimi	111
Şekil 8.15 $V_2^{(5)}$ 'in σ 'ya göre değişimi.....	111
Şekil 8.16 HD_{V_2} 'nin σ 'ya göre değişimi	112
Şekil 8.17 Q_2 'nin σ 'ya göre değişimi	112
Şekil 8.18 FC-TCR içeren 4 baralı örnek sistem.....	113
Şekil 8.19 Temel frekansta (60 Hz) eşdeğer süseptansın ($B^{(1)}$), σ 'ya göre değişimi	113
Şekil 8.20 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için V_4 'ün frekansa bağlı değişimi	114
Şekil 8.21 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için V_4 'ün frekansa bağlı değişimi	115
Şekil 8.22 İletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde HD_{V_4} 'ün değişimi	115
Şekil 8.23 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde Q_4 'ün değişimi	116
Şekil 8.24 FC-TCR içeren 4 baralı örnek güç sistemi	117
Şekil 8.25 İletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde HD_{V_4} 'ün değişimi	118
Şekil 8.26 İletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde HD_{V_3} 'ün değişimi	118
Şekil 8.27 İletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde HD_{V_2} 'nin değişimi	119
Şekil 8.28 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde Q_4 'ün değişimi	119
Şekil 8.29 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{4kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi	120
Şekil 8.30 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{4kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi	121
Şekil 8.31 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{3kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi	121
Şekil 8.32 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{3kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi	122
Şekil 8.33 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{2kritik}$ 'in frekansa bağlı	

değişimi	122
Şekil 8.34 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{2\text{kritik}}$ 'in frekansa bağlı değişimi	123
Şekil 8.35 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda σ' nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde $P_{4\text{kritik}}$ 'in değişimi	123
Şekil 8.36 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda σ' nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde $P_{3\text{kritik}}$ 'in değişimi	124
Şekil 8.37 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda σ' nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde $P_{3\text{kritik}}$ 'in değişimi	124



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Dengeli üç fazlı güç sistemlerinde harmonik faz dizi bileşenleri	30
Çizelge 4.1 Döner makinadaki konverter harmonikleri.....	37
Çizelge 4.2 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	50
Çizelge 4.3 120V-69 kV arası genel dağıtım sistemleri için akım distorsiyon sınırları.....	50
Çizelge 4.4 690001-161000 V arası iletim sistemleri için akım distorsiyon sınırları	51
Çizelge 4.5 161 kV'dan büyük iletim sistemleri için akım distorsiyon sınırları	51
Çizelge 4.6 Gerilim distorsiyon limitleri	51
Çizelge 4.7 Pasif yük modellerindeki direnç ve reaktans bağıntıları	58
Çizelge 5.1 Fourier matris analizi ile elde edilen sonuçlar	71
Çizelge 5.2 Lineer sistem teorisi ile elde edilen sonuçlar.....	71
Çizelge 7.1 Harmonik güç akış analizine uygun olarak baraların numaralandırılması	84
Çizelge 8.1 Hatların karakteristik değerleri	100
Çizelge 8.2 Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri	100
Çizelge 8.3 Örnek güç sisteminin gerilim kararlılık analizi sonuçları	101
Çizelge 8.4 Gerilim kararlılığı açısından incelenen baraların gerilim için tekil harmonik distorsiyon oranları.....	102
Çizelge 8.5 Örnek güç sistemde 4 nolu baranın gerilim kararlılık analizi sonuçları	102
Çizelge 8.6 Örnek güç sistemde 2 nolu baranın gerilim kararlılık analizi sonuçları	103
Çizelge 8.7 Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri	117

ÖNSÖZ

Kalitenin büyük bir önem kazandığı günümüzde, elektrik enerjisinin kalite kriterlerinden olan gerilim kararlılığı ve nonsinüoidal büyüklükler, bu çalışmada birlikte ele alınmış ve ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Güç elektroniği elemanlarının giderek yaygınlaşması, sistemde ihmal edilemeyecek nonsinüoidal büyüklüklerin dolaşmasına yol açmaktadır. Bu durumda, harmonik bileşenlerin de gözönünde bulundurularak kararlılık analizinin yapılmasıyla, daha gerçekçi sonuçlar elde edilecektir.

Bu tez çalışmasında, lineer olmayan yükler içeren enerji sistemlerindeki harmoniklerin, gerilim kararlılığına olan etkileri ve özellikle gerilim kararlılığını iyileştirmede kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörlerinin de harmonik üretimi incelenmiştir. Akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan enerji sistemi elemanlarının bulunması durumu gözönüne alınarak harmonik güç akışı algoritmasına dayalı olarak gerilim kararlılık analizi gerçekleştirilmiş ve klasik gerilim kararlılık analizi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ortaya konulan harmonik güç akışı algoritmasına dayalı gerilim kararlılık analizi için MATLAB paket programı kullanılarak bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgilerini gördüğüm, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Celal KOCATEPE'ye, lisanslı MATLAB programını kullanmama izin veren İ.T.Ü. Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Ramazan TAŞALTIN'a, her zaman çalışmalarına sabır ve hoşgörü ile destek olan sevgili eşime, beni yetiştiren fedakar anne ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın giderek arttığı günümüzde, daha güvenilir ve kaliteli bir enerjinin sunulabilmesi için elektrik güç sisteminin planlanması, işletilmesi ve kontrol edilmesinde, enerji sisteminin kararlılığının ve nonsinüoidal büyüklüklerin dikkate alınması gerekmektedir. Elektrik güç sisteminde gerilim kararlılığına etki eden çeşitli parametreler vardır, bunlardan biri de son yıllarda sistemde etkinliği gittikçe artan nonlineer elemanlar nedeniyle ortaya çıkan nonsinüoidal büyüklüklerdir. Nonsinüoidal büyüklüklerin çeşitli olumsuz etkileri, güç sistemlerinde kullanılan güç elektroniği elemanlarının yaygınlaşmasıyla her geçen gün daha da artış göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, lineer olmayan yüklerin meydana getirdikleri harmoniklerin gerilim kararlılığına etkisi, Newton-Raphson yöntemine dayalı harmonik güç akışı analizi ve yine Newton-Raphson yöntemine dayalı gerilim kararlılık analizinin bir sentezi ile ortaya konulmuştur. Bu sentezin gerçekleştirilmesinde güç sistem elemanlarının harmoniklere bağlı modelleri ile güç sisteminin sürekli hal gerilim kararlılık analizine ait matematik ifadelerden elde edilen modeller birlikte kullanılmıştır.

Tezin birinci bölümünde konu ile ilgili önceki çalışmalar açıklanmış ve yapılan çalışma kısaca tanıtılmıştır. İkinci bölümde, güç sistem gerilim kararlılık analizi için kritik değerlerin güç akışından yararlanılarak bulunması gerçekleştirilmiş ve bazı büyüklüklerin gerilim kararlılığına etkileri incelenmiştir. Üçüncü bölümde, harmonik teorisi ele alınarak Fourier katsayılarının bulunmasına yönelik yöntemler tanıtıldıktan sonra, güç sistemlerindeki sinüoidal olmayan elektriksel büyüklükler ile ilgili tanımlar ve bağıntılar verilmiştir. Dördüncü bölümde, harmonik üreten elemanlar, harmoniklerin elektrik güç sistemi üzerindeki etkileri ve harmonik standartları hakkında bilgi verilmiş, güç sistem elemanlarının harmonik bağımlı olarak modellenmesi açıklanmıştır. Beşinci bölümde, tristör kontrollü reaktör içeren güç sistemlerinde harmonikler ve rezonans şartları detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Altıncı bölümde, lineer yükler içeren enerji sistemlerinde geleneksel güç akış algoritması ile sürekli hal gerilim kararlılık analizi tanıtılmıştır. Yedinci bölümde ise, nonlineer yükler içeren enerji sistemlerinde harmonik güç akış algoritmasına dayalı sürekli hal gerilim kararlılık analizi, daha önceki bölümlerde verilen modellemeler ve geliştirilen matematiksel bağıntılar kullanılarak ortaya konulmuştur.

Sayısal uygulamalar bölümünde, lineer ve nonlineer yükleri içeren üç fazlı dengeli güç sistemleri gözönüne alınmış ve güç sisteminde harmoniklerin bulunması durumunda kararlılık incelenmiştir. Yazılımı gerçekleştirilen bir bilgisayar programı ile harmonik güç akışına dayalı gerilim kararlılık analizi ortaya konulmuştur. Ayrıca, radyal ve 4 baralı sistemler için sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzasyonunun farklı işletim durumlarında sürekli hal gerilim kararlılık analizi, aynı yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar irdelenerek değerlendirilmiş ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, gerilim kararlılığı, güç sistemi, tristör kontrollü reaktör, nonlineer yük, yazılım.

ABSTRACT

Today, as the energy necessity increases day by day, it is required to take into consideration the stability of the energy system and the nonsinusoidal quantities at the planning, operating and controlling of an electrical power system for serving more reliable and more qualified energy. There are various parameters affecting the voltage stability in the electrical power system. One of them is nonsinusoidal quantities which occur in recent years because of nonlinear elements. Many negative effects of nonsinusoidal quantities increase day by day because of the widespread use of power electronics' elements which are used in power systems.

In this thesis, the effect of the harmonics which are occurred by nonlinear loads to voltage stability is presented by the synthesis of harmonic load flow and voltage stability analysis based on Newton-Raphson Method. In the realization of this synthesis, harmonic dependent models of power system elements and the models obtained from mathematical definitions belong to power system steady state voltage stability analysis are used together.

In the first chapter of the thesis, previous studies related to this study are explained and a new study is described. In the second chapter, the obtaining of the critical values of power system voltage stability analysis by load flow is performed and the effects of some quantities voltage stability are examined. In the third chapter, after giving the methods to obtain Fourier coefficients, definitions and expressions for nonsinusoidal electrical quantities in the power system are given. In the fourth chapter, harmonic sources, their effects on power systems and harmonic standards are given and the harmonic dependent modelling of power systems is explained. Resonance conditions and harmonics in the power systems including thyristor controlled reactor is analyzed in detail in the fifth chapter. In the six chapter, conventional load flow algorithm and steady-state voltage stability analysis in the energy system including linear loads are explained. In the seventh chapter, steady-state voltage stability analysis based

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan talep, teknolojideki gelişmelere ve nüfus artışına bağlı olarak her geçen gün artış göstermektedir. Enerji miktarının artması ile birlikte elektrik enerjisinin kalitesinin de artırılması, düşünülmesi gereken bir durumdur. Enerji üretim merkezleri ile tüketim merkezleri arasındaki uzaklıkların büyük olması, enerji iletiminde, yüksek gerilim hatlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla güç kalitesi ile ilgili problemler de günümüzde daha etkin bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

Daha güvenilir ve kaliteli bir enerji için elektrik güç sisteminin planlaması, işletimi ve kontrolünde, enerji sisteminin kararlılığının ve nonlineer yüklerin neden olduğu etkilerinin de dikkate alınması gerekir. Enerji sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası, tekrar bozucu etki öncesi çalışma şartlarına dönme yeteneğidir. Kararlılık temel olarak, geçici, dinamik ve sürekli hal kararlılığı olarak sınıflandırılabilir. Senkron çalışmanın ani olarak kaybının söz konusu olduğu ani yük değişimleri ve enerji iletim hatlarındaki kısa devreler gibi bozucu etkilere sistemin cevabına geçici hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonra mekanik regülatörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye cevabına dinamik hal kararlılığı ve beklenen yük değişimleri yada küçük bozucu etkilere sistemin cevabına ise sürekli hal gerilim kararlılığı adı verilir (Tacer, 1990; Anderson, 1994).

Gerilim kararlılığı, aynı zamanda tüm işletim şartları altında sürekli halde belirlenen işletim limitlerinde, yüklerin bulunduğu baralardaki gerilim genliklerinin kararlılığını korumak için sistemin yeterli reaktif güç beslemesini sağlama kabiliyetidir (Indulkar vd., 1989). Ekonomik ve çevre ile ilgili nedenler yüzünden elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletimi sözkonusu olduğu ve gerilim kararsızlığı birçok şebeke çökmelerine neden olduğu için, gerilim kararlılığı son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Genellikle gerilim çökmesi, reaktif güç yetersizliğinde, kısa devre ve aşırı yüklenme durumlarında meydana gelmektedir (IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, 1999). Buna ilişkin bazı örnekler şunlardır (Taylor, 1992; Kundur 1994):

- Amerika Birleşik Devletleri, New York, 22 Eylül 1970,
- Amerika Birleşik Devletleri, Florida, 28 Aralık 1982,
- Belçika, 4 Ağustos 1982,
- Fransa, 19 Aralık 1978 ve 12 Ocak 1987,

- İsveç, 27 Aralık 1983,
- Japonya, 23 Temmuz 1987.

Gerilim kararlılığı incelemelerinde kullanılan yöntemler sürekli hal (statik) ve dinamik yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Sürekli hal yöntemleri ise kendi içinde,

1. Güç akışı uygulanabilirliğine dayalı yöntemler; Maksimum güç transferi, güç akışı uygulanabilirliği ve çoklu güç akışı çözümleri,
2. Sürekli hal kararlılık yöntemi; Jakobyen matris, lineerleştirilmiş dinamiklerin öz değerleri, jakobyen matrisin tekil değerleri ve duyarlılık matrisleri

olarak ikiye ayrılabilir (Chow vd., 1990).

Bir güç sisteminin gerilim kararlılığı açısından güvenli ve arzu edilir bir biçimde çalışmasını sağlamak için, öncelikle tasarım aşamasında analizlerin gerçekleştirilerek projelendirilmesi ve tesis edilen sistemlerde iyileştirici önlemlerin alınması gerekmektedir. Bunlara örnek olarak, nonlineer yüklerin bozucu etkilerinin kontrolü, reaktif güç kompanzasyon aygıtlarının uygun yerleşimi ve kontrolü, yük altında kademe değiştirmeli transformatörlerin kontrolü, kritik durumlarda yük atmanın gerçekleştirilmesi, iletim hatlarının uygun tasarım ve modellenmesi verilebilir (Begovic vd., 1992; Kundur, 1994; Uzunoğlu vd., 1999).

Sistemde gerilim kararlılığını bozan değişik etkenler vardır ve bunlardan biri de güç sisteminde son yıllarda etkinliği önemli bir biçimde artan nonlineer elemanların ortaya çıkardığı nonsinüoidal büyüklüklerdir. Nonsinüoidal büyüklüklerin etkinliği, güç sistemlerinde kullanılan güç elektroniği elemanlarının yaygınlaşmasıyla artış göstermektedir. Bu çalışmada, bugüne kadar nonsinüoidal büyüklüklerin gerilim kararlılığı üzerindeki ihmal edilen etkisi dahil edilmiş ve bu şartlar için analiz gerçekleştirilmiştir.

1.1 Gerilim Kararlılığı

İdeal bir enerji sisteminin planlaması, işletimi ve kontrolü önemli ölçüde, kararlılık analizlerinin sonucunda yönlendirilir. Gerilim kararlılığı, bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli sınır değerler içerisinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir (Yalçın, 1995). Gerilimde gittikçe

artan ve kontrol edilemeyen bir düşmeye neden olan yük talebindeki artma veya sistem durumundaki değişme gibi bir bozucu etki olduğunda sistem için gerilim kararsızlığı sözkonusu olur.

Gerilim kararsızlığı normal olarak, aşırı yüklenen sistemlerde meydana gelir. İletim şebekesi ve güç iletim sınırlarına ilave olarak, gerilim çökmesine neden olan başlıca etkenler,

- Yük karakteristikleri,
- Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri,
- Generatör reaktif güç / gerilim kontrol sınırları,
- Yük altında kademe değiştiren transformatörler

olarak ele alınabilir.

Gerilim kararsızlığı gerçekte yerel bir olay olmakla birlikte, yaygın bir etkiye neden olabilir. Gerilim çökmesi, basit bir gerilim kararsızlığından daha karmaşıktır ve genellikle güç sisteminin önemli bir kısmında, düşük gerilim durumuna götüren gerilim kararsızlığının eşlik ettiği bir seri olaylar sonucunda meydana gelir (Taylor, 1992; Kundur, 1994).

Gerilim kararlılığı konusunda literatürdeki çalışmalar, sürekli ve geçici hal olmak üzere iki temel grupta toplanabilir. Geçici hal gerilim kararlılığının incelendiği metotlarda, sadece dinamik yüklerin gözönüne alındığı çalışmalar olmayıp yükleri, gerilim ve frekansa bağlı (ancak esasta statik karakteristikli) olarak ele alınan çalışmalar da yapılmaktadır. Bununla birlikte, yük ve iletim hatları ile birlikte generatörlerin dinamiklerini de içeren daha karmaşık yapıda incelemeler gerçekleştirilmiştir (Vournas, 1993; Brucoli vd., 1993; Karlsson ve Hill, 1994; Kao vd., 1994).

1.1.1 Geçici hal gerilim kararlılığı

Bozucu etkinin, büyük ve ani olduğu durumlarda sistemin cevabı, “geçici (transiyent) gerilim kararlılığı” olarak adlandırılır. Paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı olması ve hat sonundaki yüklerin ağırlıklı olarak sabit aktif güç çekme eğilimli asenkron motor yüklerinden oluşması durumunda, bu tür olayların geçici karakteristikleri nedeniyle, yerel olarak ani gerilim çökmeleri görülebilecektir. Buna paralel olarak koruma düzenlerinin de, hızlı değişen böyle olaylara cevap verebilecek nitelikte olması gerekecektir.

Geçici hal kararlılık analizi, önceleri alternatif akım kısa devre analizörleri ile yapılırken daha sonra, sistemin davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler ile adım adım çözülmesi yoluna gidilmiştir. 1960'lı yıllarda bilgisayar programcılığındaki gelişmeler, sistem davranışına oldukça uyumlu matematiksel modelleri kullanma imkanı sağlamıştır. Öyle ki giderek artan gelişmeler sonucunda, geçici hal kararlılık sorununun incelenmesinde oldukça etkin olan sayısal simülasyon yöntemi, sistemin fiziksel davranışına uyumlu matematiksel modelleri kullanma imkanı getirdiğinden, geçici olay anındaki ve sonrasındaki sistem davranışının tam olarak analizi imkanı vermiştir. Simülasyon işleminde genellikle kullanılan nümerik analiz yöntemleri,

- Adım adım çözüm yöntemleri,
- Euler yöntemi,
- Düzeltilmiş Euler yöntemi,
- Runge-Kutte yöntemi

olarak sıralanabilir. Diğer taraftan basitleştirilmiş sistem modellerinden (örneğin bir veya iki makinalı sistemlerden) yararlanılarak, eşit alan yöntemi yardımıyla da kararlılık analizi yapılabilir.

1.1.2 Sürekli hal gerilim kararlılığı

Bozucu etkinin küçük ve yavaş olması durumlarında sistemin cevabı, “sürekli (statik) gerilim kararlılığı” olarak adlandırılır. Alışlagelmiş sürekli hal gerilim kararlılık analizinde başlangıç çalışma durumu, sürekli çalışma durumu olarak alınır ve gerçekte lineer olmayan sistemin davranışı, lineer bir matematiksel model yardımıyla incelenir. Diğer bir deyişle, küçük bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin belli bir bölgedeki davranışı, birinci dereceden diferansiyel denklemlerle oluşturulan matematiksel modellerle incelenir.

Gerilim kararlılığının sürekli hal incelemesinde, öncelikle iki baralı bir sistem için alıcı uç geriliminin genliği ile bu uçtan çekilen aktif güç arasındaki ilişki; gönderici uç geriliminin genliği, iletim hatlarının sabitleri ve hat sonundan çekilen güce ilişkin güç katsayısı cinsinden analitik olarak ifade edilerek hat sonu için P-V eğrileri bulunabilir. Elde edilen bu eğri üzerinde, sistemin alıcı ucundaki gerilim-güç profili izlenip kritik nokta belirlenebilir. Daha da önemlisi bu eğriler yardımıyla, kaynak geriliminin değişik değerlerde sabit tutulması, iletim hattında değişik yüzdelerde seri yada şönt kompanzasyon yapılması, iletim hattının tek

yada çok hattan oluşması, hat sonunda farklı güç katsayılı yüklerin olması gibi çeşitli işletim durumlarının yanı sıra, yük altında kademe değişiminin etkisi ve kısmen yüklerin dinamik davranışlarının etkilerini incelemek de mümkün olmaktadır.

Sürekli hal kararlılık analizi için ilk grupta, kararlılık limitine bir yaklaşım olarak, Newton-Raphson güç akış analizlerinin yakınsaması önerilmiştir. Bu güç akış analizinden elde edilen verilerin kullanılması ile gerilim kararlılık analizi yapılarak kritik noktalar bulunabilir (Venikov vd., 1975).

Lineerleştirilmiş dinamiklerin özdeğerleri (λ), belirli bir güç değeri için kararlılık sınırının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır (Kundur, 1994). Diğer bir gösterge olarak da jakobyen matrisinin kendisidir (Yorino vd., 1992). Başka bir metotta ise, global bir gerilim kararlılığı indeksi olarak, güç akış denklemlerinin jakobyen matrisinin minimum tekil değeri σ (J) kullanılmaktadır. Gerilimin kritik değerine yaklaşması durumunda, bu değer sıfıra gitmektedir (Tranuchit ve Thomas, 1988). Jakobyen matrise dayalı bir başka metotta ise, indirgenmiş jakobyen matrisinin en küçük özdeğerleri ve özvektörleri kullanılarak analiz gerçekleştirilebilir. Herbir özdeğer, gerilim kararsızlığına yakınlığın bir ölçütünü vermektedir (Gao vd., 1988).

1.2 Nonsinüoidal Büyüklükler ve Kararlılık

Güç sisteminde nonsinüoidal büyüklükler (harmonikli akım ve gerilimler), sistemin lineersizliğinden meydana gelmektedir. Bu lineersizlikler, elektrik veya magnetik lineersizliklerdir. Son yıllarda yarı-iletken elemanların kullanımının yaygınlaşması da, güç sistemlerinde harmonik bileşenlere neden olmaktadır. Harmonikler, bir güç sisteminde kaynak frekansındaki temel bileşenden başka, bu frekansın katlarına sahip bileşenler olarak tarif edilmektedir. Harmonikler, bir takım teknik ve ekonomik olumsuzluklara neden olarak buldukları sistemi etkilemektedirler. Bu etkilerin giderilmesi için harmonik bileşenlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Harmonikleri meydana getiren elemanlardan bazıları şu şekilde verilebilir:

- Statik VAR kompanzatorler,
- Konverterler,
- Transformatörler,
- Generatörler,

- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları.

Güç sisteminde gerilim kararlılığını iyileştirmek için kullanılan sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatörler, nonlinear elemanlardır. FC-TCR içeren kompanzatörlerde, bir yandan sabit kapasite grubu reaktif güç üretirken, diğer yandan tristör kontrollü reaktör güç tüketecektir. Belirli bir gerilim seviyesinde kapasitör grubunun reaktif güç üretimi sabit olduğundan, sistemin reaktif güç değişimi tristörlerin ateşleme açılarının değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Bazı durumlarda, bu ateşleme açılarının değişimi, harmonik üretimini çok fazla artırarak sistemde lineersizliğe ve nonlinear büyüklüklerin dolaşmasına neden olacaktırlar.

Harmoniklerin güç sistemlerinde meydana getirdikleri etkilerden bazıları şunlardır:

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Şebeke rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve yalıtım zorlanması nedeniyle zarar görmesi,
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. durumlarda çalışma bozuklukları,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,
- Yalıtım malzemesinin delinmesi,
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit meydana gelmesi,
- Mikrobilgişlemciler üzerinde hatalı çalışma.

Yukarıda da belirtildiği gibi harmoniklerin güç sistemine olumsuz etkilerinden birisi, sistemi rezonansa götürerek güvenilirliği ve sürekliliği azaltmasıdır. Rezonansın meydana gelmesi,

sadece temel bileşen büyüklüklerinden olmayıp, herhangi bir harmonik büyüklük için de sözkonusudur. Bu sebeple sistemin kararlılığı etkilenecek ve işletmenin sürekliliği engellenecektir. Bu çalışmada nonlineer büyüklüklerin güç sistemi gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmak için harmonikli güç akış analizi ve gerilim kararlılık analizinin sentezi yapılarak, harmoniklerin kritik değerler üzerinde nasıl bir değişim meydana getirdiği araştırılmıştır.



2. GÜÇ SİSTEM GERİLİM KARARLILIĞI

Gerilim kararlılığı, normal işletme şartlarındaki bir güç sisteminin, bozucu bir etki sonrasında bütün bara gerilimlerinin sürekli kabul edilebilir değerlerde tutulabilmesi olarak tanımlanabilir. Sistem durumundaki herhangi bir değişiklik, bazen gerilimde kontrol edilemeyen bir düşmeye neden olur ki, bu durumda sistem için gerilim kararsızlığı söz konusu olur (Indulkar, 1989).

Gerilim kararlılığı problemleri genellikle güç sisteminin aşırı yüklenmesi sonucunda ortaya çıkar. Gerilimin aşırı düşmesi olarak bilinen ve gerilim çökmesi olarak adlandırılan bu hale neden olan başlıca etken, güç iletim sınırlarıdır. Ayrıca, generatör reaktif güç kontrol sınırları, yük karakteristikleri, reaktif güç kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri ve yük altında kademe değiştiren transformatörler (ULTC) gibi gerilim kontrol cihazlarının davranışları bu etkenlere ilave edilebilir.

Gerilim kararlılığı, temel olarak yük kararlılığının bir parçasıdır. Bir sistemde işletim gerilimleri, gerilim kararlılığı sınırlarıyla yakından ilgilidir. Düşük gerilimlerde yüksek enerji üretmek için, büyük akımlar çekmek gerekir. Güç katsayısı birden küçük olan yükler için yükteki küçük bir değişim, büyük gerilim düşümlerine neden olabilir ve bunun sonucunda gerilim kararsızlığı meydana gelebilir.

Gerilim çöküşü, yükün niteliğine bağlıdır. Örneğin, asenkron motor gibi bir yük, gerilim çöküşünü hızlandırırken, sabit empedans karakteristikli bir ısıtıcı gerilim çöküşünü engeller (Taylor, 1992).

2.1 Yük Karakteristikleri

Gerilim kararlılığı açısından yük karakteristikleri son derece önemlidir. Gerilim değişimlerine göre yükler davranışları bakımından,

- Sabit empedanslı yükler,
- Sabit akımlı yükler,
- Sabit güçlü yükler

olarak 3 ana gruba ayırarak incelemeler yapılabilir (Sekine ve Ohtsuki, 1990; Chiang vd, 1990).

a) Sabit empedanslı yükler: Ark ocakları, aydınlatma ve ısıtma elemanları, sabit empedanslı yükler olarak kabul edilebilir ve genellikle omik karakterlidirler (Elgerd, 1985). Kompleks gücün

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{V} \cdot \dot{I}^* = \dot{V} \left(\frac{\dot{V}}{Z} \right)^* = \frac{|V|^2}{(Z)^*} = \frac{|V|^2}{(R - jX)} = |V|^2 \frac{R + jX}{R^2 + X^2} \quad (2.1)$$

şeklindeki gerilime bağlı ifadesinden, aktif güç

$$P = |V|^2 \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (2.2)$$

olarak bulunur. Gerilimdeki küçük bir değişim için aktif güçteki değişim

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \cong \frac{\partial P}{\partial V} = 2|V| \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{2}{|V|} P \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} \cong 2 \frac{\Delta |V|}{|V|} \quad (2.3)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi gerilimdeki küçük değişimler için güç değişimi gerilimdeki değişimin yaklaşık iki katı olmaktadır.

b) Sabit akımlı yükler: Genellikle, metalürji ve elektro-kimya alanlarında, elektroliz, metal parlatma gibi uygulamalar, sabit akım tekniğine bağlıdır (Geçkinli, 1989). Akım sabit kabul edilerek aktif güç

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \quad (2.4)$$

ifadesinden, gerilimdeki küçük bir değişim için aktif güçteki değişim

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \cong \frac{\partial P}{\partial V} = I \cdot \cos\phi = \frac{P}{V} \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} \cong \frac{\Delta V}{V} \quad (2.5)$$

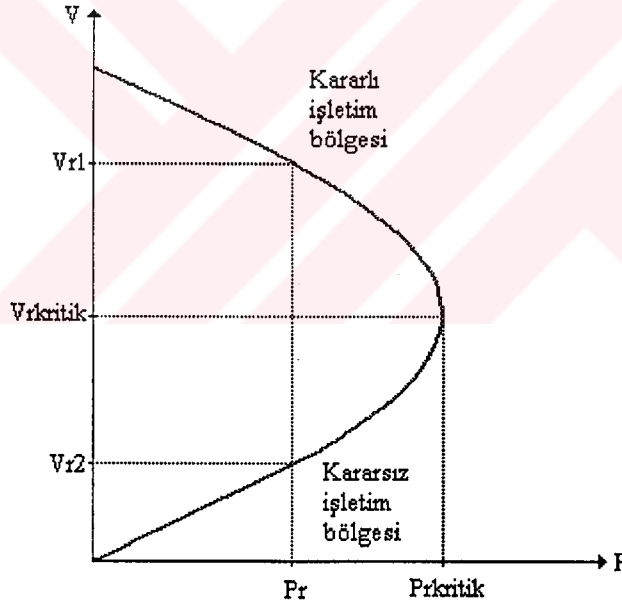
olarak elde edilir ve gerilimdeki küçük değişimler için güç değişimi yaklaşık aynı oranda olmaktadır.

c) Sabit güçlü yükler: Kontrollü empedans yükleri ve asenkron motorlar bu gruba girmektedirler. Asenkron motor yüklerinin gerilim değişimlerine karşı cevapları, çektikleri aktif gücün gerilim değişimini artırarak veya azalarak izleyip, daha sonra başlangıç değerine

dönmeye çalışması şeklindedir. Buna göre, gerilimin ani olarak azalmasıyla aktif ve reaktif güçte ani olarak bir azalma olduktan sonra, aktif güç nominal değerine dönmeye çalışırken, reaktif güç nominal değerinin üstüne çıkmaktadır. Eğer nominal gerilim değerine geri dönülürse, her iki gücün de nominal değerlerine geri döndükleri görülmektedir (Elgerd, 1985; Çetin, 1987).

2.2 İletim Hatları

İletim hatları, gerilim kararlılığı açısından büyük öneme sahiptir. İletim hatları, uzunluklarına bağlı olarak hattın direnç, endüktans ve kapasitesine bağlı olarak kısa, orta ve uzun iletim hatları olarak sınıflandırılmaktadır (Stevenson, 1988). Enerji iletim sistemlerinde orta uzunluktaki hatlar ile uzun iletim hatlarının kararlılığı mutlaka analiz edilmelidir ve özellikle gerilim kararlılığı bakımından uzun iletim hatları büyük önem arz etmektedirler (Yalçın, 1995).



Şekil 2.1 Radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi

Gerilim kararlılığı, gerçekte aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve gerilim (V) arasındaki ilişkilere bağlıdır. Bu ilişkileri gösteren karakteristikler radyal hat (iki baralı sistem) için analitik olarak elde edilebilirken, çok baralı sistemler için güç akış analizi sonunda belirlenebilir.

Bir radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi her bir sabit alıcı gücüne (P_r), V_{r1} ve V_{r2} gibi iki farklı gerilim karşılık düşmektedir.

Sadece bir noktada belirli bir güç için bir gerilim söz konusudur. Bu nokta, gerilim kararlılığı açısından taşınabilecek maksimum güç sınırını ve buna karşılık gelen kritik gerilim değerini gösterdiğinden güç değerine “kritik güç” (P_{kritik}) ve gerilim değerine de “kritik gerilim” (V_{kritik}) adı verilir. P-V eğrisinin üst kısmı kararlı (normal) çalışma bölgesini, alt kısmı ise kararsız çalışma bölgesini göstermektedir. Güç sistemine bağlanacak kritik güçten daha büyük bir güç olması durumunda, yük gerilimi kararsız olacak ve sistemin kararsız bölgeye kaymasına yol açacaktır (Taylor, 1992; Kundur, 1994).

2.3 Radyal İletim Hattı için P-V Eğrilerinin Analitik Olarak Elde edilmesi

İki baralı bir sistem için gerilim kararlılığının statik yönden incelenmesinde, hat sonu geriliminin genliği ile hat sonundan çekilen aktif güç arasındaki ilişkiyi; hat başı geriliminin genliği ($|V_s|$), iletim hattının sabitleri ve hat sonu güç faktörü cinsinden analitik olarak ifade edebiliriz. Böylelikle, hat sonu için P-V eğrilerini elde etmek mümkündür (Yalçın, 1995).

Bir enerji iletim hattının hat başı gerilimi ve akımı (\dot{V}_s, \dot{I}_s) ile hat sonu gerilimi ve akımı (\dot{V}_r, \dot{I}_r) arasında

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_s \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_r \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

matrisel bir eşitlik vardır. Buradan, hat başı gerilimi (Stevenson, 1988; Elgerd, 1983; Gönen, 1988; Glover, 1989)

$$\dot{V}_s = \dot{A} \cdot \dot{V}_r + \dot{B} \cdot \dot{I}_r \quad (2.7)$$

olarak elde edilir. Genelleştirilmiş devre sabitlerini kartezyen formda $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$ ve $\dot{D} = d_1 + jd_2$ şeklinde yazar ve hat sonu akımını (endüktif yük için)

$$\dot{I}_r = \frac{P_r - jQ_r}{\dot{V}_r^*} \quad (2.8)$$

eşitliği ile ifade eder ve daha sonra da bu ifade eşitlik (2.7)'de yerine konulursa,

$$\dot{V}_s = (a_1 + ja_2)\dot{V}_r + (b_1 + jb_2) \cdot \frac{(P_r - jQ_r)}{\dot{V}_r} \quad (2.9)$$

bulunur ve düzenleme yapılırsa,

$$\dot{V}_s \cdot \dot{V}_r^* = (a_1 V_s^2 + b_1 P_r + b_2 Q_r) + j(a_2 V_r^2 + b_2 P_r - b_1 Q_r) \quad (2.10)$$

elde edilir ve eşitliğinin her iki tarafı eşleniği ile çarpılırsa,

$$V_s^2 \cdot V_r^2 = (a_1 V_r^2 + b_1 P_r + b_2 Q_r)^2 + (a_2 V_r^2 + b_2 P_r - b_1 Q_r)^2 \quad (2.11)$$

elde edilir. Bu eşitliğin kareleri alınarak düzenlenirse,

$$(a_1^2 + a_2^2)V_r^4 + [2P_r \cdot (a_1 b_1 + a_2 b_2) + 2Q_r \cdot (a_1 b_2 - a_2 b_1) - V_s^2]V_r^2 + (b_1^2 + b_2^2) \cdot (P_r^2 + Q_r^2) = 0 \quad (2.12)$$

denklemini bulunur. Bu denklem, $x = V_r^2$ dönüşümü ile

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (2.13)$$

biçiminde ikinci dereceden bir denkleme dönüştürülür. Buradan

$$V_{r1,2} = \pm \sqrt{x_{1,2}} \quad (2.14)$$

şeklinde gerilime ait gerçek kökler belirlenmiş olur. Bu analitik ifadede hat başı gerilimi (V_s) sabit tutularak, sabit güç faktörü altında, hat sonundan çekilen gücün sıfırdan itibaren artırılmak suretiyle değişimine karşılık, hat sonu geriliminin sürekli değişimden elde edilen P-V eğrisi olarak adlandırılan ve kararlılık analizlerinde kullanılan Şekil 2.1'deki gibi eğri elde edilir (Miller, 1982; Weedy, 1987; Yalçın, 1995).

2.4 Kritik Değerlerin Elde Edilmesi

Kritik değerlerin P-V eğrilerinden elde edilmesi, güç sisteminin karmaşık yapısından dolayı her zaman kolay bir biçimde mümkün olmaz. Bunun için, kritik değerlerin doğrudan hızlı bir

biçimde bulunması, güç akışının jakobyen matrisinin tekilliğe ulaştığı (ıraksadığı) noktalar tespit edilerek gerçekleştirilebilir.

Hat başı gerilimini $\dot{V}_s = V_s \angle 0^\circ$, hat sonu gerilimini $\dot{V}_r = V_r \angle -\delta^\circ$ ve genelleştirilmiş devre sabitlerini formda $\dot{A} = a_1 + ja_2$ ve $\dot{B} = b_1 + jb_2$ şeklinde alıp, (2.7) nolu eşitliğinden elde edilen \dot{I}_r akımının ifadesinde yerine yazılırsa

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{V}_s - \dot{A} \cdot \dot{V}_r}{\dot{B}} = \frac{V_s - (a_1 + ja_2) \cdot V_r (\cos \delta - j \sin \delta)}{b_1 + jb_2} \quad (2.15)$$

bulunur. Bunun eşleniği,

$$\dot{I}_r^* = \frac{V_s - (a_1 - ja_2) \cdot V_r (\cos \delta + j \sin \delta)}{b_1 - jb_2} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Bu akım, kompleks güç

$$\dot{S}_r = \dot{V}_r \cdot \dot{I}_r^* \quad (2.17)$$

ifadesinde yerine konulursa,

$$\dot{S}_r = \frac{V_s V_r (\cos \delta - j \sin \delta) - (a_1 - ja_2) V_r^2}{b_1 - jb_2} \quad (2.18)$$

elde edilir. Düzenlemelerle,

$$\begin{aligned} \dot{S}_r &= \frac{V_s V_r (\cos \delta - j \sin \delta) \cdot (b_1 + jb_2) - (a_1 - ja_2) \cdot (b_1 + jb_2) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \\ &= \frac{V_s V_r (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \\ &\quad + j \frac{V_s V_r (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Bu (2.19) eşitliğindeki reel ve imajiner kısımlar ayrılarak aktif ve reaktif güçler, sırasıyla (Indulkar, 1989; Yalçın, 1995),

$$P_r = \frac{V_s V_r (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.20)$$

$$Q_r = \frac{V_s V_r (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.21)$$

olarak belirlenir. Bundan sonra iki baralı bir sistem için Newton güç akışındaki jakobyen matrisin tekilliğinden yararlanılarak kritik değerler belirlenir. Bunun için iki fonksiyon

$$f_1(V_s, V_r, \delta) = P_r - \frac{V_s V_r (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.22)$$

$$f_2(V_s, V_r, \delta) = Q_r - \frac{V_s V_r (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) V_r^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.23)$$

olarak tanımlanır. Matrisyel formda jakobyen matrisi elde etmek için bu eşitlikleri düzenlersek,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_r \\ \Delta Q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial V_r} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial V_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_r \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada jakobyen matrisinin tekil olması için determinantının sıfıra eşit olması gerekir yani,

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial V_r} - \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial V_r} = 0 \quad (2.25)$$

olmalıdır. Buradaki her bir terim

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} = \frac{V_s V_r (-b_1 \sin \delta + b_2 \cos \delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial V_r} = \frac{V_s (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) + (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot 2V_r}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \delta} = \frac{V_s V_r (-b_2 \sin \delta - b_1 \cos \delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_r} = \frac{V_s (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot 2V_r}{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.29)$$

eşitlikleri ile bulunduktan sonra (2.25) nolu denklemde yerine yazılırsa

$$V_s = 2V_r (a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) \quad (2.30)$$

ile verilen kritik noktada iletim hattının hat sonu ve hat başı gerilimleri arasındaki eşitlik elde edilir. Kritik iletim (yük) açısını belirlemek için, güç ifadelerinde V_s yerine V_r ve δ 'ya bağlı ifadeleri yazılır. Ayrıca aktif ve reaktif güç arasındaki,

$$Q_r = P_r \cdot \tan \varphi \quad (2.31)$$

bağıntısı kullanılarak kritik iletim açısının öncelikle,

$$\tan(2\delta) = \frac{a_1 (b_2 - b_1 \tan \varphi) + a_2 (b_1 + b_2 \tan \varphi)}{a_1 (b_1 + b_2 \tan \varphi) + a_2 (-b_2 + b_1 \tan \varphi)} \quad (2.32)$$

değeri bulunur. Daha sonra,

$$K_1 = a_1 (b_2 - b_1 \tan \varphi) + a_2 (b_1 + b_2 \tan \varphi) \quad (2.33)$$

$$K_2 = a_1 (b_1 + b_2 \tan \varphi) + a_2 (-b_2 + b_1 \tan \varphi) \quad (2.34)$$

kısaltmaları yapılarak kritik iletim (yük) açısı

$$\delta_{\text{kritik}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{K_2}{K_1} \right) \quad (2.35)$$

olarak bulunur. Bu eşitlik, (2.30) nolu eşitlikte yerine yazılırsa,

$$V_{\text{kritik}} = \frac{V_s}{2 \cdot (a_1 \cos \delta_{\text{kritik}} + a_2 \sin \delta_{\text{kritik}})} \quad (2.36)$$

elde edilir. (2.30) ve (2.35) eşitliklerinin, (2.20) eşitliğinde yerine yazılması ve

$$K_3 = b_1 \cos \delta_{\text{kritik}} + b_2 \sin \delta_{\text{kritik}} \quad (2.37)$$

$$K_4 = a_1 \cos \delta_{\text{kritik}} + a_2 \sin \delta_{\text{kritik}} \quad (2.38)$$

kısaltmaları ile hat sonundan çekilebilecek kritik güç değeri

$$P_{\text{rkritik}} = \frac{V_s^2 (2K_3 K_4 - (a_1 b_1 + a_2 b_2))}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4K_4^2} \quad (2.39)$$

olarak bulunur.

2.5 Gerilim Kararlılığının Radyal Sistemler için İncelenmesi

Radyal bir iletim hattına ilişkin P-V eğrileri elde edilirken, bazı büyüklüklerin gerilim kararlılığına etkilerini incelemek mümkündür. Bu etkiler; güç faktörü, hat uzunluğu, hat başı gerilimi, paralel hat sayısı, hatların çalışma modları, seri ve şönt kompanzasyon tesisleri şeklinde ele alınabilir (Indulkar, 1989; Yalçın, 1995). Aşağıda bu etkiler kısaca incelenmiştir.

a) Güç faktörünün etkisi: Güç faktörü endüktif (geri) durumdan kapasitif (ileri) duruma gittikçe, gerilim kararlılığı açısından güç sınırının arttığı gözlenmektedir. Bundan da anlaşıldığı gibi, enerji iletiminde güç faktörünün birim değere yakın olması gerilim kararlılığı açısından gereklidir.

b) Hat uzunluğunun etkisi: Örnek bir sistem üzerinde direnç, endüktans ve admitans değerleri aynı ve güç faktörü sabit tutularak yapılan bir incelemede, gerilim kararlılığının, iletim hattı uzunluğu ne kadar az olursa o kadar iyi olduğu görülmüştür.

c) Hat kayıp faktörünün etkisi: Kayıp faktörü, hattın geometrisinden doğan hattın omik direnci (r) ve endüktif reaktansı (ωL) arasındaki orandır ($\tan \alpha = \frac{r}{\omega L}$). Gerilim kararlılığı, kayıp faktörü oranının büyümesiyle olumsuz yönde etkilenmektedir.

d) Hat başı geriliminin etkisi: Hat başı geriliminin genliğinin artırılması gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Gerilimin azalması durumunda yük altında kademe değiştiren

transformatörlerin kademelerin artırılması, hat sonu geriliminin daha da azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hızlı değişen dinamik durumlarda, kademe değiştiricilerin yavaş cevabı, gerilim kararlılığını sağlamada yetersiz kalmaktadır (Abe vd., 1982; Ohtski, 1991).

e) Paralel hat sayısının etkisi: Büyük miktarlarda güç iletiminde, kararlılık, güvenilirlik, işletme zorunlulukları gibi çeşitli nedenlerden dolayı, üretim ve tüketim merkezleri arasında iki yada daha fazla paralel hat tesis etmek zorunlu olmaktadır. Paralel çalışan hatlardan birinin devre dışı olması durumunda, sistemin toplam reaktansı ($Z/2$)'den Z 'e çıkar ve normal olarak güç faktörünü iyileştiren kapasite ($2.C$)'den C 'ye düşer. Böylelikle artan hat kayıpları yanında şönt kapasitelerinin ürettiği reaktif gücün azalması durumunda toplam gerilim düşümü önemli ölçüde artar ve gerilim kararsızlığı meydana gelebilir. Hat sonundaki kritik gerilimin değeri pek fazla değişmezken, kritik gücün değeri yaklaşık yarıya düşer.

f) Hat sonunda kullanılan şönt kapasitenin etkisi: Yük ucuna yakın kompanzasyon, güç faktörünün iyileştirilmesi, gerilim ayarlanması ve yük dengelenmesi için yapılmaktadır. Farklı grup yüklerinin gerilim değişimlerine karşı reaktif güç talepleri farklı olmaktadır. Hat sonunda kullanılan şönt kapasiteler, gerilim kararlılığı açısından iyileştirici rol oynamaktadırlar.

g) Seri kompanzasyonun etkisi: Bir alternatif akım devresine bağlı kayıpsız bir kondansatörün uçlarındaki gerilim, içinden geçen akımdan 90° geri, endüktif reaktansın uçlarındaki gerilim ise, içinden geçen akımdan 90° ileri fazda olduğu bilinen bir özelliktir. Buna göre, bir endüktif reaktansın hat gerilimine etkisi, seri bağlanacak bir kondansatör ile kısmen veya tamamen kompanze edilebilir (Miller, 1982). Bu tür bir kompanzasyonla, taşınabilecek maksimum güç transferi artırılabilir veya belli bir güç transferi için iletim açısı küçültülebilir. Böylelikle hattın doğal gücü artırılabilir. Bunun yanında, hat reaktansı etkili bir biçimde azaltıldığından, hat aynı sistem yükünde daha az kapasitif reaktif güç çekecektir. Dolayısıyla, boşta çalışmada ihtiyaç duyulan şönt endüktif kompanzasyon derecesi de kısmen azaltılacaktır.

Seri kompanzasyon yapıldığında, kompanzasyon oranı için üst sınır değer %80'dir. Kompanzasyonun %100 yapılması durumunda, en küçük bir bozucu etkide bile çok büyük genlikli arıza akımları akabilecektir. Ayrıca, devre temel frekansta seri rezonansa da girebileceğinden, geçici gerilim ve akımları kontrol etmek oldukça güçleşecektir. Seri kompanzasyon ile, paralel çalışan iletim hatlarının yük bölümünün dengelenmesi, değişken

büyük güçlerin neden olduğu gerilim dalgalanmalarının azaltılması ve paralel bağlı kondansatörlere oranla daha düşük bir oranda da olsa güç faktörünün düzeltilmesi gerçekleştirilmektedir. Seri kompanzasyon oranı yüzdesinin artırılması, gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir (Indulkar ve Viswanathan, 1983; Indulkar ve Viswanathan, 1983; Indulkar vd., 1987).

h) Şönt kompanzasyonun etkisi: Büyük miktarlarda elektrik enerjisinin ekonomik olarak uzak mesafelere iletilebilmesi için çok yüksek gerilimler seçilmektedir. Böylece iletim akımı küçültülerek hat kayıpları azaltılmaktadır. Ancak, iletim hatlarının toprak kapasiteleri nedeniyle akacak olan kapasitif akımlar, endüktif karakterli olan seri hat empedansı nedeniyle gerilim yükselmesine neden olacaktır.

Eğer iletim hattının ucuna karakteristik bir empedans bağlanırsa, hat endüktansındaki reaktif kayıplar, hat kapasitesinin ürettiği reaktif güç ile tam olarak karşılanır ve bu durumda hat reaktif güç alışverişi yapmaz.

İletim hattı üzerinde şönt kompanzasyon yapılmaması durumunda, özellikle alıcı uç noktasına bir yük bağlı iken hat sonu gerilimi kararlı halde en yüksek değerine çıkar. Ayrıca, açma kapama olaylarında aşırı gerilimler ortaya çıkar ve kapasitif akımlar ilave aktif kayıplar oluştururlar.

Gerilim kararlılığı, şönt kompanzasyon yapılması ile olumsuz yönde etkilenebilmektedir.

Bütün bu etkileri özetleyecek olursak, güç faktörünün endüktiften kapasitife yönelmesi, aynı devre parametrelerine sahip hatlardan daha kısa olanları, kayıp faktörünün küçültülmesi, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması, genellikle statik gerilim kararlılığını iyileştirici yönde etkide bulunmaktadır. Ancak, şönt kompanzasyonun etkisi hattın modellenmesine göre değişebilmektedir.

2.6 Dinamik Gerilim Kararlılığı

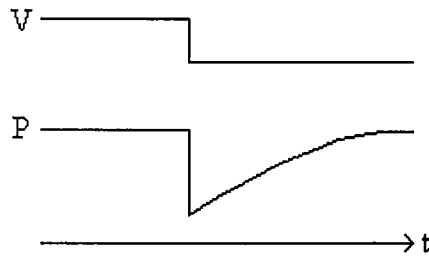
Sürekli hal gerilim kararlılığı analizleri, yüklerin dinamiğine bağlı olarak hızlı değişen olayların açıklanmasında yeterli değildir. Zira statik analizlerde, P-V eğrilerini karakterize eden olaylar, dakikalardan saatler mertebesine uzanan geniş periyotlar içerisinde oluşmaktadır. Oysa ki paralel iletim hatlarından birinin devre dışı olması ve hat sonundaki

yüklerin, genellikle sabit aktif güç çekme eğilimli asenkron motor yüklerinden oluşması durumunda, bu tür yüklerin geçici karakteristikleri nedeniyle, yerel olarak ani gerilim çökmeleri görülebilecektir. Buna paralel olarak, koruma düzenlerinin de hızlı değişen böyle olaylara karşı, cevap verebilecek nitelikte olması gerekecektir (Gyugyi, 1988; IEEE Special Stability Controls Working Groups, 1994).

2.6.1 Dinamik Yük Modelleri

Klasik güç akış analizlerinde, her yük düğümündeki aktif ve reaktif güçlerin sabit olduğu kabul edilmektedir (Price vd., 1988). Oysa gerçek sistemde bu yükler zamanla değişmektedir. Bu değişim normal yük artımı veya azalması şeklinde olabileceği gibi, Şekil 2.2'den de görüldüğü üzere, bir baradaki gerilim artışı aynı şekilde izleyen ve daha sonra yaklaşık olarak başlangıç değerine düşüren bir güç değişimi, dinamik analiz için bir örnek olarak ele alınabilir.

Şekil 2.2'de, ilk anda gerilim azalmasıyla orantılı azalan yük, tipik bir sabit empedans yüküdür. Bunun nedeni, motorun kütle ataleti veya kontrolör cevabının gecikmesi olabilir. Daha sonra ise, mekanik motor yükünün sabit güç karakteristiği veya kontrolörün sabit güç karakteristiği nedeniyle yük, sabit gücüne dönmektedir (Sekine ve Ohtsuki, 1990; Canizares, 1995).



Şekil 2.2 Sabit güçlü yükün adım cevabı

Sabit empedans yükleri, gerilim kararlılığı bakımından paralel hatlardan birinin açması gibi büyük bir bozucu etki halinde bir gerilim kararsızlığına yol açmazlar. Gerilim değerindeki bir birim azalma güç değerinde yaklaşık iki kat azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda, kritik güç değeri azaldığı halde, yükün çektiği güç bu değer altında kaldığı için, sabit empedans yükleri kararsızlığa yol açmadıkları gibi, sabit güç yükleriyle karma yükler oluşturmaları durumunda, gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedirler (Pal, 1992).

Tipik bir güç sisteminin karma yük karakteristikleri gözönüne alındığı zaman, en büyük bozulmaları da içeren gerilim kararlılığı, standart güç akış modelinden elde edilerek, en son bozulmuş sistemin kararlı hal durumu temin edilmektedir.

Yük, statik bileşenleri içerdiği zaman, kararlılık limitleri son derece geniştir. Bu gibi yükler için tam ve doğru kararlılık sınırı, yükün statik bileşenini uygun bir şekilde göz önüne alan bir güç akış modelinden elde edilebilir. Ancak bazı özel durumlarda, bütün sistem bileşenlerinin detaylı bir dinamik modelini de ele alarak sistemi incelemek gerekebilir.

Tipik bir güç sisteminde, gerilim kararsızlığı ve çökmesinin detaylı bir dinamik analizi gereksizdir. Karma yükün karakteristiği ele alındığı zaman, hem küçük hem de büyük bozulmaları içeren gerilim kararlılığı, sürekli hal gerilim kararlılığı analizinde kullanılan standart güç akış modelinden temin edilebilmektedir (Pal, 1992).

2.7 Gerilim Kararsızlığında Özel Durumlar

Besleme geriliminin çok kısa bir periyot için çok düşük bir seviyede olması, asenkron motor besleyicilerinde çeşitli arızalara yol açar ve bu motorların birdenbire durmasına neden olur. Besleme gerilimi tekrar nominal değerine ulaştığında, asenkron motorlar hızlanır ve önceki çalışma durumlarına dönerler. Bu asenkron motorların ilk kalkış esnasında çok büyük akımlar çekmesi ve sistem empedansında ilave artışın kayıplara yol açması, motor terminallerinde büyük miktarda gerilim düşümüne neden olmaktadır. Eğer bu gerilim çok düşük olursa, makinalar aniden durur veya elektrik devrelerinde arızalar meydana gelir.

Geçici gerilim çökmesine neden olabilecek bazı özel durumların söz konusu olması halinde, bu durumdan korunmak için, gerilim çökmesine yol açan bir bozucu etki ortaya çıktıktan hemen sonra en kısa zamanda gerekli reaktif güç temininin yapılmasıdır (Hammad ve El-Sadek, 1989; IEEE Special Stability Control Working Groups, 1994).

Mekanik anahtarlamalı sistemlerde, reaktif güç temininin kısa sürede yerine getirilmesi zordur. Bu durumda uygulanacak en iyi koruma yöntemi, sistemin reaktif güç ve gerilim değişimlerini sürekli izleyerek, devrenin ihtiyacı olan kompanzasyonu sağlayan ve anahtarlama işlemleri yarı iletken elemanlarla yapılan tristör kontrollü statik VAR kompanzasyonu olduğu söylenebilir (Gyugyi, 1988; Edris, 1989; Hiskens, 1992; Mithulanathan vd, 1999).

2.8 Harmoniklerin Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkileri

Bu tez çalışmasında, gerilim kararlılığına harmoniklerin etkisi ayrıntılarıyla incelenmiş ve kararlılık sınırlarını ne ölçüde etkilediği gözlenmiştir. İlerideki bölümlerde, sistemin çeşitli nonlineer yükler içermesi durumunda, nonlineer yükün bulunduğu baralar ile bulunmayan diğer baralarda kararlılık sınırlarının değişimi, lineer güç akışından ve harmonik güç akışından yararlanılarak tespit edilmiştir. Ayrıca, gerilim kararlılığını iyileştirmek için öngörülen tristör kontrollü statik VAR kompanzatorlerinin iyi bir planlama ve kontrolü yapılmadığı takdirde etkin harmonikler üretim kararsızlıklara yol açabilecekleri ispat edilmiştir. Bunlar sonraki bölümlerde ve sayısal uygulamalarda genişçe ele alınmıştır.



3. HARMONİK TEORİSİ

3.1 Giriş

Analizlerin çoğunda güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip sinüsoidal gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistem olarak modellenir. Günümüzde güç elektroniği elemanlarının yaygın bir biçimde kullanımıyla, harmonik akımlarının önemli miktarı güç sistemlerine enjekte edilmektedir. Harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda güç sistem elemanları üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilir. Sonuç olarak, harmonik çalışmalarına ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Harmonikler, genellikle güç sistemlerinde gerilim ve/veya akım dalga şekillerinin periyodik sürekli hal bozulmaları olarak tanımlanır. Harmonik çevre kirliliğinde, harmonik büyüklüklerle ilgili teori, temel frekans için tanımlanan büyüklüklerden farklı olarak tanımlanması gerekir.

Bu bölümde, temel harmonik teorisi sunulmuştur. Öncelikle, Fourier serileri ve analiz metotları gözden geçirilmiştir. Aynı zamanda, günümüzün harmonik ölçüm tekniklerinde kullanılan bazı temel Fourier dönüşümleri tanıtılacaktır. Bunlardan sonra, genel harmoniklerin teorisi, harmonik büyüklüklerin temel tanımları ve kavramları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2 Fourier Serileri ve Analizi

Fourier serilerinin teorisi ilk olarak, Fransız fizikçi ve matematikçisi Joseph Fourier tarafından 1882'de yayınlanan 'Analytic Theory of Heat' isimli makalesinde tanıtılmıştır. Teori, trigonometrik serilerin belirli tiplerinde rastgele fonksiyonların açılımlarını içermektedir. Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak göstermek, bu teori sayesinde temin edilmektedir. Bu seriler, zaman ve frekans bağlı fonksiyonlar arasında ilişki kurmaktadır. Günümüzde Fourier serileri, mühendisler ve bilim adamlarının çoğu uygulamaları için çok önemli gereksinimlerinden biri olmuştur.

3.2.1 Fourier serisi

Periyodik bir fonksiyon

$$f(t) = f(t + T) \quad (3.1)$$

ile bütün t 'ler için tanımlanabilir. Burada T fonksiyonun periyodudur. Eşitlik (3.1)'in her periyot için açılımı

$$f(t) = f(t + hT), \quad h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.2)$$

biçiminde yazılabilir. $f(t)$ 'yi T periyotlu bir fonksiyon olarak ele alırsak, bu fonksiyon trigonometrik seriler olarak da gösterilebilir:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (3.3)$$

burada $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ dir. Eşitlik (3.3)'deki gibi bir seri, trigonometrik Fourier serisi olarak adlandırılır ve şu şekilde

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (3.4)$$

olarak yeniden yazılabilir. Burada $c_0 = \frac{a_0}{2}$, $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ ve $\phi_h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$ dir.

(3.4) eşitliği göz önüne alındığında, bir periyodik fonksiyonun farklı frekanslı sinüsoidal bileşenlerin bir toplamı olarak gösterilebildiğini görürüz. Buradaki $h\omega_0$ 'ın bileşeni, periyodik fonksiyonun h . harmoniği olarak adlandırılır ve $h = 1$ olduğunda bu bileşen, temel bileşendir. c_h ve ϕ_h sırasıyla, h . harmonik büyüklüğü (genliği) ve faz açısı olarak bilinir.

Her harmoniğin büyüklüğü ve faz açısı $f(t)$ 'nin dalga şeklinin sonucundan belirlenir.

Eşitlik (3.3), aynı zamanda kompleks formda da gösterilebilir

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_h e^{jh\omega_0 t}, \quad h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.5)$$

$$c_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt \quad (3.6)$$

Bir $f(t)$ fonksiyonu çift fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = f(t) \quad (3.7)$$

ve $f(t)$ fonksiyonu tek fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = -f(t) \quad (3.8)$$

olur. Bir fonksiyon, orijinde düşey eksene göre simetrikse çift fonksiyon ve düşey eksene göre simetrik değilse tek fonksiyondur. T periyotlu bir fonksiyon, yarı dalga simetrisine sahipse

$$f(-t) = -f(t \pm T/2) \quad (3.9)$$

şartını sağlar. Eğer $f(t)$ yarı dalga simetrisine sahip ve aynı zamanda tek veya çift fonksiyonsa, $f(t)$ fonksiyonu tek veya çift çeyrek dalga simetrisine sahiptir. Simetritelerin kullanımı Fourier analizini basitleştirmektedir.

3.2.2 Fourier analizi

Eğer herhangi iki fonksiyon olan $\varphi_i(t)$ ve $\varphi_j(t)$ 'nin bütün gruplarının $\{\varphi_h(t)\}$ kümesinde karşılıkları var ise, $\{\varphi_h(t)\}$ fonksiyonlarının bir kümesi $\alpha < t < \beta$ aralığında ortogonal olarak adlandırılır

$$\int_{\alpha}^{\beta} \varphi_i(t)\varphi_j(t)dt = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \gamma, & i = j \end{cases} \quad (3.10)$$

burada γ sıfırdan farklı bir değerdir ve $\{1, \cos\omega_0 t, \dots, \cos(h\omega_0 t), \dots, \sin\omega_0 t, \sin(h\omega_0 t), \dots\}$, $-T/2 < t < T/2$ aralığında sinüsoidal fonksiyonun ortogonal bir kümesi olarak gösterilebilir.

Ortogonal ilişkiler kullanılarak, eşitlik (3.3)'deki Fourier katsayıları a_0 , a_h ve b_h sırasıyla,

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)dt \quad (3.11)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h\omega_0 t)dt \quad (3.12)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt \quad (3.13)$$

eşitliklerinden belirlenebilir ($h = 1, 2, \dots$).

$\{\varphi_h(t)\}$ kompleks değerli fonksiyonların serisi için, $\varphi_i(t)$ 'nin eşleniği $\varphi_j(t)$ olduğu zaman, (3.10) eşitliğinin sağlandığı görülebilir.

3.2.3 Fourier dönüşümü

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.14)$$

biçiminde tanımlanır ve $f(t)$, $F(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (3.15)$$

olarak tanımlanır. (3.14) ve (3.15) eşitlikleri, genellikle Fourier dönüşüm çifti olarak adlandırılır ve bu eşitlikler, zaman veya frekansa bağlı olarak $(-\infty, \infty)$ aralığındaki herhangi bir fonksiyonu, ters domende sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için kullanılır. Fourier dönüşümünün anahtar özelliği, hem zamana hem de frekansa bağlı bir fonksiyonu veya dalga şeklini inceleme kabiliyetidir. Verilen bir fonksiyon iki eşdeğer gösterime sahip olabilir: biri zamana bağlı olanıdır ki bu $f(t)$ olarak adlandırılır ve diğeri frekansa bağlı olanıdır ki bu da $f(\omega)$ olarak adlandırılır. Eşitlik (3.14) zaman fonksiyonunu, frekans spektrumuna dönüştürür ve eşitlik (3.15) frekans spektrumunu tekrar zaman fonksiyonuna dönüştürür (Chang, 1998).

3.2.4 Ayrık Fourier dönüşümü

Frekansa bağlı spektrumun ve zamana bağlı fonksiyonunun her ikisi de her periyotta N örneklemeyle periyodik örneklenmiş fonksiyonlar olduğu zaman, (3.14) ve (3.15) eşitlikleri ayrık Fourier dönüşüm (DFT) çifti olarak adlandırılıp, aşağıdaki gibi yazılabilir

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.16)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.17)$$

burada $k, n = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$. Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda daima elde edilebildiği için, bu DFT sık sık harmonik ölçümlerinde kullanılır. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerin bir zaman serisi olarak gösterilir.

Fourier analizi, DFT'ler tarafından yapılabilir. Bu DFT'ler, sık sık hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmalarının kullanımıyla hesaplanabilir (Oppenheim ve Schaffer, 1989). FFT teknikleri, çok büyük sayıda fonksiyonlar içeren (3.16) ve (3.17) eşitliklerinin DFT hesaplamalarını yapmak için çok hızlı metotlardır. Harmonik analizlerinde kullanılan pek çok sayıda FFT algoritmaları vardır.

3.3 Harmonik Büyüklüklerinin Temel Tanım ve Kavramları

Genellikle, güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektrik büyüklükleri, sinüsoidal olan sürekli hal işletim sistemleri için tanımlanmıştır. Ancak, nonlineer sistemlerden dolayı harmonikler söz konusu olduğu zaman, bu elektrik büyüklüklerinin yeniden tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Burada, güç sistem harmoniklerinin temel tanımları ile nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunduğu devredeki gerilim, akım, ani güç, ortalama (aktif) güç, kompleks güç, reaktif güç ve güç faktörü hesaplamalarıyla ilgili olan bazı faydalı tanımlamalar verilmiştir.

3.3.1 Güç sistem harmoniklerinin tanımı

Güç sistemlerinde, bir harmoniğin tanımı şu durumlarda yapılabilir: Bir frekansa sahip periyodik bir dalganın sinüsoidal bir bileşeni, temel frekansın tam katıdır. Bu yüzden, f_0 temel frekanslı bir güç sistemi için, h . harmonik mertebesinin frekansı hf_0 'dır. Harmonikler sık sık farklı büyüklükler ve frekansların gerilimleri ve akımlarıyla ilgili bozulmuş sinüs dalga şekilleri olarak tanımlanır.

Farklı genlikteki ve farklı frekanstaki sinüsoidal dalgalar ile bozulmuş bir periyodik dalga şekli oluşabilir. Aksine, herhangi bozulmuş periyodik dalga şekli bir temel dalga ve harmoniklerin bir kümesi olarak da ayrıştırılabilir. Bu ayrıştırma işlemi Fourier analizi olarak adlandırılır. Bu teknikle, güç sistemlerinde nonlineer elemanların etkileri sistematik bir biçimde analiz edilebilir.

Bir güç sistemindeki çoğu elemanlar ve yükler, hem pozitif hem de negatif yarı dalgasında aynı cevabı verir. Bu meydana gelen gerilimler ve akımlar yarı dalga simetrisine sahiptirler. Bu yüzden, çift mertebeli harmonikler karakterize edilemezler. Aynı zamanda üç ve üçün katı olan harmonikler, dengeli üç fazlı sistemlerde yıldız noktası topraksız veya üçgen transformatör bağlantısıyla bloke edilebilirler. Bu nedenlerden dolayı, harmonik analizlerinde çift harmonik mertebeleri, üç ve üçün katları olan harmonik mertebeleri ihmal edilirler. Genellikle, harmonik analizi için ilgilenilen frekanslar, temel frekansın 50. katıyla sınırlıdır.

Güç sistemlerindeki harmoniklerin ana kaynaklarından biri statik güç konverterleridir. İdeal işletim şartları altında, bir p-darbeleri hat komutasyonlu konverterin akım harmonikleri, $I_h = I_1/h$ ve $h = pn \pm 1$ (karakteristik harmonikler) (burada $n = 1, 2, \dots$ ve $p, 6$ 'nın tam katlarıdır) ile karakterize edilebilir. Eğer konverter giriş gerilimleri dengesizse veya fazlar arasında eşit olmayan komutasyon reaktansları mevcut ise veyahut konverter köprüsünde eşit olmayan mesafeli ateşleme darbeleri varsa, karakterize edilen harmoniklere ilave olarak karakterize edilemeyen harmonikler eklenecektir. Karakterize edilemeyen harmonikler, temel güç frekansının tam katları değildir.

Bu temel güç frekansının tam katı olmayan harmonik frekansları, genellikle 'ara harmonikler' olarak adlandırılır. Bu ara harmoniklerin ana kaynaklarından biri siklokonverterdir (Chu ve Burns, 1989). Ara harmoniklerin özel bir alt kümesi de alt-harmonikler olarak adlandırılır. Alt-harmonikler temel frekanstan daha az frekans değerine sahiptirler. Tutuşma titreşimi bu alt-harmonikleri oluşturur. Bu alt harmoniklerin oluşturan kaynaklardan biri ark fırınlarıdır (Dugan, 1980).

3.3.2 Nonsinüsoidal durumda elektrik büyüklükleri

Sürekli hal harmonikleri mevcut olduğu zaman, ani gerilim ve akım Fourier serileri yardımıyla aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (3.18)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (3.19)$$

burada DC terimler basitleştirme amacıyla ihmal edilirler. V_h ve I_h sırasıyla, h. harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir.

Ani güç

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.20)$$

olarak ifade edilir ve $p(t)$ 'nin T periyodunda ortalama (aktif) güç

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3.21)$$

olarak verilir. Eğer (3.18) ve (3.19) eşitlikleri (3.20)'de yerine yazılırsa ve eşitlik (3.10)'un ortogonal özelliğinden faydalanılırsa,

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (3.22)$$

elde edilir. Her bir harmoniğin, ortalama güce artı veya eksi yönde bir katkı yaptığı görülür. Farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin ortalama güce katkısı yoktur. Harmonikler tarafından üretilen ortama güç genellikle, temel ortalama güce oranla çok küçüktür. Ortogonal özellikler uygulandığında, (3.18) ve (3.19) eşitliklerinin efektif değerleri sırasıyla,

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (3.23)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.24)$$

olarak bulunur. Kompleks güç

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (3.25)$$

olur. Kompleks gücün yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı şu biçimdedir

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.26)$$

burada D, distorsiyon gücüdür. Reaktif güç (Q) tanımı

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (3.27)$$

olarak verilir. (3.18) ve (3.19) eşitliklerindeki farklı frekans bileşenlerinin gerilimlerinin ve akımlarının çarpımına karşılık gelen voltamper (VA) distorsiyonu olarak tanımlanır.

Harmonikler olmadığı zaman kompleks güç (3.25 nolu eşitlik), S temel frekanstaki alışılmış kompleks güç ifadesi olan $V_1 I_1$ 'e eşittir. Sinüsoidal durumlar altında, ortalama (aktif) ve reaktif güç ile kompleks güç arasında

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (3.28)$$

eşitliği vardır ve burada $Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \delta_1)$, $h = 1$ için eşitlik (3.27)'de tanımlanan temel reaktif güçtür.

Şimdiki durumda, araştırmacılar ve bilim adamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında hala bir konsensüs söz konusu değildir (Emanuel, 1990; Emanuel, 1993; Czarnecki, 1994; Filipinski, 1994). 1990 yılındaki, IEEE Tutorial Course'ın "Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power" bölümünde güç tanımlarıyla ilgili değişik yorumlamalar mevcuttur.

Güç faktörü kavramı, AC güç sisteminden çekilen akımın ne kadar verimlilikle bir yük tarafından kullanıldığını ölçmek için gerekir. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan durumlarla ilgisi olmadan toplam güç faktörü

$$pf = \frac{P}{S} \quad (3.29)$$

olarak tanımlanır ve burada P, eşitlik (3.22)'de gösterildiği gibi temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlerinin toplanmasıyla bulunur.

3.3.3 Harmoniklerin faz dizi bileşenleri

Nonsinüsoidal durumlarda üç fazlı dengeli bir sistem için, her bir fazın (a,b,c) harmonik geriliminin h. bileşeni

$$v_{ah}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h), \quad (3.30)$$

$$v_{bh}(t) = \sqrt{2}V_h \sin\left(h\omega_0 t - \frac{2h\pi}{3} + \theta_h\right), \quad (3.31)$$

$$v_{ch}(t) = \sqrt{2}V_h \sin\left(h\omega_0 t + \frac{2h\pi}{3} + \theta_h\right) \quad (3.32)$$

olarak ifade edilir. Buna bağlı olarak, dengeli üç fazlı güç sisteminde harmonik faz sırası modeli Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Dengeli üç fazlı güç sisteminde harmonik faz dizi bileşenleri

Harmonik Derecesi	Faz Dizi Bileşenleri
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0

Çizelge 3.1'den de görüleceği gibi üç ve üçün katları olan harmonik dereceleri tamamıyla sıfır faz dizi bileşenidir. Yukarıdaki basit faz bileşen modeli dengesiz sistemler için ele alınamaz, çünkü her bir harmonik mertebesi üç farklı faz dizi bileşeni de içerir. Bu konu daha detaylı olarak 1997 yılında Srinivasan tarafından incelenmiştir.

(3.18) - (3.24) eşitliklerindeki tanımlamalar, üç fazlı dengeli sistemler için uygundur. Dengesiz durumlarda pratik güç ifadelerinden bazıları ise, "IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations" tarafından 1996 yılında yayınlanan makalede sunulmuştur.

3.3.4 Toplam harmonik distorsiyonu

Çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akım için sırasıyla,

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3.33)$$

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3.34)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Burada THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu indeks, mükemmel bir sinüs dalga formundan, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun sapmasını tespit etmek için kullanılır. Temel frekansta mükemmel bir sinüs dalga formu için THD sıfırdır. Benzer şekilde, h. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$\text{HD}_v = \frac{V_h}{V_1} \quad (3.35)$$

$$\text{HD}_i = \frac{I_h}{I_1} \quad (3.36)$$

olarak tanımlanır.

3.3.5 Toplam talep distorsiyonu

Toplam talep distorsiyonu (TDD), toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (3.37)$$

burada I_L , önceki 12 ay için maksimum taleplerin ortalama akımı olarak hesaplanan ortak kuplaj noktasındaki (barasındaki) temel frekansta talep edilen maksimum yük akımıdır (15 veya 30 dakika boyunca). Bu TDD kavramı IEEE 'Standard 519' uygulamasında özellikle belirtilmiştir.

3.3.6 Transformator K-faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformator üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen "K-Faktörü" tanımlanmıştır (Kerszenbaum vd., 1991; Linden, 1996). K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. K-faktörü anma gücü 500 kVA'nın altındaki transformatörler için tanımlanmıştır.

Transformator K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır (ANSI / IEEE Standard, 1986). K-faktörü

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h / I_1)}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_1)^2} \quad (3.38)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada h , harmonik mertebesi ve I_h/I_1 tekil harmonik distorsiyonuna karşılık gelir. (3.38) eşitliği, harmonik bileşenin büyüklüğünün karesi ve harmonik mertebesine oranla her bir harmonik akım bileşeni tarafından üretilen transformator sarım fuko akım kayıpları varsayımı temeline dayanır.

K-oranlı transformator, standart transformatörlerden daha çok gerilim distorsiyonuna dayanacak biçimde yapılır. K-faktörü gerçekte, transformatörler tarafından meydana getirilen aşırı ısınmayla ilişkilidir. Bu K-faktörü, nonlinear yükler için dizayn ve tesis aşamasında göz

önünde bulundurulur ve yeni veya yenilenen güç kaynak cihazları için bir şartname olarak kullanılır.

3.3.7. Distorsiyon güç faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiği zaman şu şekilde gösterilebilir (Grady ve Gilleskie, 1993)

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \quad (3.39)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (3.40)$$

bu eşitlikler, (3.23) ve (3.24) eşitlikleri (3.33) ve (3.34) eşitliğinde yerine yazılarak bulunur. (3.29) eşitliğindeki toplam güç faktörü

$$pf_{toplam} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (3.41)$$

olur. Çoğu durumlarda, P ortalama (aktif) gücünün sadece çok küçük bir oranı harmonikler tarafından etkilenir ve toplam harmonik gerilim distorsiyonu %10'dan daha azdır. Böylece (3.41) eşitliği

$$pf_{toplam} = \frac{P_1}{V_1 I_1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot pf_{dist} \quad (3.42)$$

olarak ifade edilebilir. (3.42) eşitliğinde ilk terim, $\cos(\theta_1 - \delta_1)$, kayma güç faktörü ve ikinci terim, pf_{dist} , distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Çünkü, bu öteleme güç faktörü, hiçbir zaman 1'den büyük değildir (Chang, 1998)

$$pf_{toplam} \leq pf_{dist} \quad (3.43)$$

Görüldüğü gibi, yüksek akım distorsiyonlu tek faz nonlineer yükleri için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonans durumuna neden olma ihtimalinden dolayı bu gibi yükler için güç faktörü düzeltici kondansatörler gereklidir. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu ise, nonlineer yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır.



4. GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ VE SİSTEM ELEMANLARININ HARMONİKLERE BAĞLI OLARAK MODELLENMESİ

Güç sisteminde harmoniklerin etkinliğini belirlemek için harmonik analizinin yanında, harmonik üreten elemanların incelenmesi ve bu elemanların güç sisteminde modellenmesi önem taşımaktadır.

4.1 Harmonik Üreten Elemanlar

Elektrik güç sistemlerinde nonsinüsoidal büyüklükler (harmonikli akım ve gerilimler), sistemin lineersizliğinden meydana gelmektedir. Bu lineersizlikler elektrik ve magnetik lineersizliklerdir. Son yıllarda yarı-iletken elemanların kullanımının yaygınlaşması, harmonik bileşenlerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Harmonikleri meydana getiren elemanlar genel olarak şu şekilde verilebilir (Kocatepe, 1995; Dugan vd., 1996):

- Statik VAR kompanzatörler,
- Konverterler,
- Yarı iletken elemanlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinaların uyarılması için kullanılan diyod ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz boşalmalı aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlamalı güç kaynakları,
- Civa ve sodyum buharlı lambalar ile floresant lambalar,
- Kaynak makinaları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüler,
- Ark fırınları,
- Yüksek doğru gerilim sistemleri.

Bir güç sisteminin harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından sistemdeki harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir (Arrillaga vd. 1997):

a) Sistem içerisine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlineer elemanlar: Bu gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazlarının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları sebebiyle bu gruba dahil edilebilir. Tek tek ele alındığı zaman her birinin gücünün düşük olmasına rağmen, bu elemanların bir fazlı olması ve sistemde çok sayıda olmaları gözönüne alındığında tümünün etkisi önemli olabilmektedir.

b) Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlineer yükler: Bu gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği; yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, ancak gücü MW mertebesinde olan genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış bulunan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olmakta ve simülasyonu güçleştirmektedir.

c) Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri: Bu gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği düzenlerinin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca konverterin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle konverterin problemsiz çalışması için, güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir.

4.2 Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Günümüzde elektrik güç sistemlerinde, harmoniklerin ortaya çıkardığı sorunların bir kısmı ortaya çıkarılmış, bir kısmı da araştırılmaktadır. Lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonikler, güç sistemindeki tüm elemanları az veya çok etkilemektedirler. Harmonikler, motorlar, generatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında (harmonik akımların dolaşması sonucu) ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Harmoniklerin bazı elemanlar üzerindeki etkileri aşağıdaki şekilde verilebilir (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993).

4.2.1 Motorlar ve generatörler

Döner makinalarda harmonik gerilimlerinin ve akımlarının en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıpları yüzünden ısının artmasıdır. Harmonik bileşenler bu yüzden makine verimini ve momentini olumsuz yönde etkileyebilirler. Harmonik akımların mevcut olduğu bir motor, sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha çok gürültülü çalışır. Aynı zamanda harmonikler, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motor kalkış yapamayabilir veya senkronlanma sağlanmayabilir.

Harmonik bileşenler (örneğin 5. ve 7. harmonik bileşenler), sistemde bir motor yükü olması veya bir türbin-generatör kombinasyonu durumunda mekanik salınımların oluşması için bir potansiyele sahiptir. Bir mekanik rezonans frekansı olduğunda, temel frekans magnetik alanı ve harmonik akımları arasındaki etkileşimin sebep olduğu salınım momentleri olduğu zaman, söz konusu mekanik salınımlar meydana gelir.

Çizelge 4.1 Döner makinadaki konverter harmonikleri

Harmonik mertebesi	Frekans (Hz)	Faz dizi bileşeni	Stator harmoniği	Harmonik dönüş yönü	Rotor harmoniği
1	60	+	1	İleri	-
5	300	-	5	Geri	6
7	420	+	7	İleri	6
11	660	-	11	Geri	12
13	780	+	13	İleri	12
17	1020	-	17	Geri	18
19	1140	+	19	İleri	18
23	1380	-	23	Geri	24
25	1500	+	25	İleri	24

Çizelge 4.1'de, 6-darbeli bir konverterin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makinaya etkileri gösterilmiştir. Her bir harmonik gerilimi (5., 7., 11., ...), makinanın statorunda bir harmonik akım endükleyecektir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif veya negatif dizi simetrik bileşenidir. Bu harmonik akımları, stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesi yükselecektir.

Genellikle, rotordaki harmonik akımların akışı daha da önemlidir. Statordaki her bir harmonik akım, makinanın rotorunda akım endükleyecek biçimde hava aralığında bir magnetomotor

kuvvet (MMK) üretecektir. Her bir karakteristik harmonik, pozitif veya negatif dizi bileşen olarak tanımlanabilirken, harmoniklerin dönüş yönüne göre ya ileri yada geri olacaktır. 5. harmonik geri yönde (negatif dizi bileşeni) dönecektir, bundan dolayı temel hava aralığı frekansı ve 5. veya 6. harmonik bileşeni arasındaki net dönme farkına karşılık gelen frekansla birlikte rotorda bir harmonik akım endüklenecektir. 7. harmonik ileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için, temel hava aralığı frekansı ve 7. harmonik frekansı arasında net dönme farkına karşılık gelen bir frekansla (yani 6. harmonik frekansı ile) rotorda bir harmonik akım endüklenecektir. Böylece rotor ısındığından dolayı, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6. harmonik akım bileşeni üretmek için birleşirler. 11. ve 13. harmonikler, rotorda 12. harmonik akımı üretmek için aynı biçimde etkirler ve daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum devam eder. Rotor harmonikleri sonucu ortaya çıkan

- Rotor ısı,
- Titreşim veya azaltılan mukavemetler

gibi iki önemli etki vardır. Rotor ısısının miktarı, rotorun tipine bağlı olarak tolerans sınırlarına dahil edilebilir. Genellikle sarım kayıpları, demir kayıplarından daha önemlidir. Harmoniklerin toplam etkisi, makinanın ömrünü ve verimini azaltır. Harmonik bileşenler, motor performansını %5 - %10 arasında azaltmaktadırlar.

4.2.2 Transformatörler

Genellikle harmonikler, transformatörlerde gürültü artışına ve ek ısınmaya neden olurlar. Harmoniklerin transformatörler üzerinde etkisi iki türdür:

- Akım harmonikleri, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarında bir artışa neden olur.
- Gerilim harmonikleri, demir kayıplarında bir artışa neden olur.

Transformatör akımındaki harmonikler üzerinde IEEE C57.1200-1987 tarafından bir sınırlama teklif edilmiştir. Akım distorsiyon limitinin üst limiti %5 olarak sınırlanmıştır.

Harmonik gerilim ve akımlarının her ikisinin de sebep olduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekansın artmasıyla kayıplar artmaktadır ve bu yüzden yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerinden daha etkin olabilmektedirler.

Transformatör kayıpları, yüklü durumdaki kayıplar ve yüksüz durumdaki kayıplar olarak ikiye ayrılabilir. Yüklü durumdaki kayıplar da I^2R (sarım kayıpları) ve kaçak akı kayıpları olarak ikiye ayrılabilir. Kaçak akı kayıpları, nonsinüsoidal bir akım dalga formunun etkisi ile ilave ısınmaya sebep olduğundan dolayı özel bir öneme sahiptir. Sargı girdap-akım kayıpları, sarımlar, nüve, bağlantı noktaları gibi alanlardaki magnetik akıdan dolayı oluşan kaçak akı kayıplarıdır. I^2R sarım kayıpları, deri etkisi ve iletken ısınmasından dolayıdır. Sarım girdap-akım kayıpları, yük akımı ve frekansın karesiyle artar.

4.2.3 Güç Kabloları

Rezonans durumunda kablolarda, yalıtım hatalarına (delinme) yol açabilen korona ve aşırı gerilimler ortaya çıkabilir. Kablolar, harmonik akımın normal seviyelerinde bile ısınma eğilimi gösterirler.

Bir iletkenin akan nonsinüsoidal akım, dalga formunun efektif değeri için yaklaşık olarak tahmin edilebilecek bir ek ısınmaya neden olacaktır. Deri etkisi ve yakınlık (proximity) etkisi olarak bilinen her iki durum da, iletken boyutu ve açıklığı kadar frekansın bir fonksiyonu olarak değişir. Özellikle büyük boyutlu iletkenler için bu iki etkinin sonucu olarak, etkin alternatif akım direncinin (R_{AC}), doğru akım direncinden (R_{DC}) daha büyük olmasına sebep olur. Yüksek frekanslı harmonikler içeren bir akım dalga formu bir kabloda dolaşırsa, kablo için eşdeğer R_{AC} daha da yükselecek ve bu yüzden I^2R_{AC} kayıpları artacaktır.

4.2.4 Kondansatörler

Bir güç sisteminde kondansatörlerin kullanılmasından kaynaklanan en önemli problem, sistemin rezonansa girme ihtimalidir. Rezonans durumdaki akım ve gerilimler, rezonanssız durumdaki akım ve gerilimlere göre oldukça yüksek olacaktır.

Bir kondansatör grubunun reaktansı, frekansla azalır ve böylece yüksek mertebeli harmonik akımlar, kondansatör grubu reaktans değerinde önemli miktarda değerini azaltıcı bir etki yapar. Bu etki, dielektrik hataları ve ısınmayı artırır.

Nonlineer magnetik bileşenlerin sık sık anahtarlanması (transformatörler ve reaktörler gibi), kapasitörlerin yüklerine ilave edilecek harmonik akımlar üretebilir. Harmoniklerin yol açtığı ısı artışı ve aşırı gerilimin sonucu, kondansatör ömrü kısalmaktadır.

IEEE Std 18-1992 standartları, kondansatör grupları için gerilim, akım ve reaktif güç ile ilgili sınırlamalar getirmektedir. Bu standartlar kullanılarak müsaade edilebilir maksimum harmonik seviyeleri belirlenebilir.

4.2.5 Elektronik elemanlar

Bir güç elektroniği elemanı, harmonik bileşenlerin bulunduğu bir sisteme bağlı olabilir. Bu elemanların doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlararası gerilim, diğer noktadaki fazlararası gerilimden daha büyük olması sonucunu doğurabilir. Elektronik kontrol devrelerinin bir çok çeşidi için, bu iki durum kritik noktalar oluştururlar ve bu kayma nedeniyle oluşan komutasyon hatalarıyla yanlış işlemlere yol açarlar. Örneğin, tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine neden olabilir (Wagner, 1993).

Diğer elektronik elemanlar, güç kaynağı elemanı içine alternatif akım kaynak harmoniklerinin iletimiyle veya magnetik kuplajla etkilenebilir. Programlanabilir kontrolörler gibi bilgisayarlar ve komplike elemanlar, en büyük tek harmonik bileşeni, temel gerilimin %3'ünden daha büyük olmamak şartıyla, harmonik gerilim distorsiyon faktörünün %5'den büyük olmadığı alternatif akım kaynaklarıyla beslenmeleri gerekir. Bazen yarı-iletken elemanların fonksiyonlarının karakterize edilememesi, ciddi problemlere yol açabilir.

4.2.6 Ölçü aletleri

Harmonik bileşenlerin (özellikle yüksek harmonik akım ve gerilimleri sonucu) sistemi rezonansa sokması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedirler. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Diskte oluşan moment, akımın ve diskte endüklenen girdap-akımının çarpımına eşittir. Bunların her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır ve böylece sayaç hatalı ölçme yapar. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Genelde, harmonik distorsiyon faktörünün %20'den büyük olduğu durumlarda büyük miktarda hatalar meydana gelebilir.

4.2.7 Anahtarlama elemanları

Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Normal işletim esnasında harmoniklerin neden olduğu ısınmadan dolayı sigortalar açabilir. Ayrıca, harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişlerindeki akım kesme işlevini zorlaştırabilirler (Wagner, 1993).

Anahtarlama elemanları veya sigortaların taşıyabilecekleri harmonik akımlarının seviyesi için şimdilik herhangi bir standart yoktur.

4.2.8 Röleler

Akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, koruma rölelerinin doğru işletilmemesine veya çalışmamasına yol açabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar bir işletme problemi oluşturmadıkları gözlenmiştir (Ortmeyer vd., 1985).

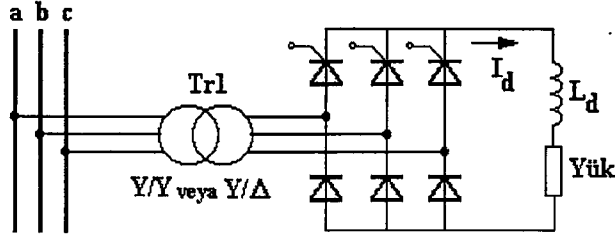
4.2.9 Gaz boşalmalı aydınlatma elemanları

Gaz deşarjı aydınlatması örneğin floresant, civa ark, neon vb ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Floresant aydınlatmada tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler. Üç fazlı dört telli montajda 3. harmonik akımı nötr iletkeninden geçer (Arrillaga vd. 1985 ; Grady ve Heydt, 1985).

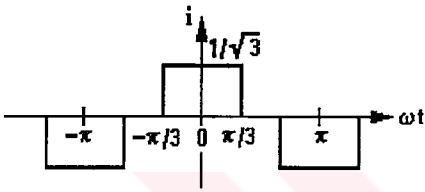
4.2.10 Konverterler

Tek ve üç fazlı hat komutasyonlu konverterler, enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biridir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenir (Kocatepe, 1995). Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir (Yumurtacı, 2000). Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin tek fazlı

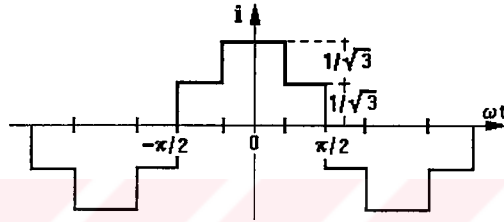
konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir (Dugan vd., 1996). Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1 Üç fazlı 6 darbeleri konvertere ait

- Bağlantı şeması
- Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli
- Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli

Şekil 4.1(a)'da 6 darbeleri bir konverterin bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir (Arrillaga vd., 1985; Rashid, 1993). Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konverterin Şekil 4.1(b) ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

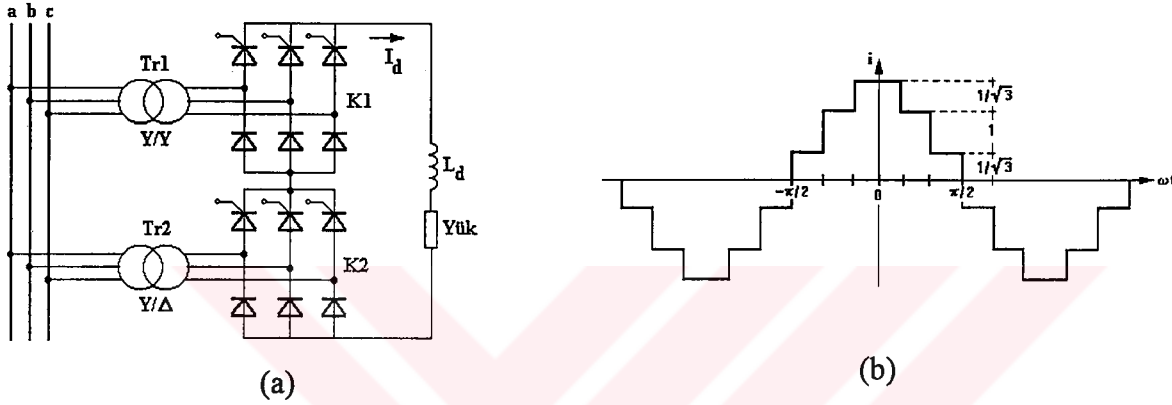
$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir (Lander, 1981; Arrillaga vd., 1985). Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması halinde, Şekil 4.1(c) ile verilen a-fazı hat akımı ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (4.2)$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda $k=1, 3, 5, \dots$ olmak üzere $6k\pm 1$ mertebesindeki harmonikler (5, 7, 17, 19, ..) yıldız/yıldız bağlı transformatörlü konverterin ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır (Arrillaga vd., 1985).

Yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip altı darbeli konverterin DC çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeli konverter ile $6k\pm 1$ ($k=1, 3, 5, \dots$) mertebesindeki harmoniklerin (5, 7, 17, 19, ...) AC şebekeye geçmesi önlenebilir. 12 darbeli konverter sisteme $k=1, 2, 3, \dots$ olmak üzere sadece $12k\pm 1$ mertebesindeki harmonikleri (11., 13., 23., 25., ..) enjekte eder.



Şekil 4.2 Üç fazlı 12 darbeli konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)

- a) Bağlantı şeması
b) Hat akımı dalga şekli

Şekil 4.2'de oniki darbeli konverterin bağlantı şeması ve a-fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir (Lander, 1981; Rashid, 1993; Arrillaga vd., 1985). Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right) \quad (4.3)$$

olarak ifade edilebilir (Arrillaga vd., 1985) (Bu kısımda verilen konverter devrelerinde ve eşitliklerinde transformatörlerin çevirme oranı 1:1 olarak alınmıştır).

4.2.11 Ark fırınları

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmonik üreten bir elemandır. Ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri bu işletmelerde harmonik

oluşumlarının nedenidir (Arrillaga vd., 1985). Bunlar geçici yükler olup harmonik çalışmaları için kolayca modellenemezler. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak da değişir. Buna ait değişimler osilogramla kaydedildikten sonra analizörlerle harmonikler tespit edilir. Ark boyundaki ani değişimin oluşturacağı şebeke dalgalanmaları, frekansın 0.1 den 30 Hz' e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur. (Arrillaga vd., 1985). Tipik bir ark fırınında 2,3,...,9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur; maksimum harmonik, temel bileşenin % 30'u kadardır (Sundberg, 1976).

4.3 Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerden dolayı gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Harmoniklerin güç sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir (IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983; Kocatepe, 1995):

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
- Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeniyle hasar görmeleri,
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımlar olmasından dolayı aşırı ısınmalar,
- Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
- Yalıtım malzemesinin delinmesi,
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,
- Elektrik cihazlarının ömrünün kısalması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olurlar.

Bu etkileri ekonomik ve teknik olarak özetlemek mümkündür. Bunlardan birincisi, omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmasıdır (Emanuel ve

Wang, 1985; Hwang vd., 1987; Hwang vd., 1988; Forrest, 1991; Meliopoulos ve Martin, 1992). İkincisi ise, ölçü ve koruma cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşmasıdır (Stratford, 1980; Fuchs vd., 1986; Goldberg ve Horton, 1987; Fuchs vd., 1987a, 1987b; Filipski ve Labaj, 1992; Makram vd., 1992). Harmonikler sebebiyle oluşan ek kayıpları azaltmak için harmonik kaynağı durumundaki nonlineer yüklerin filtreler ile donatılması gerekir. Konverterler gibi güç elektroniği devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenir.

Harmoniklerin koruma rölelerinin çalışmasına etkilerini incelemek üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin; rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün magnetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir (IEEE Wave Distortion on Consumer's Interconnection Working Group, 1984; Horton ve Goldberg, 1985; Glinkowski ve Esztergalyos, 1996a, 1996b).

4.4 Harmoniklerin Güç Sistem Cevabı

Bir güç sisteminin, problemlere neden olmaksızın harmonik akımların büyük miktarlarına dayanması oldukça güçtür. Sistem empedansı yük empedansı ile karşılaştırıldığında daha küçüktür. Bir güç sistemi kendi kendine, harmoniklerin önemli bir kaynağı değildir. Bununla birlikte güç sisteminde çok büyük distorsiyon olduğu zaman, rezonans yolu ile problemlere katkıda bulunabilir.

Bütün nonlineer yükler harmonik akım enjekte ediyor olarak farz edilirse, bir güç sisteminde her baradaki harmonik gerilim, harmoniklerin bütün mertebeleri için düğüm admitans eşitlikleri veya empedans matrisi çözümüyle aşağıdaki gibi,

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (4.4)$$

$$I_h = Y_h \cdot V_h \quad (4.5)$$

elde edilebilirler. Burada V_h , belirlenen her bir baradaki h . harmonik gerilimini içeren vektördür. Z_h , sistem harmonik empedans matrisi, Y_h , sistem harmonik admitans matrisi ve I_h ,

bağlantı baralarındaki harmonik üreten yükleri gösteren ölçülmüş veya tahmin edilmiş harmonik akımlarının vektörüdür.

(4.4) eşitliğinde Z_h , her bir harmonik için yazılan bir Z_{bara} algoritması kullanılarak veya (4.5) eşitliğindeki Y_h 'ın tersinden elde edilebilir, ancak farklı güç bileşenleri ve yükleri ile ilgili harmonik etkilerinin uygun bir biçimde modellenmesi gerekir. (4.4) veya (4.5) eşitliklerine dayalı harmonik analizi için yaklaşımlar, yaygın bir biçimde akım enjeksiyon metotları olarak adlandırılırlar. Bu yaklaşımlar genellikle, temel frekans güç akış hesaplamalarıyla birleştirilerek kullanılır. Şebeke harmonik empedansı veya admitansı ve incelenmekte olan bütün harmonikler için nonlineer yükler tarafından enjekte edilen harmonik akımlar sağlanırsa, her bir baradaki tekil ve toplam harmonik gerilim distorsiyonları belirlenebilir (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Sistemin harmonik empedansı (özellikle sistemde rezonanslar meydana geldiği zaman) harmonikler için sistem cevabında önemli bir rol oynar (Chang, 1998). Bilindiği gibi endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artmasına rağmen, kapasitif reaktans, frekans ile ters orantılıdır. Rezonans frekansında, endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olur. Sistem rezonansı, harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik gerilimleri ve akımları ortaya çıkacaktır.

Rezonans durumları bir sorun oluşturmadığında sistem, büyük seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir. Bu nedenle, sistemin cevap karakteristiklerini analiz etmek ve rezonans problemlerini gidermek çok önemlidir (Shipp, 1979). Harmonik akım meydana getiren basit bir LC devresinde, rezonans frekansı

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (4.6)$$

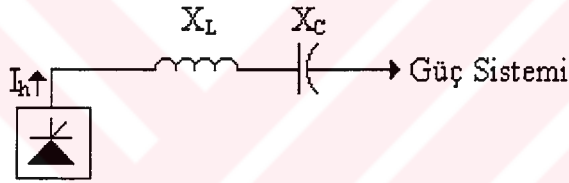
olarak ifade edilir. Bir güç sisteminde, gerilimi veya kayma güç faktörünü düzeltmek için çok büyük kapasitörlerin tesis edilmesi, çok önemli rezonans problemlerine yol açar. Sistem endüktif ve kapasitif reaktansının rezonans frekansı genellikle, beşinci veya yedinci harmonik civarlarında meydana gelir. Bununla beraber, onbirinci ve onüçüncü harmoniklerde rezonans problemlerine de bazen rastlanmaktadır. Sistemde muhtemel meydana gelen rezonansların, seri ve paralel olmak üzere iki tipi vardır. Seri rezonans harmonik akım akışı için düşük bir empedans göstermesine rağmen, paralel rezonans yüksek empedans gösterir.

4.4.1 Seri rezonans

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi, eğer kapasite grubu sistem reaktansı ile seri bağlansa ve harmonik akım için düşük bir empedans yolu meydana getirirse, seri rezonans şartı gerçekleşebilir. Seri rezonans, harmonik akımın düşük empedans yolunu takip etmesi sonucu, bu devrede endüktans ve kapasitör arasında yüksek gerilim distorsiyonlarına neden olabilir. Seri rezonans, aşırı yüklenmeden dolayı sık sık kapasitör veya sigorta arızalarına yol açar. Seri rezonans şartı,

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.7)$$

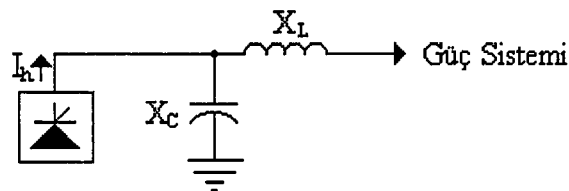
olarak verilir ve burada h_r , rezonans frekansının harmonik mertebesidir.



Şekil 4.3 Seri Rezonans

4.4.2 Paralel rezonans

Şekil 4.4, muhtemel meydana gelebilecek paralel rezonansdaki devre topolojisini gösterir. Paralel rezonans, belirli bir frekansta sistemin paralel endüktif reaktansı ve kapasitif reaktansının birbirine eşit olduğu zaman meydana gelir ve bu paralel birleşim, harmonik kaynak için çok büyük bir empedans meydana çıkarır. Bu çok büyük empedansların meydana geldiği yerdeki frekans, rezonans frekansıdır.



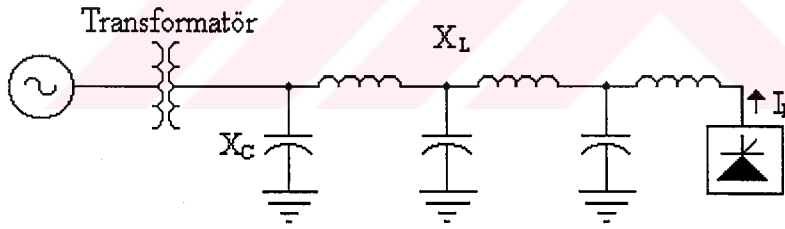
Şekil 4.4 Paralel Rezonans

Güç sistemlerinde paralel rezonans olduğu zaman, önemli gerilim distorsiyonu ve aşırı akım meydana gelebilir. Bir hayli büyük distorsiyonlu bara gerilimi, yakınındaki devrelerde bozulmuş akımlara ve bu aşırı akımlar da, cihaz arızalarına neden olabilirler. Şekil 4.4'de devrede paralel rezonans meydana geldiği zaman, rezonans frekansı

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{KAP}}} \quad (4.8)$$

olarak belirlenebilir. Burada, MVA_{SC} , sistemin harmoniğe yol açan yük bağlantı noktasındaki kısa devre gücüdür ve $MVAR_{KAP}$, kapasitörün reaktif gücüdür. Bu yaklaşım, sadece yüksek X/R oranlı sistemler için doğru olarak kabul edilmelidir.

Diğer bir rezonans şeması, Şekil 4.5'de dağıtım şebekesi olarak gösterilir. Eğer fider endüktansının bir kısmı daha küçük kapasitör grupları arasında olursa, rezonans etkileri büyük rezonans elemanlarının neden olduğu etkilerinden az olmasına rağmen, sistemin seri ve paralel rezonansa girebileceği kombinasyonlar oluşabilir. Bu tip rezonans problemlerinde, sistemin harmonik karakteristiklerini tespit etmek için daha karmaşık harmonik analiz programları kullanılmalıdır.



Şekil 4.5 Dağılmış Rezonans

4.5 Harmonikler için Çözümler

Pasif harmonik filtreleri, harmonik problemlerini azaltmak için etkin bir yöntemdir. Genellikle pasif filtreler, güç sistemlerinde olumsuz harmonik akımlarını saptırmak için bir yol temin etmek için dizayn edilirler. Filtrelerin en yaygın kullanılanları, seri ve şönt filtrelerdir.

Seri filtre, ayarlandığı frekansta yüksek bir empedansa sahip olarak harmonikleri bloke etmesine karşın, şönt filtre, ayarlandığı frekansta düşük bir empedans yolu üzerinden

harmonikleri elimine eder. Harmonik filtre dizaynı ve uygulamalarıyla ilgili daha detaylı bilgi (Kimbark 1971; Arrillaga vd., 1985; Heydt, 1991; Grady ve Gilleskie, 1993)'de yapmış oldukları çalışmalarda bulunabilir.

Güç sistemlerindeki harmonik akımlar, farklı kollar üzerindeki nonlineer yükler arasında bir faz kayması sağlayarak da azaltılabilir. Popüler metotlardan biri, faz çoklayıcı olarak adlandırılır. Bu metotta, 6-darbeleri statik konverterler (12-darbeleri ve daha yükseği), faz-kaydırıcı (Δ - Δ ve Δ -Y) transformatörler (Mohan, 1995) vasıtasıyla AC tarafa paralel ve DC tarafa seri olarak ayrı ayrı bağlanarak işletilirler. Böylece, bazı harmonikler kendiliğinden yok edilmiş olur.

Bazen, özel olarak dizayn edilmiş transformatörler (zigzag), üç ve üçün katı harmonik akımlarını bloke etmek ve nonlineer yüklerden kaynağa geri akan akımları önlemek için kullanılır. Bu zigzag transformatör sargıları genellikle, kaynağın harmonik empedansına göre transformatör sargıları arasında düşük bir harmonik empedansı sağlamak için dizayn edilir. Böylece nonlineer yük ve transformatör arasında harmonik akımları dolaşır.

Son yıllarda aktif filtre teknikleri (Grady vd., 1990) büyük önem kazanmıştır. Nonlineer yük harmonik gerilimleri ve/veya akımlarının hissedilmesiyle, aktif filtreler ya yük harmoniklerinin fazının dışında 180° 'de harmonikler enjekte ederek yada kabul edilebilir bir toleransta gerilim dalga formunu tutmak için ani akım enjekte veya absorbe ederek kullanırlar. Yani, nonlineer yükün şebekeden çektiği harmonik bileşen, aktif filtre tarafından sağlanmakta ve böylelikle şebeke akımının bozulması önlenmektedir.

4.6 Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin bu harmonik etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Bu amaçla, nonlineer yüklerin toplam harmonik distorsiyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı gelişmiş her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır.

Çeşitli ülkeler tarafından harmonikler için tanımlanmış sınır değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir (Arrillaga vd., 1985).

Çizelge 4.2 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	
	2.4-69	5
	115≤	1.5
	Özel	
	2.4-69	8
	115≤	1.5
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım	
	33≥	5
	İletim	
	22,33,66	3
	110≤	1.5
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6
İngiltere	0.415	5
	6.6-11	4
	33-66	3
	132	1.5

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama koymaktadır. IEEE 519-1992 (IEEE Standard 519, 1992) ve IEC 1000-3-2 (International Electrotechnical Commission Standard IEC 1000-3-2, 1995) gibi son standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadırlar.

IEEE'nin harmonik sınır standartları Çizelge 4.3-Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu çizelgelerdeki; I_{sc} , sistemin kısa devre akımı, I_L , yüke ait maksimum talep akımını (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TDD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir.

Çizelge 4.3 120 V-69 kV arası genel dağıtım sistemleri için akım distorsiyon sınırları

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$h \geq 35$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Çizelge 4.4 69001 V-161 kV arası iletim sistemleri için akım distorsiyon sınırları

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$h \geq 35$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Çizelge 4.5 161 kV'dan büyük iletim sistemleri için akım distorsiyon sınırları

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$h \geq 35$	TDD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Çizelge 4.6 Gerilim distorsiyon sınırları

Bara gerilimi	Tekil harmonik büyüklüğü (%)	THD _v (%)
≤ 69 kV	3.0	5.0
69-161 kV	1.5	2.5
≥ 161 kV	1.0	1.5

4.7 Güç Sistem Elemanlarının Harmoniklere Bağlı Olarak Modellenmesi

Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin etkisinin her geçen gün artması nedeniyle, bu etkilerin belirlenmesi, yok edilmesi veya sınırlandırılması için gerekli verileri elde etmek amacıyla harmonik güç akış analizi yapılır. Bu analiz için sistemdeki lineer ve nonlineer elemanların temel frekans ve harmonik frekanslarına uygun olarak modellenmesi gerekir. Harmonik simülasyon çalışmalarında enerji sistemi elemanlarının modellenmesi, frekans ve zamana bağlı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Bu çalışmadaki modelleme, güç sistemine enjekte edilen harmonik akımlar için sistem bileşenlerinin frekansa bağlı çözümüne dayanmaktadır. Dengeli sistemlerde güç akış analizi yapılırken sistemin tek faz eşdeğerinin gözönüne alınması ve elemanların modellenmesi için pozitif-dizi empedans veya admitans değerlerinin kullanılması yeterlidir.

4.7.1 Temel devre elemanlarının harmoniklere bağlı eşdeğerleri

Temel devre elemanları olan direnç, endüktans ve kapasitenin değerleri harmoniklere bağlı olarak değişir. Bu değişim, artma veya azalma biçiminde olabilir. Direnç elemanında diri

etkisiyle artışa, endüktans elemanında frekansla orantılı artışa ve kapasite elemanında da frekansla orantılı azalmaya neden olur. Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebiyle iletken yüzeyinde homojen dağılmaması sonucu iletken direncinin değişmesi, “deri etkisi” olarak tanımlanır. Frekans yükseldikçe akım iletkenin dış yüzeyine yakın bölgelerden akma eğilimi gösterir. Bu nedenle iletkenin kullanılan kesiti azalırken iletkenin direnci artmakta ve endüktansı ise azalmaktadır (Arrillaga vd., 1985). Endüktif deri etkisi nedeniyle iletkenin endüktansındaki değişim genellikle ihmal edilebilir (Kimbark, 1971; Arrillaga vd., 1985).

Harmonik mertebesi ile frekansın orantılı olarak artması, direncin değerindeki harmonik bağımlı değişimi detaylı analizlerde dikkate almayı zorunlu kılmaktadır. Literatürde deri etkisi nedeniyle direnç artışının hesaplanmasını sağlayan, deneysel çalışmalara dayalı birçok bağıntı verilmiştir. Aşağıda bunlardan bir kısmı açıklanmıştır.

Galloway (1964) ile Magnusson' un (1965) çalışmalarına dayanan bir bağıntıda, doğru akım direnci (r_{DC} (Ω/km)), frekans f (Hz) ve silindirik iletkenin bağıl geçirgenliği (μ_r) olmak üzere,

$$M = 0.05 \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{r_{DC}}} \quad (4.9)$$

katsayısı hesaplanarak M ' in değerine bağlı olarak f frekansındaki direnç değeri,

$$\frac{r(f)}{r_{DC}} = \begin{cases} 0.035M^2 + 0.0938 & M < 2.4 \\ 0.35M + 0.3 & M \geq 2.4 \end{cases} \quad (4.10)$$

olarak hesaplanabilmektedir (EPRI report EL-2583, 1982; Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Bu çalışmada deri etkisi ile oluşan direnç değişimini hesaplamak üzere Arnold formülü olarak bilinen ve literatürde kabul gören diğer bir ampirik bağıntı kullanılmıştır (Stevenson, 1982). Bu bağıntıda, iletkenin km başına doğru akım direnci (r_{DC}), harmonik mertebesi (h) ve temel frekans (f_1) olmak üzere bir $X^{(h)}$ değişkeni tanımlanmıştır:

$$X^{(h)} = 0.050132 \sqrt{\frac{hf_1}{r_{DC}}} \quad (4.11)$$

İletkenin h. harmonik frekansı için direnci,

$$r_{AC} = \begin{cases} 0 \leq X^{(h)} \leq 3 & \text{için } r_{AC} = k_1^{(h)} \cdot r_{DC} & (\Omega/\text{km}) \\ X^{(h)} > 3 & \text{için } r_{AC} = k_2^{(h)} \cdot r_{DC} & (\Omega/\text{km}) \end{cases} \quad (4.12)$$

ile hesaplanır. Bu bağıntıdaki $k_1^{(h)}$ ve $k_2^{(h)}$ katsayıları

$$\left. \begin{aligned} k_1^{(h)} &= \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{(X^{(h)})^4}{48} \right)^{1/2} \right] \\ k_2^{(h)} &= \left[0.26 + \frac{X^{(h)}}{2,828} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

eşitlikleri ile verilmiştir. Bu bağıntılarda görüldüğü gibi harmonik mertebesine bağlı olarak, frekans yükseldikçe $k_1^{(h)}$ ve $k_2^{(h)}$ katsayılarının değeri artmaktadır. Bu durum hat iletkenlerinin alternatif akım direnç değerinin artmasına neden olmaktadır.

Elektrik güç sistem elemanlarının (transformatör, iletim hattı, generatör, motor, yük vb.) modellenmesinde endüktif ve/veya kapasitif reaktanslar geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki endüktif reaktansı $X_L^{(1)}$ olan bir bobin ile temel frekanstaki kapasitif reaktansı $X_C^{(1)}$ olan bir kondansatör elemanının h. harmonik frekansındaki reaktansları,

$$\left. \begin{aligned} X_L^{(h)} &= hX_L^{(1)} \\ X_C^{(h)} &= \frac{X_C^{(1)}}{h} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

eşitlikleri ile bulunur (bu eşitliklerde bobinin endüktansının (L) ve kondansatörün kapasitesinin (C) frekans ile değişmediği kabul edilmiştir).

4.7.2 Harmoniklerin neden olduğu kayıplar

Bilindiği gibi bir iletkenin direnci R ve iletkenden geçen akımın efektif değeri I ise, bu iletkendeki güç kaybı,

$$P_k = RI^2 \quad (4.15)$$

olarak tanımlanır. Bir nonlineer yükün akımının efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2} \quad (4.16)$$

bağıntısı ile hesaplandığına göre, bu durumda R_1 , iletkenin temel frekans direnci ve $R^{(h)}$, iletkenin h. harmonik frekansındaki direnci olmak üzere iletkendeki güç kaybı,

$$P_k = P_{k_1} + P_{k_{ek}} = R I_1^2 + R^{(h)} \sum_{h=2}^N I_h^2 \quad (4.17)$$

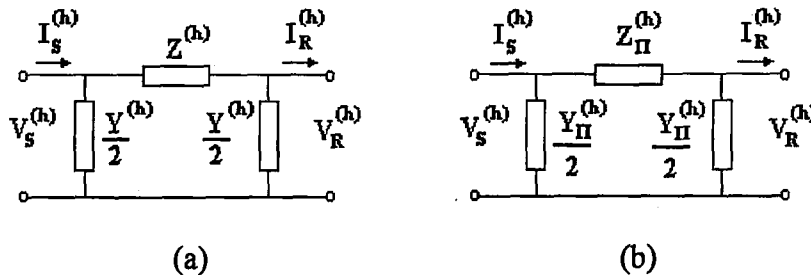
olarak tanımlanır (Shepherd ve Zand, 1979; Yumurtacı vd., 1997). Burada P_{k_1} , temel bileşendeki güç kaybını ve $P_{k_{ek}}$ ise, harmonik bileşenlerden kaynaklanan ek güç kaybını belirtmektedir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi harmonik akımların genliği arttıkça, akımın harmonik bileşenleri nedeniyle oluşan ek kayıplar da artmaktadır.

4.7.3 İletim hatlarının modellenmesi

Dengeli sistemlerde iletim hatları, hat karakteristiklerinin pozitif dizi değerleri kullanılarak oluşturulan bir fazlı eşdeğer devreleri yardımıyla modellenir. $k^{(h)}$, h. harmonik frekansı için deri etkisi nedeni ile iletken direncindeki artışı gösteren katsayı, R_0 iletkenin doğru akım direnci, $X^{(1)}$ ve $Y^{(1)}$ sırasıyla hattın temel frekanstaki seri reaktans ve paralel admitansları olmak üzere h. harmonik bileşeni için hattın seri empedansı ve paralel admitansı,

$$\left. \begin{aligned} Z^{(h)} &= k^{(h)} R_0 + jhX^{(1)} \\ Y^{(h)} &= hY^{(1)} \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil 4.6(a)'da bir iletim hattının h. harmonik bileşeni için $Z^{(h)}$ ve $Y^{(h)}$ elemanları ile oluşturulan nominal π modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.6 İletim hattının h. harmonik için (a) nominal- π modeli (b) eşdeğer- π modeli

Güç akış analizinde iletim hattının uzunluğu ortalama olarak 240 km'den fazla ise hattı, Şekil 4.6(b)'de gösterilen eşdeğer- π modeli ile modellemek gerekir (Stevenson, 1988; Çakır, 1989). (4.18) eşitliğindeki h. harmonik bileşeni için hattın toplam uzunluğuna ait empedans ($Z^{(h)}$) ve admitans ($Y^{(h)}$) değerlerinden yararlanarak ve hattın uzunluğunu dikkate alarak eşdeğer- π modelindeki $Z_{\pi}^{(h)}$ ve $Y_{\pi}^{(h)}$ elemanlarının değeri hesaplanabilir. Bu durumda hattın karakteristik empedansı,

$$Z_C^{(h)} = (Z^{(h)} / Y^{(h)})^{1/2} \quad (4.19)$$

biçiminde ve h. harmonik bileşeni için propagasyon sabiti,

$$\gamma^{(h)} = \frac{1}{\ell} (Z^{(h)} \cdot Y^{(h)})^{1/2} \quad (4.20)$$

biçiminde tanımlanır. Bunlardan yararlanılarak h. harmonik empedans ve admitans matrisleri,

$$Z_{\pi}^{(h)} = Z_C^{(h)} \cdot \sinh(\gamma^{(h)} \ell) \quad (4.21)$$

$$\frac{1}{2} Y_{\pi}^{(h)} = \frac{1}{Z_C^{(h)}} \tanh\left(\frac{\gamma^{(h)} \ell}{2}\right) \quad (4.22)$$

olarak ifade edilebilir.

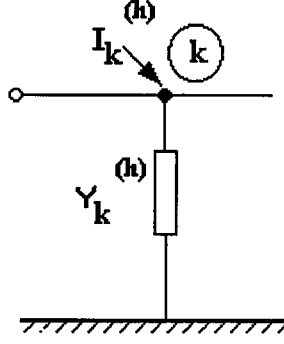
4.7.4 Paralel elemanların modellenmesi

Paralel endüktanslar ve kapasiteler güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü için kullanılırlar. Bu elemanlar anma güçleri ve gerilimleri ile tanımlanırlar ve bu verilerden yararlanılarak p.u. değer cinsinden bu elemanların faz admitansları hesaplanabilir (Arrillaga ve Arnold, 1990).

$X_k^{(1)}$, k. bara ile toprak arasındaki reaktör bobininin temel frekans altındaki endüktif reaktansını gösterdiğine göre, h. harmonik bileşeni için k barasına bağlı reaktörün admitansı,

$$Y_k^{(h)} = \frac{1}{h} \cdot \left(\frac{1}{jX_k^{(1)}} \right)^h \quad (4.23)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 4.7 Paralel elemanın modellenmesi (h. harmonik için)

Şekil 4.7'de h. harmonik bileşeni için paralel elemanın bağlantı şeması verilmiştir. Bu durumda h. harmonik bileşeni için, k barasına bağlı kapasitenin admitansı ,

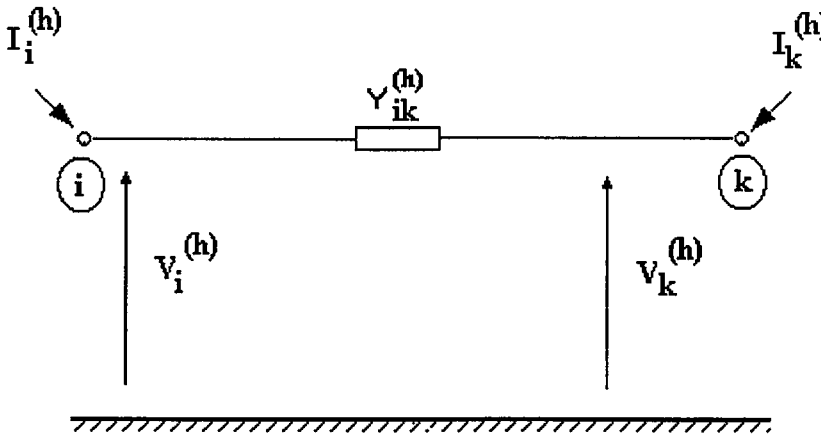
$$Y_k^{(h)} = h \cdot \left(\frac{j}{X_k^{(1)}} \right) \quad (4.24)$$

olarak ifade edilebilir.

4.7.5 Seri elemanların modellenmesi

Güç sistemindeki seri elemanlar genellikle enerji iletim hatlarına seri bağlanan kapasitelerdir.

$X_{Cik}^{(1)}$, i barası ile k barası arasına seri bağlı kapasitenin temel frekans için kapasitif reaktansını ifade eder (Arrillaga ve Arnold., 1990).



Şekil 4.8 Seri elemanın modellenmesi (h. harmonik için)

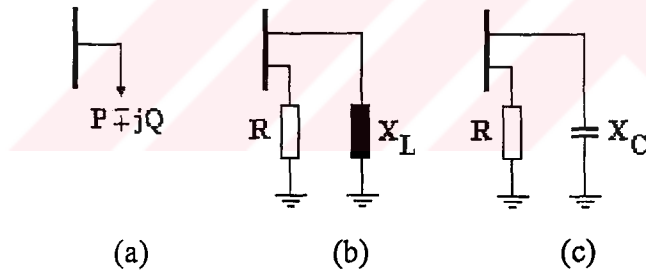
Şekil 4.8'deki $Y_{ik}^{(h)}$ admitansı genel olarak,

$$Y_{ik}^{(h)} = jh \cdot \left(\frac{1}{X_{Cik}^{(1)}} \right) \quad (4.25)$$

olarak tanımlanır (Arrillaga ve Arnold., 1990).

4.7.6 Pasif yüklerin modellenmesi

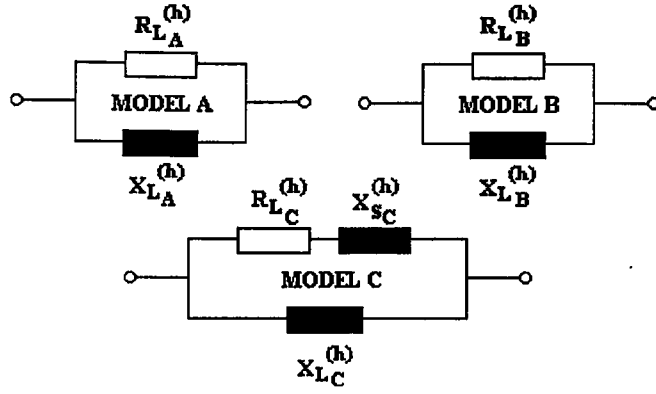
Pasif lineer yüklerin çektiği güç değerine bağlı olarak bu yükün modellenmesi için gerekli parametreler tesbit edilebilir (Grady ve Heydt, 1985; Kocatepe, 1995). Dengeli lineer yükler için gerçekleştirilen geleneksel güç akışındaki yük gösterimi için Şekil 4.9(a) kullanılır. Reaktif gücün pozitif değeri (endüktif yük) için, Şekil 4.9(b) ve reaktif gücün negatif değeri (kapasitif yük) için, Şekil 4.9(c) eşdeğer olarak verilebilir. Buradaki R , X_L ve X_C değerleri, temel bileşen için verilen uç gerilimi (V), aktif ve reaktif güç değerleri (P, Q) yardımıyla bulunabilir (Grady ve Heydt, 1985; Kocatepe, 1995).



Şekil 4.9 Lineer yüklerin modellenmesi

Harmonik güç akış analizi için pasif yüklerin harmonik frekanslarına bağlı olarak modellenmesi gerekir. Şekil 4.10'da bir fazdaki yük için literatürde verilmiş harmonik bağımlı üç farklı pasif yük modeli gösterilmiştir.

Bu yük modellerindeki direnç ve reaktans değerlerine ait bağıntılar Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu bağıntılarda; h, harmonik mertebesi, V yük uçlarındaki temel frekans faz-nötr gerilimi, P_{50} ve Q_{50} sırasıyla, 50 Hz temel frekansta yükün bir fazından çekilen aktif ve reaktif güç değeridir (CIGRE Working Group 36-05 (Distributing Loads), 1981; Arrillaga vd., 1985; IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).



Şekil 4.10 Pasif yük modelleri

Model A; CIGRE Working Group tarafından önerilmiştir (1981). Model B’de deri etkisi ihmal edilmiştir ve reaktans harmonik frekansına bağlıdır (Arrillaga vd., 1985). Model C, ses frekans dalga kontrol generatörleri kullanılarak orta gerilim yükleri için ölçümler sonucu oluşturulmuştur (CIGRE Working Group, 1981; Arrillaga vd., 1985; IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Çizelge 4.7 Pasif yük modellerindeki direnç ve reaktans bağıntıları

MODEL	DİRENÇ (Ω)	ENDÜKTİF REAKTANS (Ω)
A	$R_{LA}^{(h)} = \frac{V^2}{(0.1h + 0.9).P_{50}}$	$X_{LA}^{(h)} = \frac{V^2}{(0.1h + 0.9).Q_{50}}$
B	$R_{LB}^{(h)} = \frac{V^2}{P_{50}}$	$X_{LB}^{(h)} = h \frac{V^2}{Q_{50}}$
C	$R_{LC}^{(h)} = \frac{V^2}{P_{50}}$	$X_{LC}^{(h)} = h \frac{R_{LC}^{(h)}}{6.7 \left(\frac{Q_{50}}{P_{50}} \right) - 0.74}$ $X_{SC}^{(h)} = 0.073hR_{LC}^{(h)}$

5. TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE REZONANS ŞARTLARI

5.1 Giriş

Sistemin işletimi bakımından harmonikleri daha iyi modellemeye ve onların sebep oldukları rezonans problemlerini irdelemeye gerek vardır (Bohmann ve Lasseter, 1986; Bohmann ve Lasseter, 1989). Tristör kontrollü reaktörler (TCR) güç sisteminde her geçen gün daha da etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Tristör kontrollü reaktörlerin güç sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılması, birçok avantajlar sağlamanın yanı sıra, yapılarındaki güç elektroniği elemanları sebebiyle enerji sistemlerinde nonsinüsoidal büyüklüklerin dolaşmasına neden olurlar. Nonsinüsoidal büyüklüklerin içerdikleri harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir.

Bu bölümde, TCR'ler harmonik kaynağı olarak irdelenmiş ve harmoniklerden kaynaklanan rezonans olayı, Fourier matris modeli ve durum değişkenleri metodu ile incelenmiştir. Bu iki metotla bir örnek uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Burada sistemi etkileyebilecek miktarda büyük harmoniklerin olup olmadığı, varsa bunların tespiti ve kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, sistemdeki nonsinüsoidal bileşenlerin sistem kararlılığına etkisi incelenmiştir.

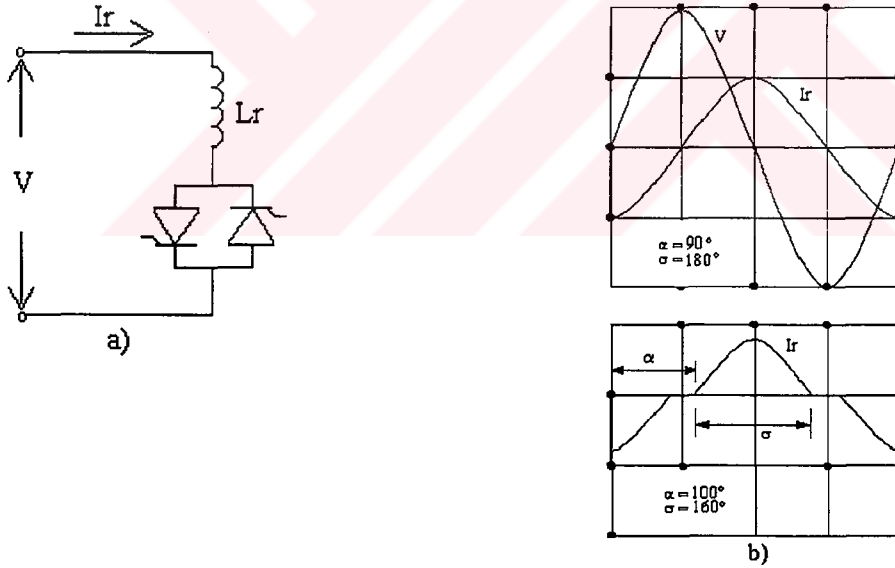
Sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktörde (FC-TCR), bir yandan sabit kapasitörler reaktif güç üretirken, diğer yandan tristör kontrollü reaktör güç tüketecektir. Belirli bir gerilim seviyesinde kapasitör grubunun reaktif güç üretimi sabit olduğundan, sistemin reaktif güç üretimi tristörlerin tetikleme açılarının değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Tristörün tetikleme açılarının değiştirilmesi reaktör akımının temel bileşenini, dolayısıyla reaktif gücün büyüklüğünü kontrol edecektir (Xu vd, 1991). Bazen tetikleme açılarının uygun seçilmemesi, tristör kontrollü reaktörün harmonik üretiminin etkin olduğu belli değerlerde, rezonans şartları bakımından olumsuzluklara yol açmaktadır.

5.2 Harmonik Kaynağı Olarak Tristör Kontrollü Reaktör

Sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri sebebiyle tristör kontrollü reaktörler, güç sisteminin performansını pek çok yönden geliştirebilirler. Bunlar, güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici

kararlılığın artırılması ve sistem osilasyonlarının azaltılması olarak sıralanabilir. Tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatorler; iletim ve dağıtım sistemlerinde, dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesinde ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim sınımlarını önlemede kullanılır.

Bir tristör kontrollü reaktörün temel elemanları Şekil 5.1(a)'da görüldüğü gibi çift yönlü tristör ile buna seri bağlı reaktörden oluşur. Bu iki ters paralel tristör simetrik bir biçimde kaplanmıştır. Buradaki tristörler zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder (Bohmann ve Lasseter, 1986). Tristörlerin her biri uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına (α) ya da iletim açısına (σ) bağlı olarak dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerle iletimde olurlar. Tam iletim hali, tetikleme açısının 90 dereceye eşit olmasıyla elde edilir. Bu durumda akım, reaktif karakterde ve sinüsoidaldir. Şekil 5.1(b)'de görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° ile 180° değerleri arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0° ile 90° değerleri arasında olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez.



Şekil 5.1 Tristör kontrollü reaktöre ait a) Temel elemanlar b) Gerilim ve akım dalga şekli

Tristör kontrollü reaktörde faz kontrolü sebebiyle harmonikler oluşur. Seçilen α ya da σ 'ya bağlı olarak reaktörün uçlarındaki gerilim ve reaktör akımının temel bileşen değerlerinin yanı sıra, çeşitli harmonik bileşenleri de içerir. Tetikleme açısı α 'nın değeri 90°'den 180°'ye doğru artırdıkça, akım dalga şekli gittikçe sinüsoidal dalga şeklinden uzaklaşır. Dengeli yüklenme koşulu altında TCR, tek harmonikleri üretir. Eğer TCR'de üçgen bağlantı yapılırsa

3. harmonik ile 3'ün katları olan harmonikler şebekeye verilmez ve bağlantı içinde elimine edilir. Ancak, TCR içeren devrelerin, etkin harmonik üretimi gerçekleştiren rezonans şartlarına karşılık gelen noktalarda işletilmemesine çok dikkat edilmesi gerekir.

Şekil 5.1(a)'da görülen tristörlerin α tetikleme açıları yada σ iletim açıları uygun seçilmek şartıyla, $I_r(t)$ akımının efektif değeri, istenilen sınırlar içinde ayarlanabilir. TCR'ye uygulanan gerilimin,

$$v(t) = V_m \cos \omega t \quad (5.1)$$

olması durumunda devreden geçen ani akım,

$$i_r = \begin{cases} \frac{V_m}{\omega L_r} (\sin(\omega t) - \sin(\frac{\pi - \sigma}{2})) & \frac{\pi - \sigma}{2} \leq \omega t \leq \frac{\pi + \sigma}{2} \\ 0 & \frac{\pi + \sigma}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi - \sigma}{2} \end{cases} \quad (5.2)$$

olarak ifade edilir. Aynı şekilde reaktörün uçları arasındaki gerilim,

$$V = V_m \quad (5.3)$$

olarak elde edilir.

Tek fazlı sistemde simetrik tetikleme açıları için reaktör akımının,

$$i_r(t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_h \sin(h\omega t) \quad (5.4)$$

sadece sinüslü ve tek harmonik bileşenlerinden oluştuğu görülecektir. Burada b_h , h . harmoniğin genliğidir. Akım dalga şeklinin Fourier analizi sonucu, efektif akımın temel bileşeninin σ 'ya bağlı ifadesi,

$$I_r^{(1)} = V_m \frac{\sigma - \sin \sigma}{X_r \pi} \quad (5.5)$$

olarak elde edilir. Burada, X_r temel frekanstaki reaktörün reaktansıdır.

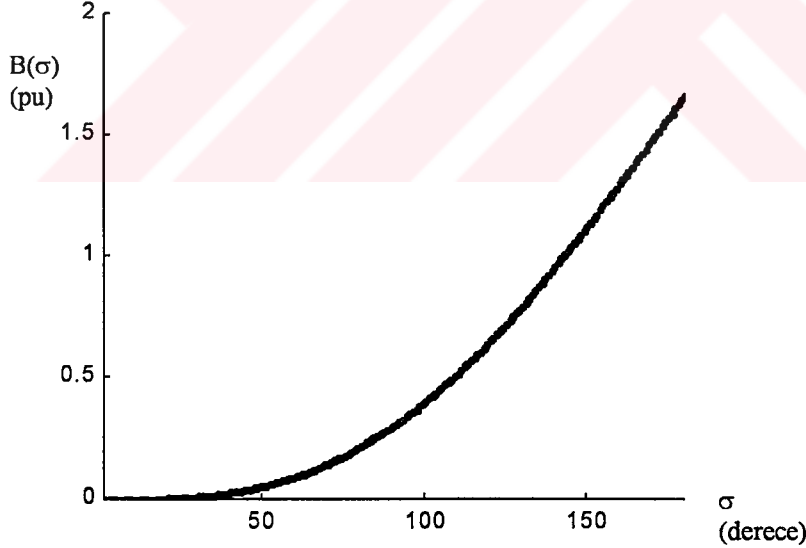
Tetikleme açısı α 'nın artması (σ iletim açısının azalması) sonucu, temel bileşen akımının ($I_r^{(1)}$) değeri düşecektir. Tetikleme açısıyla iletim açısı arasında,

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (5.6)$$

eşitliği vardır. Akımın temel frekans bileşeni dikkate alındığında, tristör kontrollü reaktör, kontrol edilebilir bir süseptans elemanı olarak algılanabilir. Temel frekansta, iletim açısı σ 'nın fonksiyonu olarak efektif süseptans (Bohmann ve Lasseter, 1986; Bohmann ve Lasseter, 1989),

$$B(\sigma) = \frac{I_r^{(1)}}{V_m} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{X_r \pi} \quad (5.7)$$

ile belirlenir. Efektif süseptansın maksimum değeri, tam iletimin gerçekleştiği $\alpha=90^\circ$ ($\sigma=180^\circ$) olması durumunda meydana gelir ve değeri $1/X_r$ 'ye eşittir. Minimum değer sıfır olup $\sigma=0^\circ$ ($\alpha=180^\circ$)'de meydana gelir. İletim açılara karşılık gelen süseptans değerleri, Şekil 5.2'de verilmektedir.

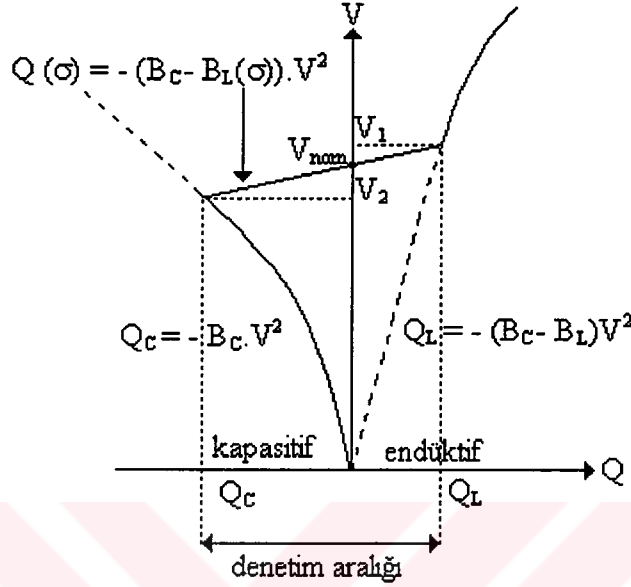


Şekil 5.2 Tristör kontrollü reaktörün iletim açılara karşılık gelen süseptans değerleri

5.3 Sabit Kapasiteli Tristör Kontrollü Reaktör İçeren Statik VAR Kompanzatorünün Kontrolü

Şekil 5.4'de gösterilen sabit kapasiteli-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatorleri, sabit kapasite gruplarına paralel bağlı (σ açısı ile kontrol edilen) değişken

bir reaktörden oluşur. Tristörlerin iletim açılarının değiştirilmesi, reaktör akımının temel bileşenini, dolayısıyla reaktif gücün büyüklüğünü denetleyecektir. Yani reaktör akımı, σ iletim açısıyla kontrol edilir. Bir yandan sabit kapasitörler reaktif güç üretirken, diğer yandan tristör kontrollü reaktör güç tüketecektir.



Şekil 5.3 Sürekli halde FC-TCR içeren kompanzatorün gerilim-reaktif güç bağıntısı

Burada B_c , kondansatör süseptansı ve $B_L(\sigma)$, iletim açısına bağlı reaktörün süseptansıdır. Reaktörün süseptansı (Bohmann ve Lasseter, 1986)

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{X_r \pi} \quad (5.8)$$

olarak alınır. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi ayar aralığında gerilim karakteristiğine karşı reaktif gücün eğimi, iletim açısının kontrolüyle belirlenir. Kompanzatorün kontrolünde üç bölge vardır. Birincisi; V_1 ve V_2 gerilimleri arasında kontrol bölgesidir. Bu bölgede kompanzator kapasitif veya endüktif karakterde olabilir. İletim açısı σ 'ya göre eşdeğer süseptansın bağıntısı,

$$B(\sigma) = B_c - B_L(\sigma) \quad (5.9)$$

biçimindedir. Reaktif gücün σ ile değişimi,

$$Q(\sigma) = - (B_C - B_L(\sigma)) \cdot V^2 \quad (5.10)$$

ile belirlenir. $V > V_{nom}$ ise, kompanzator endüktif karakterde olacak ve şebekeden kapasitif güç çekecektir ($Q(\sigma) > 0$).

$V < V_{nom}$ ise kompanzator kapasitif karakterde olacak, sisteme kapasitif reaktif güç verecek ve endüktif güç çekecektir ($Q(\sigma) < 0$).

Uç gerilimi $V > V_1$ ise, kontrol sınırları dışına çıkmıştır. $\sigma=180^\circ$ ile kontrol elemanı sınırlandırılmıştır.

İkinci bölge süseptans ifadesi,

$$B(180^\circ) = B_C - B_L(180^\circ) \quad (5.11)$$

olur ve süseptans endüktif karakterlidir. Reaktif güç ise,

$$Q_L = - (B_C - B_L(180^\circ)) V^2 \quad (5.12)$$

şeklinde değişir. Buradan da görüldüğü gibi artık kompanzator V gerilim değişimlerini kontrol edememektedir.

Üçüncü bölge, uç geriliminin V_2 'den küçük ($V < V_2$) yani $\sigma=0^\circ$ olması durumudur ve kontrol sınırları dışındadır. Süseptans ve reaktif güç sırasıyla,

$$B(0^\circ) = B_C \quad (5.13)$$

$$Q_C = - B_C \cdot V^2 \quad (5.14)$$

olarak ifade edilmektedir. Şekil 5.3'de de görüldüğü gibi regülasyon (ayar) aralığında gerilim karakteristiğine karşı reaktif gücün eğimi, iletim açısının kontrolüyle belirlenebilmektedir. Bu sabit kapasiteli-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatorlarının kontrolü harmonik bileşenler ihmal edilmesi durumunda ele alınmış klasik kontrol sistemidir. Gerçekte FC-TCR harmonik ürettiğinden, istenen reaktif güç değerinin tam olarak tespiti için,

kontrol esnasında harmonik bileşenlerin de dikkate alınması gerekir. Bununla ilgili sayısal uygulama sekizinci bölümde yapılmıştır.

5.4 Kararlılık ve Harmonikler

Daha güvenilir ve kaliteli bir enerji için, elektrik güç sisteminin planlaması, işletimi ve kontrolünde, enerji sisteminin kararlılığının da gözönünde bulundurulması gerekir (Anderson, 1994). Enerji sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası, tekrar bozucu etki öncesi çalışma şartlarına dönme yeteneği olduğu ve gerilim kararlılığı ise, bir sistemdeki yük baralarına ait gerilimlerin genliklerinin gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli sınır değerler içerisinde tutulması olduğu daha önce bahsedilmişti (Begovic ve Phadke, 1992).

Gerilimde gittikçe artan ve kontrol edilemeyen bir düşmeye neden olan yük talebindeki artma veya sistem durumundaki değişme gibi bir bozucu etki olduğu zaman sistem gerilim kararsızlığı durumuna girer. Kararsızlığa neden olan ana etken, reaktif güç talebini karşılamak için güç sisteminin yetersizliğidir. Bu yetersizliği ortadan kaldırmak için de yukarıda anlatıldığı gibi TCR içeren statik VAR kompanzatörlerin kullanımı avantaj sağlar (Indulkar vd., 1989). Ancak, bu statik VAR kompanzatörlerin yapımında güç elektroniği elemanları kullanıldığından, harmonik üreterek bazı işletim şartlarında güç sisteminin kararsızlığına yol açabilirler. Kararlılık analizleri yapıldığında, kararsızlığa yol açan durumların, rezonans şartlarında gerçekleştiği görülmektedir.

5.5 Tristör Kontrollü Reaktör ve Rezonans Şartı

Bazı özel şartların bulunması, örneğin, kompanzasyon amacıyla kullanılan kondansatörlerin devredeki diğer elemanların endüktanslarıyla rezonansa girmesi durumunda, sistemde büyük harmonik akımları meydana gelmektedir (Slow Transient Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Program, 1996). Bu bölümde yapılan çalışmayla, harmonikler sonucu oluşabilecek rezonans noktalarının tespiti yapılabilmektedir.

Bu metotta, Şekil 5.4'deki devre gözönüne alındığında, tristör kontrollü reaktör içeren bir sistemin verileri girildikten sonra, σ iletim açısının 0° ve 180° değerleri için doğal frekansın alt (ω_{0a}) ve üst (ω_{0b}) değerleri tespit edilmektedir. Doğal frekans,

$$\omega_0 = \sqrt{X_{ch} / \frac{X_{sh} + X_{rh}}{X_{sh} \cdot X_{rh}}} \quad (5.15)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada X_{ch} , kapasite reaktansının, X_{sh} , sistem reaktansının ve X_{rh} , TCR reaktansının h. harmonik bileşenleridir.

Bulunan değerlerin tek harmonikleri içerip içermediğine bakılır ve eğer sistem bu tek harmonikleri içeriyorsa, σ iletim açısının 0° ila 180° değerlerinden hangilerinde sistemi rezonansa soktuğu tespit edilir. h. harmonik bileşeni için rezonans şartı,

$$\frac{X_{sh} \cdot X_{rh}}{X_{sh} + X_{rh}} = X_{ch} \quad (5.16)$$

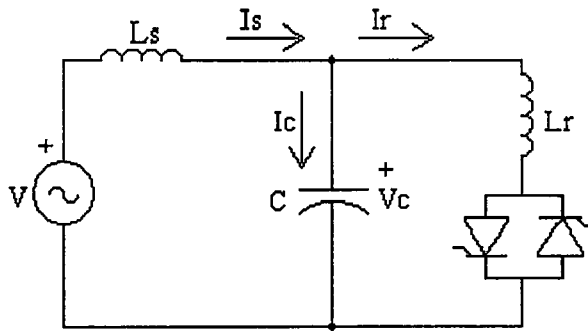
şeklinde tanımlanır.

5.6 Tristör Kontrollü Reaktörün Analizi

Tristör kontrollü reaktörlerin burada iki türlü analizi incelenmiştir. Bunlardan biri Fourier matris metodu ve diğeri de durum değişken metodu ile analizdir.

5.6.1 Tristör kontrollü reaktörün Fourier matris metodu ile analizi

Daha doğru bir frekans modeli geliştirebilmek için Şekil 5.4'deki devre detaylı bir şekilde analiz edilebilir. FC-TCR içeren statik VAR kompanzatorünün eşdeğeri, sistem empedansı L_s ve gerilim kaynağının değeri V olan bir AC sistemle gösterilebilir (Bohmann ve Lasseter, 1986).



Şekil 5.4 Sabit kapasiteli-tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatorleri

Devredeki tristörlerin ideal olarak düşünülmesi halinde kaynak akımı (I_s), reaktörün akımı (I_r) ve kapasitörün akımı (I_c) sırasıyla,

$$I_s = \frac{1}{L_s} \int (V - V_c) dt \quad (5.17)$$

$$I_r = \frac{1}{L_r} \int V_c H(t) dt \quad (5.18)$$

$$I_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (5.19)$$

olarak bulunur. Burada, $H(t)$ anahtarlama fonksiyonu olup, bir tristör tam iletimde iken bir ve her iki tristör devre dışı iken sıfır değerindedir (Bohmann ve Lasseter, 1986).

Kaynak akımı için,

$$I_s = I_r + I_c \quad (5.20)$$

eşitliği ile birlikte (5.17) ve (5.18) nolu eşitliklerden

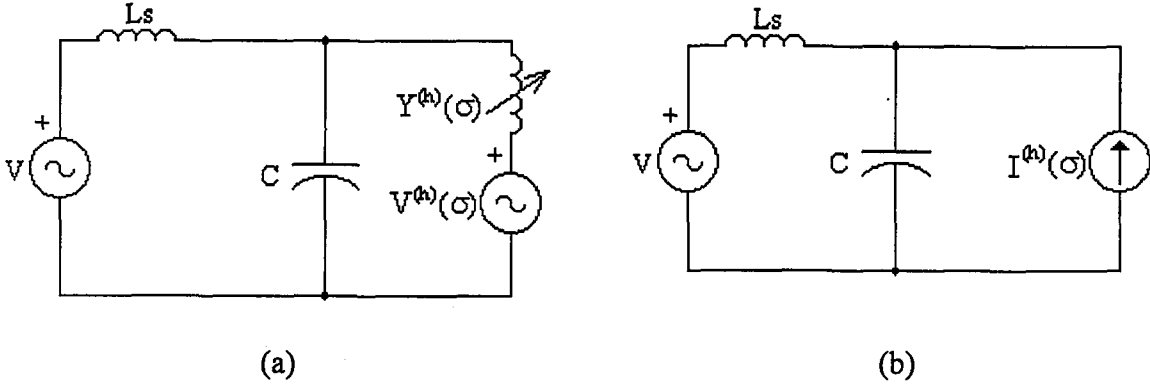
$$\frac{dI_r}{dt} = \frac{1}{L_r} H(t) V_c \quad (5.21)$$

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \left(\frac{1}{CL_s} + \frac{H(t)}{CL_r} \right) V_c = \frac{V}{CL_s} \quad (5.22)$$

elde edilebilir.

Bir TCR'de akım, gerilimden 90° geri faz kaymasına sahiptir ve böylece gerilimin sıfır olduğu yerler yaklaşık olarak simetriktir. Gerilim üzerinde $H(t)$ 'nin bağımlılığı, gerilimin sıfır karşılıklarındaki bozulmalar küçük olduğundan simetrik olarak anahtarlanmıştır. Böylece $H(t)$ 'nin bağımsızlığı kabulü, gerilimdeki değişiklikler küçük olduğu sürece gerçekçi bir biçimde yapılabilir. Yukarıdaki (5.21) ve (5.22) nolu eşitlikler, periyodik katsayılı lineer diferansiyel denklemlerdir (Bohmann ve Lasseter, 1986; Yakubovich ve Starzhinskii, 1975).

Akım ve gerilim dalga şekillerinin analizi ve yorumu sonucunda, devrenin fiziksel karşılığı Şekil 5.5(a) veya 5.5(b)'deki gibi alınabilir (Bohmann ve Lasseter, 1986).



Şekil 5.5 TCR için, a) Değişken gerilim kaynaklı ve değişken admitanslı model
b) İdeal akım kaynaklı model

H fonksiyonu şu şekilde verilir;

$$H(t) = \frac{\sigma}{\pi} + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{2}{h\pi} \cos(h\pi) \sin(h\sigma) \cos(2h\omega t) \quad (5.23)$$

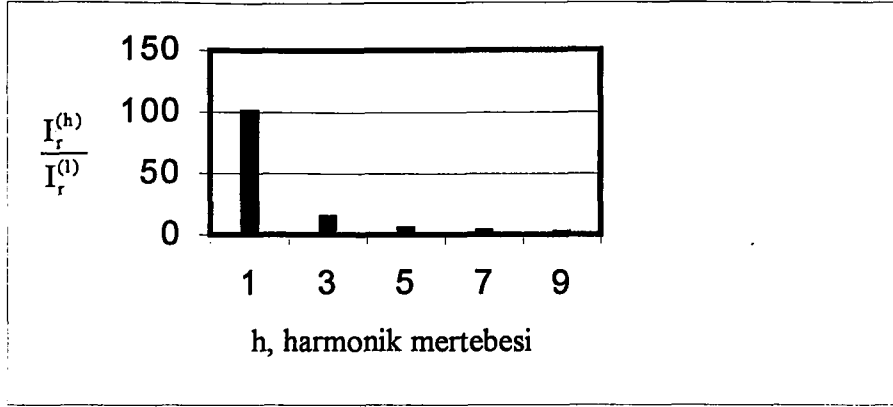
Kaynak gerilimi eşitlik (5.1)'deki gibi olması halinde, akımın ve gerilimin h. harmonik bileşen değerleri sırasıyla,

$$I^{(h)} = \frac{4V_m}{h\omega L_r \pi} \left[\frac{\cos(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) \sin(\frac{\pi-\sigma}{2})}{h^2-1} - \frac{h \sin(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) \cos(\frac{\pi-\sigma}{2})}{h^2-1} \right] \quad (5.24)$$

$$V^{(h)} = \frac{-4V_m}{\sigma - \frac{\sin(h\sigma)}{h}} \left[\frac{\cos(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) \sin(\frac{\pi-\sigma}{2})}{h^2-1} - \frac{h \sin(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) \cos(\frac{\pi-\sigma}{2})}{h^2-1} \right] \quad (5.25)$$

olarak bulunur (Bohmann ve Lasseter, 1986; Bohmann ve Lasseter, 1989). Buradaki akım ve gerilim, sadece tek harmonikleri içerir ve büyüklükler σ iletim açısının bir fonksiyonudur.

İletim açısının $\sigma = 180^\circ$ ($\alpha = 90^\circ$) değeri için her bir harmoniğinin maksimum temel akıma oranı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 TCR'de harmonik akımların maksimum genlikleri

Bu modele göre gerilim kaynağının harmonikli akımlar üzerine bir etkisi yoktur, çünkü kaynak farklı bir frekansta etkilidir. Harmonik gerilim kaynağı V_h ve harmonik akım kaynağı I_h 'dan reaktörün admitansı kolayca hesaplanabilir (Bohmann ve Lasseter, 1986). Bu reaktörün admitansı da yukarıdaki ifadelerden görüleceği gibi, σ iletim açısına bağlı olarak değişecek ve

$$Y^{(h)} = \frac{I^{(h)}}{V^{(h)}} \quad (5.26)$$

ile belirlenecektir. Burada, (5.24) ve (5.25) nolu eşitliklerinin kullanılması ile

$$Y^{(h)} = -j \frac{\sigma - \frac{\sin(h\sigma)}{h}}{h\omega L_r \pi} \quad (5.27)$$

olarak elde edilir.

5.6.2 Tristör kontrollü reaktörün durum değişkenleri metodu ile analizi

Şekil 5.5'deki devrenin analizi, durum değişkenleri kullanılarak da yapılabilir (Bohmann ve Lasseter, 1986; Bohmann ve Lasseter, 1989).

$x_1 = V_c$, $x_2 = L/C$ ve \dot{x}_1 ile \dot{x}_2 bunların türevlerini göstermek üzere sistemin durum denklemleri matrisel olarak

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\left(\frac{1}{CL_s} + \frac{H(t)}{CL_r}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \quad (5.28)$$

şeklinde veya

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}(t) \quad (5.29)$$

olarak yazılabilir. Bu, periyodik katsayılı zamanla değişen lineer bir eşitliktir. Hem $[\mathbf{A}(t)]$ matrisi hem de $\mathbf{f}(t)$ vektörü aynı periyottadır. Genelde herhangi bir anahtarlama devresi için durum eşitlikleri periyodik katsayılı lineer denklemler olacaktır (Bohmann ve Lasseter, 1989).

Bu lineer eşitlik için çözüm,

$$\mathbf{x}(t) = [\Phi_0(t)]\mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t [\Phi_0(t)]\mathbf{f}(t)dt \quad (5.30)$$

şeklinde olur. Burada $[\phi_0(t)]$ temel bir matris olup

$$[\phi_0(t)] = [\mathbf{R}(t)]e^{([\Gamma_0]t)} \quad (5.31)$$

eşitliği ile verilir (D'angelo, 1970). Burada $[\mathbf{R}(t)]$, $[\mathbf{A}(t)]$ ve $[\Gamma_0]$ sabit bir matris olarak aynı periyotlu, sürekli, periyodik bir matristir.

Eğer $\mathbf{x}(t)$ 'nin doğal frekansı zor çözümün bir harmoniği olarak aynıysa, bir rezonans şartı mevcuttur. Buradan $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{f}(t)$ 'nin periyodu olan T 'nin bir periyoduna sahip olduğu söylenebilir. Sistemin yapısı $\mathbf{x}(t)$ 'nin yarı dalga tek simetrisine sahip olmasını gerektirir. $\mathbf{x}(t)$ için homojen çözüm incelendiğinde yarı dalga simetrisinin de kullanılması ile

$$\det \left[\mathbf{I} + e^{([\Gamma_0] \frac{T}{2})} \right] = 0 \quad (5.32)$$

elde edilir.

5.7 Örnek Sistem için Analiz

Bu çalışmada tristör kontrollü reaktör kullanıldığında, rezonans analizi için yukarıda verilen iki ayrı metot ile sayısal uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Bu uygulamalarda değerler per-unit olarak, $X_r = 0.6$ pu, $X_c = 2.0$ pu ve temel frekans 50 Hz olarak alınmıştır. İlk metot olarak, yukarıda bahsedilen Fourier matris analizi kullanılmıştır.

Bununla ilgili bir bilgisayar programı yazılmış (EK 2'de verilen) ve farklı sistem parametreleri için sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu Çizelgede X_s , sistemin reaktansını, ω_0 , doğal frekansını, ω_{0a} , doğal frekansın alt değerini, $\omega_{0ü}$, doğal frekansın üst değerini, h , harmonik derecesini ve σ , iletim açısını gösterir (Uzunoğlu vd., 1999).

Çizelge 5.1 Fourier matris analizi ile elde edilen sonuçlar (Uzunoğlu vd., 1999)

X_s (pu)	h , etkin harmonik derecesi	$\omega_{0a} \leq \omega_0 \leq \omega_{0ü}$	σ , iletim açısı (derece)
0.025	9	$8.94 \leq \omega_0 \leq 9.13$	$12^0 \leq \sigma \leq 102^0$
0.035	-	$7.56 \leq \omega_0 \leq 7.78$	-
0.042	7	$6.9 \leq \omega_0 \leq 7.14$	$45^0 \leq \sigma \leq 90^0$
0.045	-	$6.67 \leq \omega_0 \leq 6.91$	-
0.055	-	$6.03 \leq \omega_0 \leq 6.3$	-
0.065	-	$5.55 \leq \omega_0 \leq 5.84$	-
0.075	-	$5.16 \leq \omega_0 \leq 5.48$	-
0.082	5	$4.94 \leq \omega_0 \leq 5.27$	$30^0 \leq \sigma \leq 38^0$
0.085	5	$4.85 \leq \omega_0 \leq 5.18$	$62^0 \leq \sigma \leq 97^0$
0.25	3	$2.83 \leq \omega_0 \leq 3.37$	$56^0 \leq \sigma \leq 57^0$

Bu sonuçları karşılaştırmak için ikinci bir yöntem olarak durum değişkenleri yöntemi kullanılarak bir bilgisayar programı daha yazılmış (EK 2'de verilen) ve sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Lineer sistem teorisi ile elde edilen sonuçlar (Uzunoğlu vd., 1999)

X_s (pu)	h , etkin harmonik derecesi	$\omega_{0a} \leq \omega_0 \leq \omega_{0ü}$	σ , iletim açısı (derece)
0.025	9	$8.94 \leq \omega_0 \leq 9.13$	$19^0 \leq \sigma \leq 99^0$
0.035	-	$7.56 \leq \omega_0 \leq 7.78$	-
0.042	7	$6.9 \leq \omega_0 \leq 7.14$	$50^0 \leq \sigma \leq 101^0$
0.045	-	$6.67 \leq \omega_0 \leq 6.91$	-
0.055	-	$6.03 \leq \omega_0 \leq 6.3$	-
0.065	-	$5.55 \leq \omega_0 \leq 5.84$	-
0.075	-	$5.16 \leq \omega_0 \leq 5.48$	-
0.082	5	$4.94 \leq \omega_0 \leq 5.27$	$34^0 \leq \sigma \leq 35^0$
0.085	5	$4.85 \leq \omega_0 \leq 5.18$	$69^0 \leq \sigma \leq 105^0$
0.25	3	$2.83 \leq \omega_0 \leq 3.37$	$52^0 \leq \sigma \leq 55^0$

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'den görüldüğü gibi, rezonans için etkin olan harmonik derecesi (h) için aynı değerler bulunmuştur. Karasızlığa neden olan iletim açıları ise, her iki metotla yapılan analizde de birbirine yakın değerler olarak karşımıza çıkmaktadır.



6. LİNEER YÜKLER İÇEREN ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ

6.1 Giriş

Güç sistemleri normal şartlar altında kararlı ve sürekli hal modunda işletilirler. Güç akış analizi, bir güç sisteminde sürekli hal işletme şartlarını sağlamak için yapılır. Analizde yükler aktif ve reaktif güç talepleri ile tanımlı olup, sürekli işletme süresi boyunca bu güç değerlerinin küçük gerilim değişimlerinden etkilenmediği varsayılır. Güç akış analizi sonunda elde edilmesi istenen büyüklükler, bara gerilimlerinin genlik ve faz açısı değerleri, sistemdeki aktif ve reaktif güç değerleridir. Hatlardaki güç kayıpları ile gerilim kontrollü baraların reaktif güç değerleri ve bu baraların gerilimlerinin faz açıları da bu değerlerle birlikte elde edilir (Çakır, 1989; Arrillaga ve Arnold, 1990).

Bir güç sisteminin analizinde güç akışı, planlama aşamasında olduğu kadar işletme aşamasında da önemli ve temel bir araçtır. Ayrıca bir güç sisteminin dağıtım otomasyonu ve optimizasyonu gibi uygulamalar için de güç akış analizine ihtiyaç duyulur. Bu uygulamalarda güç akış problemini mümkün olduğu kadar verimli çözebilmek çok önemlidir. 1950 ve 1960'lı yılların başlarından itibaren bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bilgisayar kullanımının artması ile güç akış problemini çözmek üzere birçok yöntem geliştirilmiş, özellikle Newton-Raphson yönteminin kullanımı yoğunlaşmıştır (Zimmerman ve Chiang, 1995). Newton-Raphson yönteminde, çalışılan sistem hakkında analiz öncesinde bilgi sahibi olmak ve sonuca yakın olabilecek iyi başlangıç tahminleri yapmak önemli olmaktadır (Stott ve Tarkan, 1970; Pai, 1984).

6.2 Dengeli Sistemlerde Güç Akışı

Güç akışı uygulamaları öncelikle dengeli sistemler için geliştirilmiş olup, güç akış analizinde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan en çok bilinenleri Gauss yöntemi ve Newton-Raphson yöntemidir. Kullanımının yaygın olması bakımından Newton-Raphson yöntemini inceleyelim.

6.2.1 Dengeli sistemlerde Newton-Raphson yöntemi ile güç akışı algoritması

Newton-Raphson yöntemi ile gerçekleştirilen güç akışı, nonlinear yükler içeren sistemlerde harmonik güç akışının da temeli olarak kabul edilebilir. Güç akış analizi, güç sistemindeki

yüklerin ve sistemin parametrelerinin veri olarak alınması ile yapılan bir analizdir. Bu analiz, güç sisteminin hatlarındaki aktif ve reaktif güç akışları ile gerilimlerin genlik ve faz açılarının hesaplanmasını içerir. Güç sistemleri normal şartlarda dengeli olduğu için tek faz eşdeğerinin (pozitif dizi bileşeninin) kullanımı yeterlidir. Güç akış analizinde tek faz eşdeğerini temsil eden elemanlar, doğrudan bara admitans matrisini (Y_{bara}) oluşturmada kullanılırlar.

Bara admitans matrisi şu adımlar ile bulunur:

1. Adım : Bara admitans matrisinin her bir barayı temsil eden köşegen elemanına, o baraya bağlanan bütün elemanların admitansları katılır.
2. Adım : Köşegen elemanlarının haricindeki diğer satır elemanları da, o satır numarasındaki bara ile köşegende temsil edilen bara arasındaki elemanın ters işareti alınarak yazılır.

Bir güç sisteminin herbir barası dört büyüklük ile tanımlıdır. Bu büyüklükler, aktif ve reaktif güçler, gerilimin genliği ve faz açısıdır. Kesin çözüm elde edilinceye kadar iletim hatlarının kayıpları bilinmediği için bu kayıpları karşılamak üzere sistemde “Salınım Barası” adı verilen bir referans baranın seçilmesi gerekir. Salınım barasının gerilim genliği ve faz açısı önceden verilir (genellikle 1 pu ve 0^0) ve sistemdeki tüm gerilimler salınım barası geriliminin faz açısı referans alınarak ölçülür. Sistemdeki diğer baralar, gerilim kontrollü (PV) baralar ve yük (PQ) baralarıdır. PV baraları, aktif güçleri (P) ve gerilimlerinin genlikleri (V) ile tanımlanırlar. Bu baralar, sisteme enjekte ettikleri aktif güç değeri bilinen ve türbin ayarları ile sabit tutulan üretim baralarıdır. PV baralarında generatör ikaz sargısı akımını otomatik olarak değiştiren bir gerilim regülatörü yardımıyla, generatörün çıkış geriliminin genliği (V) sabit tutulur. PQ baraları ise aktif ve reaktif güçleri (P ve Q) ile tanımlanan yüklerin bulunduğu baralardır.

Geleneksel güç akış formülasyonlarında güç sistem elemanları lineer elemanlar olarak kabul edilse de elektriksel güç büyüklüğü akım ve gerilim değerlerinin çarpımı olduğu için gerçekte güç akış problemi bir nonlineer problemdir.

Genel olarak güç akış problemi formülasyonlarında yüklerin, üretimin ve şebeke konfigürasyonunun incelenen zaman dilimi içinde değişmediği kabul edilir. Sürekli sinüsoidal hal gözönüne alınır. Güç akış problemi, Newton-Raphson yöntemi ile cebirsel nonlineer denklem takımının çözümü problemine indirgenerek daha basit hale getirilir.

Algoritma, bir baraya enjekte edilen kompleks güçler ile baradan çekilen kompleks güçler arasındaki farktan meydana gelen güç hatasının sıfıra yada ihmal edilebilecek kadar küçük bir tolerans değerinin (ϵ) altına indirilmesi esasına dayanır. Güç hata matrisi (vektörü),

$$[\Delta W] = [P_2 + F_{2,r}, Q_2 + F_{2,i}, \dots, P_n + F_{n,r}, Q_n + F_{n,i}]^T \quad (6.1)$$

olarak tanımlanabilir (Masoum, 1991). Bu matrisin elemanları

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_j &= P_j + F_{r,j} = P_j + V_j \sum_{k=1}^n Y_{jk} V_k \cos(\delta_j - \theta_{jk} - \delta_k) \\ \Delta Q_j &= Q_j + F_{i,j} = Q_j + V_j \sum_{k=1}^n Y_{jk} V_k \sin(\delta_j - \theta_{jk} - \delta_k) \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

ile tanımlanır. Bu eşitlikte P_j ve Q_j sırasıyla j .baradaki yükün çektiği aktif ve reaktif güç değerleri, aşağıdaki aktif ve reaktif güç hatası ile ilgili eşitlikte gösterilen $F_{r,j}$ ve $F_{i,j}$ ise sırasıyla j . baraya bağlı hatlara ait aktif ve reaktif güçlerin toplamıdır. $j=2,3,4,\dots,n$ baraları için tanımlı olan bu eşitlikte V_k , k . baranın geriliminin mutlak değeri, δ_k , bu gerilimin faz açısıdır ($\dot{V}_k = V_k \angle \delta_k$), Y_{jk} güç sisteminin bara admitans (Y_{bara}) matrisinin (j,k) elemanının mutlak değeri ve θ_{jk} ise bu elemanın açısıdır ($\dot{Y}_{jk} = Y_{jk} \angle \theta_{jk}$).

Bir salınım barası ve PQ baralarından ibaret olan n baralı bir sisteme ait güç hata matrisi $2(n-1)$ satırlı bir sütun matris yapısındadır. Sistemde 1 nolu bara salınım barası olarak seçilmektedir. Ayrıca PV baraları daha sonra (6.16) – (6.18) eşitlikleri ile algoritmaya dahil edilecektir.

$[\Delta W]$ güç hata matrisi, bara gerilim matrisinin ($[X]$) elemanlarının bir fonksiyonudur. δ_j , referans alınan salınım barası geriliminin faz açısına göre j . bara geriliminin faz kayması ve V_j , j . bara geriliminin mutlak değeri olmak üzere bara gerilim matrisi,

$$[X] = [\delta_2, V_2, \dots, \delta_n, V_n]^T \quad (6.3)$$

olarak tanımlanır (Bir numaralı bara salınım barası olarak seçildiği için bu barada genellikle $\delta_1=0^0$ ve $V_1=1$ pu olarak alınır).

Yukarıdaki tanımlar ile güç akış problemi eşitlik (6.4) gösterildiği gibi basitleşerek bara gerilim matrisi olan $[X]$ 'in elemanlarının bulunması problemine dönüşür (Masoum, 1991). Bu durumda yapılacak işlemler aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\Delta W(X) = 0 \quad (6.4)$$

Bu (6.4) denkleminin çözümü X_s ile gösterilirse, bu denklem $X=X_s$ civarında Taylor serisine açılır ve yüksek dereceli terimler ihmal edilirse J jakobyen matrisi olmak üzere

$$\Delta W(X) = \Delta W(X_s) + J(X - X_s) \quad (6.5)$$

şeklini alır. Bu denklemin her iki tarafı J^{-1} ile çarpılırsa,

$$J^{-1}\Delta W(X) = J^{-1}\Delta W(X_s) + (X - X_s) \quad (6.6)$$

elde edilir. Bu denklemde X_s , (6.4) denkleminin çözümünü sağladığı için $\Delta W(X_s) = 0$ olur ki, bu durumda denklem daha da basitleşerek,

$$X_s = X - J^{-1}\Delta W(X) \quad (6.7)$$

ile ifade edilebilir (Masoum, 1991).

Taylor serisindeki yüksek dereceli terimlerin ihmal edilmesi ile (6.7) nolu denklemin yardımıyla iteratif olarak X_s matrisindeki elemanların yaklaşık değerleri bulunabilir. Böylece ℓ iterasyon sayısı olmak üzere bu denklem,

$$X^{\ell+1} = X^{\ell} - J^{-1}.\Delta W(X^{\ell}) \quad (6.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikten,

$$\Delta X^{\ell} = J^{-1}.\Delta W(X^{\ell}) \quad (6.9)$$

olarak tanımlanırsa bu durumda (6.8) denklemini,

$$X^{\ell+1} = X^{\ell} - \Delta X^{\ell} \quad (6.10)$$

olarak da yazılabilir (Yukarıda verilen (6.4) - (6.10) denklemlerinde herbir elemanın matrisyel formda olduğu unutulmamalıdır). Bu eşitliklerde J matrisi $2(n-1)$ boyutlu bir kare matris yapısında olan jakobyen matrisidir (Bu matrise ait elemanların hesaplanması aşağıda (6.12) - (6.15) denklemlerin yardımıyla yapılabilir).

Newton-Raphson yöntemi ile güç akışına ilişkin iteratif çözüme ait işlem sırası şöyledir:

1. Adım : X matrisinin elemanları için tahmini başlangıç değerleri belirlenir (Genellikle tüm baralar için $V=1$ pu ve $\delta=0^0$ kabul edilir).
2. Adım : $\Delta W(X)$ matrisine ait elemanlar hesaplanır ve tüm eleman değerleri belirlenen toleranstan küçük ise iterasyonlara son verilir ve sonuçlar hesaplanarak yazdırılır.
3. Adım : Jakobyen matrisi oluşturulur ve (6.9) denklemine göre ΔX^{ℓ} matris elemanları hesaplanır.
4. Adım : (6.10) denklemine göre en son bara gerilim matrisine ait eleman değerleri belirlenir ve 2. adıma geri dönlür.

6.2.2 Jakobyen matrisi elemanlarına ait bağıntılar

Aktif ve reaktif güç hata bağıntılarının bara gerilim ve faz açlarına göre kısmi türevlerinden meydana gelen jakobyen matrisini oluşturan elemanların matris içerisindeki dizilişi aşağıda gösterilmiştir (Masoum, 1991)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Bara numaraları $i = \{2, 3, 4, \dots, n\}$ ve $k = \{2, 3, 4, \dots, n\}$ olmak üzere, aktif güç hata denkleminin bara gerilimi faz açısı ve mutlak değerine göre kısmi türev ifadeleri,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_i} &= -\sum_{\substack{j=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_i V_k \sin(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_k} &= Y_{ik} V_i V_k \sin(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \quad (k \neq i) \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) - 2V_i Y_{ii} \cos(\theta_{ii}) \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_k} &= Y_{ik} V_i \cos(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \quad (k \neq i) \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

olarak verilir. Bara numaraları $i = \{2, 3, 4, \dots, n\}$ ve $k = \{2, 3, 4, \dots, n\}$ olmak üzere reaktif güç hata denkleminin bara gerilimi faz açısı ve mutlak değerine göre kısmi türevleri,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_i V_k \cos(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_k} &= -Y_{ik} V_i V_k \cos(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \quad (k \neq i) \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) - 2V_i Y_{ii} \sin(\theta_{ii}) \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_k} &= Y_{ik} V_i \sin(\delta_i - \theta_{ik} - \delta_k) \quad (k \neq i) \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

biçiminde ifade edilirler.

6.2.3 Gerilim kontrollü baralar (PV baraları)

Gerilim kontrollü (PV) baraların olduğu sistemde, yukarıda açıklanan Newton-Raphson yöntemi ile güç akış analizi yapmak için PV baralarından dolayı ilave jakobyen matris formüllerine gerek yoktur. Bilindiği gibi PV baralarından şebekeye verilen aktif güç değeri (P) ile gerilim değeri (V) bilinmektedir. PV baralarında reaktif güç (Q) değeri bilinmediği için (6.1) nolu eşitliğindeki reaktif güç hatası ile ilgili terimler kaldırılıp denklem PV baralarını da kapsayacak şekilde yeniden düzenlenirse, değişkenlerin bulunduğu bara gerilim matrisi,

$$[\mathbf{X}] = [[\delta_{PQ}], [\delta_{PV}], [V_{PQ}]]^T \quad (6.16)$$

ile ve güç hata matrisi,

$$[\Delta W] = \left[[\Delta P_{PQ}], [\Delta P_{PV}], [\Delta Q_{PQ}] \right]^T \quad (6.17)$$

şeklinde gösterilebilir. n_{pq} sistemdeki yük (PQ) barası sayısı, n_{pv} sistemdeki gerilim kontrollü (PV) bara sayısı olmak üzere, yukarıdaki eşitliklerde δ_{PQ} , V_{PQ} , ΔP_{PQ} ve ΔQ_{PQ} matrisleri ($n_{pq} \times 1$) boyutlu, δ_{PV} ve P_{PV} matrisleri ($n_{pv} \times 1$) boyutludur. Bu durumda sistemdeki toplam bara sayısı n , ($n = n_{pq} + n_{pv} + 1$) olarak hesaplanabilir. Yukarıdaki açıklamalara göre sadece PQ baralarının bulunduğu sistem için verilen (6.8) nolu eşitliği PV baralarını da kapsayacak şekilde yeniden düzenlenebilir (Masoum, 1991):

$$\begin{bmatrix} [\delta_{PQ}] \\ [\delta_{PV}] \\ [V_{PQ}] \end{bmatrix}^{\ell+1} = \begin{bmatrix} [\delta_{PQ}] \\ [\delta_{PV}] \\ [V_{PQ}] \end{bmatrix}^{\ell} - \begin{bmatrix} [J_a] & [J_b] & [J_c] \\ [J_d] & [J_e] & [J_f] \\ [J_g] & [J_h] & [J_i] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [\Delta P_{PQ}] \\ [\Delta P_{PV}] \\ [\Delta Q_{PQ}] \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

PQ baralı sistem için (6.11) – (6.15) denklemleri ile verilmiş olan jakobyen alt matrislerine ait kısmi türev bağıntıları yukarıdaki eşitlikteki jakobyen alt matrisleri için de geçerlidir. J_a , J_b , J_d ve J_e matrisleri, (6.12) denklemi ile, J_c ve J_f matrisleri, (6.13) denklemi ile, J_g ve J_h matrisleri, (6.14) denklemi ile ve J_i matrisi, (6.15) denklemi ile oluşturulabilir.

6.3 Lineer Güç Akışı ile Sürekli Hal Gerilim Kararlılık Analizi

Alışılmış yöntemlerle yapılan sürekli hal gerilim kararlılığında, lineer güç akış analizleri kullanılmaktadır. Çalışmamızda bu analiz için bilinen lineer güç akış algoritması ile ikinci bölümde anlatılan gerilim kararlılığı algoritmasının sentezi gerçekleştirilerek ele alınan örnek bir sistemin gerilim kararlılığı incelenmiştir.

Yukarıda verilen analitik ifadelerden ve işlemlerden yararlanarak, güç sistemlerinde gerilim kararlılık analizi algoritması şu adımlar ile gerçekleştirilebilir:

1. **Adım** : Örnek sistemin mevcut işletme durumu için güç akış analizi yapılarak, örnek sistem baralarına ait yük açıları, gerilimleri ve güçleri hesaplanır.
2. **Adım** : Gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara ve salınım barası hariç bütün baralardaki güçler, güç akışından elde edilen bara gerilimleri yardımıyla şönt

admitanslara dönüştürülür.

- 3. Adım** : Elde edilen şönt admitanslar, akım yönleri göz önüne alınarak bara admitans matrisine katılırlar (bu işlemler gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara ve salınım barası için yapılmaz).
- 4. Adım** : Yeni bara admitans matrisi elde edildikten sonra, gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara elemanları 1. satır ve 1. sütunda, salınım barasına karşılık gelen elemanlarda 2. satır ve 2. sütunda olacak şekilde düzenlemeler yapılır.
- 5. Adım** : Yeni bara admitans matrisinde son düzenlemeler yapıldıktan sonra, matris indirgeme işlemleri uygulanarak 2x2'lik yeni indirgenmiş matris elde edilir.
- 6. Adım** : Elde edilen iki baralı (radyal) sistem için, lineer güç akışında hesaplanan jakobyen matrisinin tekilliğinden (ıraksama noktalarından) yararlanarak, kritik yük açısı, kritik gerilim ve kritik güç bulunur ve böylece gerilim kararlılığı incelenen baranın kritik değerleri hesaplanmış olur.

7. NONLİNEER YÜKLER İÇEREN ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ

7.1 Giriş

Bir elektrik güç sistemi, üretim, iletim ve dağıtım tesislerinden meydana gelir. Ayrıca sistemde tüketicilere ait tesisler ve yükler bulunmaktadır. Güç sistemine ve tüketicilere ait bu tesisler, elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerlerini, gerektiğinde dalga şekillerini ve frekanslarını değiştirerek sistemdeki yüklerin çalışma koşullarına uygun hale getirirler.

Generatör, transformatör, iletim hattı, Yüksek Doğru Gerilim (HVDC) sistemi, kondansatör, doğrultucu, evirici, statik VAR sistemi, ark fırını gibi aygıt ve tesisler güç sisteminde ve tüketicilerde belirli bir işlevi gerçekleştirirler. Bu elemanlardan bir kısmının akım-gerilim karakteristiği doğrusal değildir, “nonlineer eleman” olarak adlandırılan bu elemanlar şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüs formunu bozarak, sistemde harmonik bileşenlerin dolaşmasına neden olurlar (Brown ve Tunçay, 1989).

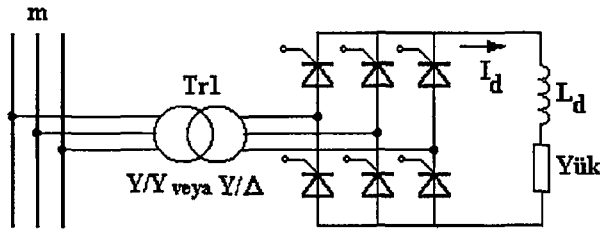
Yarı-iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sistemdeki elektromagnetik elemanların yerini gün geçtikçe güç elektroniği düzenleri almakta, sistemdeki nonlineer eleman sayısı artmaktadır. Güç sistemindeki nonlineer karakteristikli elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğine neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini azaltmaktadırlar (Martinon vd., 1996).

Harmonik analiz çalışmaları, güç sistem analiz ve tasarımının önemli bir parçasıdır. Harmonik analizi, bir güç sisteminin çeşitli noktalarındaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmayı ölçmek, tehlikeli boyutlara varacak rezonans koşullarının olup olmadığını belirlemek ve harmonikleri elimine edecek filtre sisteminin tasarımı için gerekli verileri elde etmek amacıyla gerçekleştirilir (IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Bu bölümde yukarıda açıklanan hedefler doğrultusunda sistemin tek faz eşdeğerinin gözönüne alındığı, literatürde bilinen, dengeli sistemler için tanımlanmış harmonik güç akış analizi algoritması kısaca gözden geçirilmiştir. Ayrıca çalışmanın temel konusu olarak önerilen, nonlineer yükler içeren enerji sistemleri için harmonik güç akış algoritmasına dayalı gerilim kararlılık analizi algoritması detaylı olarak açıklanmıştır.

1982 yılında Xia ve Heydt tarafından yapılan çalışmada, hat komutasyonlu konverterlerin uyumunu sağlamak için klasik Newton-Raphson metoduna dayalı güç akış analizini yeniden formüle edilmiştir. Bu harmonik güç akış formülasyonu, eğer başka nonlinear yüklerin uç karakteristikleri (temel ve harmonikli) bilinirse, onlara da uygulanabilir. Bu yüzden, başka nonlinear yükler benzer şekilde fakat ayrıca ele alınabilir. Dengeli bir sistemde, çift numaralı harmonikler ihmal edilir ve nonlinear yüklerin, sıfır dizi bileşen akımlarını elimine edecek üçgen bağlantı transformatörleriyle güç sistemlerine bağlandığı farzedilir. Dengeli bir sistemde, 3 ve 3'ün katları olan harmonikler ($3h$, $h=1,2,\dots$) sıfır dizi bileşeni tipinde olduğundan yük bağlantısı topraksız veya üçgen bağlantı durumunda şebekeye sıfır dizi akımları akmaz. Bu yüzden 3 ve 3'ün katları olan harmonikler bu analize katılmaz. Transformatörler lineer eleman olarak kabul edilmiş ve buna ait nonlinearlik ve kayıplar ihmal edilmiştir.

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri de tek ve üç fazlı hat komutasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komutasyonlu konverterler üzerinden beslenir (Yumurtacı, 2000). Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin tek fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir (Dugan vd., 1996). Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından şebekeden çekilen AC akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Şekil 7.1'de 6 darbeleri bir konverterin bağlantı şeması gösterilmiştir (Arrillaga vd., 1985; Rashid, 1993).



Şekil 7.1 Üç fazlı 6 darbeleri konverter bağlantı şeması

Burada I_d , DC yük akımı ve L_d , doğrultucu endüktansdır. Hat komutasyonlu konverterleri içeren Newton-Raphson güç akış analizinin yeniden formülasyonu için incelenecek metoda geçmeden önce, bu gibi nonlinear yüklerin akım-gerilim ilişkisini hesaplamak gerekir. Şekil 7.1'deki m barasına tam dalga köprü doğrultuculu yük bağlantısı için nonlinear yük

parametreleri (örneğin, silikon kontrollü doğrultucunun (SCR) tetikleme açısı (α) ve uç geriliminin bir fonksiyonu olarak faz akımının reel ve imajiner bileşenleri sırasıyla ($h=1, 3, 5, \dots, L$ harmonik numaraları için),

$$\operatorname{Re}\left\{I_{\text{injekte edilen}}^{(h)}\right\} = g_{r,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dot{V}_m^{(7)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m), \quad (7.1)$$

$$\operatorname{Im}\left\{I_{\text{injekte edilen}}^{(h)}\right\} = g_{i,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dot{V}_m^{(7)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m), \quad (7.2)$$

olarak bulunur. Burada α_m ve β_m , nonlinear eleman parametreleridir.

7.2 Harmonik Güç Akışı

Harmonik güç akış çalışması, hatlardaki ve baralardaki akım ve gerilimlerin temel bileşen ve harmonik bileşenlerinin hesaplandığı bir analizdir. Bu konuda diğer harmonik güç akış çalışmalarına da kaynak olacak ilk çalışmalar 1980'li yıllarda gerçekleştirilmiştir (Xia ve Heydt, 1982; Grady, 1983; Masoum, 1991; Williams vd., 1993). HARMFLO adı verilen ve dengeli sistemlerde harmonik güç akış analizi için gerçekleştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla Yüksek Doğru Gerilim (HVDC) çeviricilerinin ve diğer nonlinear elemanların bulunduğu sistemlerin harmonik analizi yapılabilmektedir (Song vd., 1984; Grady ve Heydt, 1985).

Harmonik güç akışında şebeke gerilim ve akımları, Fourier serileri formunda ifade edilir veya grafik şeklinde bilinen yük akımı, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yardımıyla elde edilir (Kocatepe, 1995).

Harmonik güç akış analizindeki bilinmeyenlerin ve eşitliklerin incelenmesinde kolaylık sağlanması bakımından sistemdeki tüm baraların tasnif edilmesi gerekir. Harmonik güç akış tekniğinde, akım-gerilim karakteristiği lineer olan elemanların bağlı olduğu baralar "Lineer Baralar" olarak tanımlanır.

Bölüm 6'da açıklanan klasik güç akışı için tanımlanan üretim (PV) baraları ve yük (PQ) baraları, harmonik güç akışında lineer baralar olarak gözönüne alınır. Üretim barası olan salınım barası bir lineer baradır. Nonlinear karakteristikli elemanların bulunduğu baralar ise

“nonlinear baralar” olarak adlandırılır. Çizelge 7.1’de bu açıklamalara göre harmonik güç akış analizine uygun olarak baraların numaralandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 ile verilen bara düzenine göre, sistemdeki toplam bara sayısı n olup, $(m-1)$. bara son lineer bara, m . bara ilk nonlinear baradır. Sistemdeki lineer bara sayısı $(m-1)$ ve nonlinear bara sayısı ise $(n-m+1)$ olmaktadır. Bir generatör tarafından beslenen bir güç sistemi için, N_h temel bileşen dahil incelenen harmonik sayısını göstermek üzere bilinmeyenler ve bilinenler topluca listelenmiştir (Grady, 1983).

Çizelge 7.1 Harmonik güç akış analizine uygun olarak baraların numaralandırılması

BARA NO	BARAYA BAĞLANAN ELEMAN	BARA TİPİ	
		LİNEER GÜÇ AKIŞ TEKNİĞİNDE	HARMONİK GÜÇ AKIŞ TEKNİĞİNDE
1	Generatör	Salınım Barası	Lineer Bara
2 ... (m-1)	Generatör	Üretim (PV) barası	
	Yük (Lineer)	Yük (PQ) barası	
m ... n	Yük (Lineer)	Yük (PQ) barası	–
	Nonlinear yük	–	Nonlinear Bara

Bilinmeyenler

Adet

- Salınım barasının temel frekans aktif ve reaktif güçleri : 2
- Salınım barası haricindeki baralara ait temel frekans geriliminin genlikleri ve açıları : $2(n-1)$
- Bütün baralara ait harmonik gerilimlerinin genlikleri ve açıları (Salınım barası dahil) : $2n(N_h-1)$
- Bütün nonlinear baralara ait α , β parametreleri : $2(n-m+1)$

TOPLAM

$2nN_h+2(n-m+1)$

Bilinenler	Adet
• Salınım barası geriliminin genliği ve açısı	2
• Salınım barası haricindeki tüm baralara ait aktif ve reaktif güç hata denklemleri	2(n-1)
• Tüm nonlinear baralara ait aktif ve reaktif akım hata denklemleri (Temel bileşen için)	2(n-m+1)
• Tüm baralara ait aktif ve reaktif akım hata denklemleri (Temel bileşen hariç tüm harmonik bileşenleri için)	2n(N _h -1)
<hr/>	
TOPLAM	2nN _h +2(n-m+1)

7.2.1 Harmonik güç akış algoritması

Xia ve Heydt (1982) tarafından geliştirilen harmonik güç akış analizi için şebeke gerilim ve akımları, Fourier serisiyle ifade edilir. Temel ve harmonik bileşen gerilimleri alt matrisleri ile sistemdeki nonlinear yüklerin α ve β parametrelerinin oluşturduğu Φ alt matrisinden meydana gelen matris, bara değişken matrisi olarak tanımlanır. Bu matris

$$[\mathbf{X}] = \left[[\dot{\mathbf{V}}^{(1)}], [\dot{\mathbf{V}}^{(5)}], \dots, [\dot{\mathbf{V}}^{(L)}], [\Phi] \right]^T \quad (7.3)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte gerilim büyüklükleri fazör olarak gösterilmiş olup, L gözönüne alınan en yüksek harmonik mertebesidir. k barasına ait temel bileşen geriliminin genliği $V_k^{(1)}$ ve faz açısı $\delta_k^{(1)}$ olmak üzere ($\dot{V}_k^{(1)} = V_k^{(1)} \angle \delta_k^{(1)}$), salınım barası hariç temel bileşen gerilim matrisi

$$[\dot{\mathbf{V}}^{(1)}] = \left[\delta_2^{(1)}, V_2^{(1)}, \delta_3^{(1)}, V_3^{(1)}, \dots, \delta_n^{(1)}, V_n^{(1)} \right]^T \quad (7.4)$$

ile tanımlanır. Bara gerilimi matrisi h. harmonik ($h = 5, 7, \dots, L$) bileşeni için ise

$$[\dot{\mathbf{V}}^{(h)}] = \left[\delta_1^{(h)}, V_1^{(h)}, \delta_2^{(h)}, V_2^{(h)}, \dots, \delta_n^{(h)}, V_n^{(h)} \right]^T \quad (7.5)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Nonlinear eleman değişken matrisine (Φ) ait elemanlar aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir (Grady, 1983; Masoum, 1991).

$$[\Phi] = [\alpha_m, \beta_m, \alpha_{m+1}, \beta_{m+1}, \dots, \alpha_n, \beta_n]^T \quad (7.6)$$

Nonlinear yük akımları, yüke ait nonlinear eleman parametreleri (α, β) ve yükün bulunduğu baranın gerilimlerinin fonksiyonudur. h , temel bileşen veya harmonik mertebesini ($h \in \{1, 5, 7, 11, \dots, L\}$) göstermek üzere k . baraya bağlı hat akımlarının toplamı fazör olarak $\dot{I}_k^{(h)}$ ile ve bu baraya bağlı nonlinear yükün akımı fazör olarak $\dot{g}_k^{(h)}$ ile gösterilirse, bu akımlar, reel ($I_{r,k}^{(h)}, g_{r,k}^{(h)}$) ve imajiner ($I_{i,k}^{(h)}, g_{i,k}^{(h)}$) bileşenlere

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k^{(h)} &= I_{r,k}^{(h)} + jI_{i,k}^{(h)} \\ \dot{g}_k^{(h)} &= g_{r,k}^{(h)} + jg_{i,k}^{(h)} \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

eşitlikleri ile ayrılabilir.

Bara gerilimlerinin harmonik bileşenlerinin genlik ve faz açıları ile nonlinear eleman parametreleri (α, β) bilinmediği için hata güçleri eşitliklerine ek olarak Kirchhoff'un akımlar yasası ve görünen güç denklemleri de kullanılarak çözüme gidilebilir (Xia ve Heydt, 1982; Grady, 1983; Masoum, 1991; Yumurtacı, 2000). Nonlinear baralarda (m . baradan n . baraya) akım denklemleri temel frekans ($h=1$) için şöyledir:

$$\begin{bmatrix} I_{r,m}^{(1)} \\ I_{i,m}^{(1)} \\ \dots \\ I_{r,n}^{(1)} \\ I_{i,n}^{(1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g_{r,m}^{(1)} \left(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m \right) \\ g_{i,m}^{(1)} \left(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m \right) \\ \dots \\ g_{r,n}^{(1)} \left(\dot{V}_n^{(1)}, \dot{V}_n^{(5)}, \dots, \dot{V}_n^{(L)}, \alpha_n, \beta_n \right) \\ g_{i,n}^{(1)} \left(\dot{V}_n^{(1)}, \dot{V}_n^{(5)}, \dots, \dot{V}_n^{(L)}, \alpha_n, \beta_n \right) \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Sistemde 1'den ($m-1$)'e kadar numaralı baraların lineer baralar olması sebebiyle bu baralarda harmonik akımı enjekte edecek nonlinear eleman olmadığı için h . harmonik için ($h \neq 1$) bu baralara ait nonlinear yük akımları sıfırdır:

$$g_{r,1}^{(h)} = 0, g_{i,1}^{(h)} = 0, g_{r,2}^{(h)} = 0, g_{i,2}^{(h)} = 0, \dots, g_{r,m-1}^{(h)} = 0, g_{i,m-1}^{(h)} = 0 \quad (7.9)$$

Harmonik kaynağı durumundaki nonlinear yükler, m'den n'e kadar numaralı baralarda bulunduğu için bu baralarda harmonikli yük akımları olacaktır. Bunun matrisyel ifadesi ise şöyledir:

$$\begin{bmatrix} I_{r,1}^{(h)} \\ I_{i,1}^{(h)} \\ \dots \\ I_{r,m-1}^{(h)} \\ I_{i,m-1}^{(h)} \\ I_{r,m}^{(h)} \\ I_{i,m}^{(h)} \\ \dots \\ I_{r,n}^{(h)} \\ I_{i,n}^{(h)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ g_{r,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \\ g_{r,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \\ \dots \\ g_{r,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \\ g_{r,m}^{(h)}(\dot{V}_m^{(1)}, \dot{V}_m^{(5)}, \dots, \dot{V}_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Harmonik bileşenleri içermesi nedeniyle bozulmuş sinüs formundaki nonlinear yük akımının dalga şekli bir osilogram yardımıyla elde edilerek FFT algoritması ile harmonik spektrumu belirlenebilir. $k \in \{m, m+1, \dots, n\}$ olmak üzere her bir nonlinear barada görünen güç dengesi için,

$$(S_k)^2 = (P_k^t)^2 + (Q_k^t)^2 + (D_k)^2 \quad (7.11)$$

yazılabilir. Bu eşitlikte P_k^t , k. nonlinear baranın temel frekans ve harmonik aktif güçleri toplamı, Q_k^t , k. nonlinear baranın temel frekans ve harmonik aktif güçleri toplamı ve D_k ise bu baraya ait distorsiyon gücünü belirtmektedir. Aktif ve reaktif güç toplamı,

$$\left. \begin{aligned} P_k^t &= \sum_{h=1}^L P_k^{(h)} \\ Q_k^t &= \sum_{h=1}^L Q_k^{(h)} \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikler yardımıyla lineer baralar için ($k \in \{1, 2, \dots, (m-1)\}$) aktif ve reaktif güç hata denklemleri,

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k &= (P_k)_{SP} + F_{r,k}^{(1)} \\ \Delta Q_k &= (Q_k)_{SP} + F_{i,k}^{(1)} \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

olarak tanımlanabilir. Bu eşitliklerde $(P_k)_{SP}$ ve $(Q_k)_{SP}$ sırasıyla, k barasındaki yük için verilen aktif ve reaktif güç değerlerini, $F_{r,k}^{(1)}$ ve $F_{i,k}^{(1)}$ ise k barasına bağlı hatların temel frekans aktif ve reaktif güç toplamları olup, h harmonik mertebesini göstermek üzere ($h = 1, 5, 7, \dots, L$) bu güçler,

$$\left. \begin{aligned} F_{r,k}^{(h)} &= V_k^{(h)} \sum_{j=1}^n Y_{jk}^{(h)} \cdot V_j^{(h)} \cdot \cos(\delta_k^{(h)} - \theta_{kj}^{(h)} - \delta_j^{(h)}) \\ F_{i,k}^{(h)} &= V_k^{(h)} \sum_{j=1}^n Y_{jk}^{(h)} \cdot V_j^{(h)} \cdot \sin(\delta_k^{(h)} - \theta_{kj}^{(h)} - \delta_j^{(h)}) \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Yukarıdaki eşitliklerde k. baraya ait h. harmonik gerilimi fazör olarak $\dot{V}_k^{(h)} = V_k^{(h)} \angle \delta_k^{(h)}$ ve h. harmonik frekansı için hesaplanmış sisteme ait bara admitans matrisinin (k, j). elemanı fazör olarak $\dot{Y}_{kj}^{(h)} = Y_{kj}^{(h)} \angle \theta_{kj}^{(h)}$ şeklinde gösterilmiştir.

Nonlineer baralar için (7.13) ve (7.14) eşitlikleri yardımıyla, $k \in \{m, m+1, \dots, n_b\}$ olmak üzere aktif ve reaktif güç hataları

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k^{\text{nonlin}} &= (P_k)_{SP} + \sum_{h=1}^L F_{r,k}^{(h)} \\ \Delta Q_k^{\text{nonlin}} &= (Q_k)_{SP} + \sum_{h=1}^L F_{i,k}^{(h)} \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

denklemleriyle hesaplanabilir.

Harmonik güç akışı için hata matrisi ise şöyle tanımlanmaktadır (Grady, 1983):

$$[\Delta M] = [[\Delta W], [\Delta I^{(5)}], [\Delta I^{(7)}], \dots, [\Delta I^{(L)}], [\Delta I^{(1)}]]^T \quad (7.16)$$

Bu eşitlikte ΔW , güç hata matrisini, $\Delta I^{(h)}$ ise, h. harmoniğe ilişkin akım hata matrisini belirtmektedir. Güç hata matrisi için,

$$[\Delta W] = [\Delta P_2, \Delta Q_2, \dots, \Delta P_{m-1}, \Delta Q_{m-1}, \Delta P_m^{\text{nonlin}}, \Delta Q_m^{\text{nonlin}}, \dots, \Delta P_n^{\text{nonlin}}, \Delta Q_n^{\text{nonlin}}]^T \quad (7.17)$$

eşitliği yazılabilir. Hata matrisinin elemanlarından olan temel bileşen (h=1) ve harmonik bileşen (h=5, 7, ..., L) akım hata matrisleri sırasıyla,

$$\left. \begin{aligned} [\Delta I^{(1)}] &= \left[(I_{r,m}^{(1)} + g_{r,m}^{(1)}), (I_{i,m}^{(1)} + g_{i,m}^{(1)}), (I_{r,m+1}^{(1)} + g_{r,m+1}^{(1)}), (I_{i,m+1}^{(1)} + g_{i,m+1}^{(1)}), \dots, (I_{r,n}^{(1)} + g_{r,n}^{(1)}), (I_{i,n}^{(1)} + g_{i,n}^{(1)}) \right]^T \\ [\Delta I^{(h)}] &= \left[I_{r,1}^{(h)}, I_{i,1}^{(h)}, \dots, I_{r,m-1}^{(h)}, I_{i,m-1}^{(h)}, (I_{r,m}^{(h)} + g_{r,m}^{(h)}), (I_{i,m}^{(h)} + g_{i,m}^{(h)}), (I_{r,m+1}^{(h)} + g_{r,m+1}^{(h)}), (I_{i,m+1}^{(h)} + g_{i,m+1}^{(h)}), \dots, \right. \\ &\quad \left. \dots, (I_{r,n}^{(h)} + g_{r,n}^{(h)}), (I_{i,n}^{(h)} + g_{i,n}^{(h)}) \right]^T \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

eşitliklerinden hesaplanabilir. Bu eşitliklerde lineer baralarda (k=1,2, ..., m-1) harmonik bileşenleri (h=5,7, ..., L) için, $I_{r,k}^{(h)} = 0$ ve $I_{i,k}^{(h)} = 0$ olmaktadır.

Newton-Raphson yöntemi kullanılarak Jakobyen matrisi ile düzeltme matrisi elde edilmekte ve güç hata matrisindeki her bir terim için hatanın sıfıra götürülmesi çözümü vermektedir (Arrillaga vd., 1983; Kocatepe, 1995). Böylece Newton-Raphson yöntemi kullanılarak sonuca istenilen tolerans ile ulaşılabilmektedir. Bu çalışmada hata için tolerans (ϵ), 10^{-4} pu olarak seçilmiştir. Harmonik güç akış analizi için Jakobyen matrisi $2(nN_h + (n-m+1)) \times 2(nN_h + (n-m+1))$ boyutundadır. Düzeltme matrisi ise

$$[\Delta X] = [J]^{-1} \cdot [\Delta M] \quad (7.19)$$

şeklinde verilir. Bu matrise ait elemanlar (alt matrisler),

$$\begin{bmatrix} \Delta V^{(1)} \\ \Delta V^{(5)} \\ \Delta V^{(7)} \\ \dots \\ \Delta V^{(L)} \\ \Delta \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^{(1)} & J^{(5)} & \dots & J^{(L)} & 0 \\ TG^{(5,1)} & TG^{(5,5)} & \dots & TG^{(5,L)} & H^{(5)} \\ TG^{(7,1)} & TG^{(7,5)} & \dots & TG^{(7,L)} & H^{(7)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ TG^{(L,1)} & TG^{(L,5)} & \dots & TG^{(L,L)} & H^{(L)} \\ TG^{(1,1)} & TG^{(1,5)} & \dots & TG^{(1,L)} & H^{(1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta I^{(5)} \\ \Delta I^{(7)} \\ \dots \\ \Delta I^{(L)} \\ \Delta I^{(1)} \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

şeklinde gösterilebilir. Buradaki,

$J^{(1)}$: $2(n-1)$ boyutunda kare matristir ve bütün baralar için yazılan geleneksel temel güç akışının jakobyen matrisi olup bu matrisin elemanları aşağıda (7.21) eşitliği ile tanımlanmıştır.

$J^{(h)}$: $2(n-1) \times 2n$ boyutundadır ve lineer baralar için sıfır elemanlar içeren harmonik bileşenlere ait jakobyen matrisi olup bu matrisin elemanları aşağıda (7.22) eşitliği ile tanımlanmıştır.

$$J^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \delta_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial V_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \delta_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial V_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

$$J^{(h)} = \begin{bmatrix} 0_{2(m-2) \times 2n} \\ \dots \\ \text{Nonlineer baralarda h. harmonik için } \Delta P^{\text{nonlin}} \text{ ve } \Delta Q^{\text{nonlin}} \\ \text{denklemlerinin } V^{(h)} \text{ ve } \delta^{(h)} \text{'ya göre kısmi türevleri} \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

(7.22) eşitliğindeki $0_{2(m-2) \times 2n}$ ile $2(m-2) \times 2n$ boyutlu, elemanlarının tümü sıfır olan matris gösterilmiştir.

h , akımın harmonik mertebesi ve v , gerilimin harmonik mertebesi olmak üzere, akım hata denklemlerinin bara gerilimlerine ve bara gerilimi faz açılara göre kısmi türevlerinden oluşan $TG^{(h,v)}$ jakobyen alt matrisi;

$$TG^{(h,v)} = \begin{cases} T^{(h,h)} + G^{(h,h)} & h = v \\ 0 + G^{(h,v)} & h \neq v \end{cases} \quad (7.23)$$

olarak tanımlanır (Grady, 1983). Bu eşitlikte $T^{(h,h)}$, h . harmonik hat akımları toplamının h . harmonik bara gerilimine göre kısmi türev satırıdır. Buradaki $G^{(h,v)}$, h . harmonik nonlineer

$$H_1^{(h)} = \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{r,k}^{(h)}}{\partial \alpha_k} & \frac{\partial g_{r,k}^{(h)}}{\partial \beta_k} \\ \frac{\partial g_{i,k}^{(h)}}{\partial \alpha_k} & \frac{\partial g_{i,k}^{(h)}}{\partial \beta_k} \end{bmatrix} \quad k = m, \dots, n ; h = 1, 5, 7, \dots, L \quad (7.26)$$

eşitliği ile verilebilir. Yukarıda verilen bilgilerden yararlanarak, dengeli sistemlerde harmonik güç akış analizi çözüm algoritması şu adımlar ile gerçekleştirilebilir (Masoum, 1991) :

1. Adım : Bara gerilimi temel bileşen ve harmonik bileşenlerinin genlik ve faz açıları için tahmini başlangıç değerleri belirlenir (Genellikle tüm baraların temel bileşen gerilimleri için $V^{(1)} = 1$ pu ve $\delta^{(1)} = 0^\circ$, harmonik gerilimleri için $V^{(h)} = 0.1$ pu ve $\delta^{(h)} = 0^\circ$ kabul edilir).
2. Adım : Nonlinear yük akımları ($g_{r,m}^{(h)}$ ve $g_{i,m}^{(h)}$) hesaplanır.
3. Adım : (7.16) – (7.18) denklemleri ile ΔM matrisi elemanları hesaplanır. Eğer tüm matris elemanlarının mutlak değeri önceden belirlenen bir tolerans değerinden büyük ise 4. adıma geçilir, daha küçük ise iterasyonlara son verilir.
4. Adım : Jakobyen matrisi (J) hesaplanır ve (7.20) denklemine göre düzeltme matrisi hesaplanır.
5. Adım : (7.3) – (7.5) denklemleri ile bara gerilim matrisi değerleri güncelleştirilir. (ℓ iterasyon numarası olmak üzere, $[X]^{\ell+1} = [X]^\ell - [\Delta X]^\ell$ işlemi yapılır.)
6. Adım : 2. adıma geri dönülür.

7.3 Harmonik Güç Akışı ile Sürekli Hal Gerilim Kararlılık Analizi

Klasik yöntemlerle yapılan sürekli hal gerilim kararlılığında, lineer güç akış analizleri sonucu elde edilen değerler kullanılmaktadır. Nonlinear yük elemanlarının da sisteme dahil edilmesi durumunda sürekli hal gerilim kararlılık analizi yapabilmek için yeni bir algoritmanın geliştirilmesi gerekmektedir. Bölüm 2’de detaylı olarak verilen gerilim kararlılık analizi bu çalışmada geliştirilen metotla, harmonik güç akışından elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizin gerçekleştirilmesi için harmonik güç akış algoritması ile gerilim kararlılığı algoritmasının bir sentezi yapılmış ve yeni bir algoritma elde edilmiştir.

Örnek olarak ele alınan bir güç sisteminde gerilim kararlılığına harmoniklerin etkinliğini analiz etmek için, aynı güç sisteminde lineer ve nonlinear yüklerin olması durumları için bu

sistem, ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu analiz ve sentezleri yapabilmek için, lineer ve nonlineer yükler içeren güç sisteminde gerilim kararlılık analizi yapan ve bu çalışmanın da orijinalliklerinden biri olan bir program (EK 1'de verilmiştir) yazılmıştır. Bu program vasıtası ile, temel bileşen ve harmonikli bileşenler için gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerin bulunması gerçekleştirilmiştir.

Gerilim kararlılığına harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi için yapılan çalışmada, N baralı sistem 2 baralı sisteme indirgenerek incelemeler yapılmıştır. Bölüm 2'de ayrıntılı bir biçimde anlatılan temel ifadeler, algoritmaya uygun bir biçimde yeniden düzenlenmiştir.

Öncelikle, temel bileşen için gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen bara ve salınım barası dışında olan baralardaki temel bileşen aktif ve reaktif güçleri

$$\begin{aligned} R_m^{(1)} &= \frac{(V_m^{(1)})^2}{P_m^{(1)}} \\ X_m^{(1)} &= \frac{(V_m^{(1)})^2}{Q_m^{(1)}} \\ Y_m^{(1)} &= \left(\frac{1}{R_m^{(1)}} \right) + \left(\frac{1}{jX_m^{(1)}} \right) \end{aligned} \quad (7.27)$$

ifadeleri ile şönt admitanslara dönüştürülür. Burada $m=1$ 'den N 'e kadar bara numarasını göstermektedir. Elde edilen bu temel bileşen şönt admitansları, akım yönleri de gözönüne alınarak orijinal bara admitans matrisine katılarak yeni bara admitans matrisi oluşturulur.

Temel bileşen için oluşturulan yeni bara admitans matrisinde, gerilim kararlılığı açısından ilgilenilen bara 1. bara ve salınım barası 2. bara olacak biçimde düzenleme yapılır. Elde edilen son temel bileşen bara admitans matrisinde, ilgilenilen bara ve salınım barası hariç diğer bütün elemanlar, bu iki baraya matris cebri yöntemiyle indirgenir. En son temel bileşen bara admitans matrisi (Stevenson, 1988; Çakır, 1989)

$$Y_{\text{bara}}^{(1)} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & M \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

olarak ele alınırsa, 2×2 boyutuna indirgenen temel bileşen bara admitans matrisi

$$Y_{\text{bara}}^{(1)} (2 \times 2) = K - L.M^{-1}.L^T \quad (7.29)$$

olarak bulunur.

Böylelikle N baralı bir güç sistemi, radyal sisteme dönüştürülmüş olur. Temel bileşen bara admitans matrisinin nominal π devresinden türetilmiş bağlantı matrisi olduğu varsayılarak bu güç sistemi incelenmiştir. Aynı işlemler harmonikli bileşenler için, güç sistem elemanlarının harmonik modellemeleri gözönüne alınarak yapılır.

Kararlılık analizinde harmonik bileşenlerin bulunması sebebiyle sisteme modellenerek dahil edilecek elemanlar için yeni yaklaşımlar kullanılmıştır. Herhangi bir baranın sürekli hal gerilim kararlılığı incelenirken, nonlinear yükün bulunduğu barasında temel ve harmonik bileşenler için ayrı ayrı şönt admitanslara dönüştürülmesi gerekir. Bu durumda, nonlinear yükün temel bileşeni için indirgeme işlemi yukarıda anlatıldığı gibi yapılabilir. Fakat harmonikli bileşenlerde, nonlinear yük şebekeye akım enjekte eden bir akım kaynağı olarak modellendiğinden, bara admitans matrisine katılırken çok büyük değere sahip bir şönt admitansın (Y_h) gözönünde bulundurulması gerekir. Böylece, bu admitans (Y_h), nonlinear yükün harmonikli bileşenlerinin şönt admitanslara dönüştürülmesinde, yönü de dikkate alınarak hesaba katılır. Bu işlem

$$R_m^{(h)} = \frac{(V_m^{(h)})^2}{P_m^{(1)}}$$

$$X_m^{(h)} = \frac{(V_m^{(h)})^2}{Q_m^{(h)}} \quad (7.30)$$

$$Y_m^{(h)} = \left(\frac{1}{R_m^{(h)}} \right) + \left(\frac{1}{jX_m^{(h)}} \right) + (-jY_{h_m})$$

ifadeleri ile gerçekleştirilir. Burada $m=1$ 'den N 'e kadar bara numarasını göstermektedir. Harmonik güç akışından elde edilen veriler kullanılarak, temel ve harmonikli bileşenler için ayrı ayrı kritik değerlerin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Buna göre temel bileşen için kritik yük açısı,

$$K_1^{(1)} = a_1^{(1)}(b_2^{(1)} - b_1^{(1)} \tan \varphi^{(1)}) + a_2^{(1)}(b_1^{(1)} + b_2^{(1)} \tan \varphi^{(1)}) \quad (7.31)$$

$$K_2^{(1)} = a_1^{(1)}(b_1^{(1)} + b_2^{(1)} \tan \varphi^{(1)}) + a_2^{(1)}(-b_2^{(1)} + b_1^{(1)} \tan \varphi^{(1)}) \quad (7.32)$$

ifadeleri ile

$$\delta_{\text{kritik}}^{(1)} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{K_2^{(1)}}{K_1^{(1)}} \right) \quad (7.33)$$

olarak bulunur. Temel bileşen için kritik gerilim ve güç değerleri

$$K_3^{(1)} = b_1^{(1)} \cos \delta_{\text{kritik}}^{(1)} + b_2^{(1)} \sin \delta_{\text{kritik}}^{(1)} \quad (7.34)$$

$$K_4^{(1)} = a_1^{(1)} \cos \delta_{\text{kritik}}^{(1)} + a_2^{(1)} \sin \delta_{\text{kritik}}^{(1)} \quad (7.35)$$

ifadeleri kullanılarak

$$V_{\text{kritik}}^{(1)} = \frac{V_s^{(1)}}{2.K_4^{(1)}} \quad (7.36)$$

ve

$$P_{\text{kritik}}^{(1)} = \frac{(V_s^{(1)})^2 \cdot (2K_3^{(1)}K_4^{(1)} - (a_1^{(1)}b_1^{(1)} + a_2^{(1)}b_2^{(1)}))}{4.(K_4^{(1)})^2 \cdot ((b_1^{(1)})^2 + (b_2^{(1)})^2)} \quad (7.37)$$

elde edilir. Harmonikli bileşenler için kritik yük açısı,

$$\delta_{\text{kritik}}^{(h)} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{K_2^{(h)}}{K_1^{(h)}} \right) \quad (7.38)$$

olarak elde edilir. Kritik gerilim ve kritik gücü bulmak için $V_s^{(h)}$,

$$V_s^{(h)} = A^{(5)} \cdot V_r^{(h)} + B^{(5)} \cdot I_r^{(h)} \quad (7.39)$$

yeniden hesaplanmalıdır. Çünkü, harmonik akım bileşenleri akım kaynağı gibi modellendiğinden, şebekeye harmonik akım bileşenleri verecektir. Buna göre kritik gerilim ve kritik güç ifadeleri sırasıyla,

$$V_{\text{kritik}}^{(h)} = \frac{V_r^{(h)}}{2.K_4^{(h)}} \quad (7.40)$$

$$P_{\text{kritik}}^{(h)} = \frac{(V_s^{(h)})^2 \cdot (2K_3^{(h)}K_4^{(h)} - (a_1^{(h)}b_1^{(h)} + a_2^{(h)}b_2^{(h)}))}{4.(K_4^{(h)})^2 \cdot ((b_1^{(h)})^2 + (b_2^{(h)})^2)} \quad (7.41)$$

denklemlerinden hesaplanabilir.

Tristör kontrollü reaktör de, geliştirilen algoritmaya uygun bir biçimde modellenmiştir. Beşinci bölümde ayrıntılı bir biçimde anlatılan sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatörler nonlineer karakteristiğe sahiptirler ve harmonik üretirler. Literatürde TCR'lerin genellikle geçici kararlılık analizleri yapılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen harmonik içeren sistemlerde sürekli hal gerilim kararlılık analizi, radyal ve 4 baralı bir sisteme bağlı TCR için de yapılmıştır.

Tristör kontrollü reaktörün akım ifadesi Bohmann'ın 1989 yılındaki makalesinden yararlanılarak

$$I_r^{(h)} = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_r^{(h)}}{jhX_r^{(1)}} (e^{jh\delta_r^{(h)}} - e^{jh(\frac{\pi-\sigma}{2})}) \quad (7.42)$$

biçiminde elde edilmiştir. Burada reaktör uç gerilimi V_r , açısı δ_r , tristörün iletim açısı σ , temel frekanstaki reaktörün reaktansı X_r ve harmonik mertebesi h olarak alınmıştır. Eşitlik (7.42)'de gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$I_r^{(h)} = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_r^{(h)}}{hX_r^{(1)}} \left\{ \cos(h\delta_r^{(h)}) - \cos(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) + j \left[\sin(h\delta_r^{(h)}) - \sin(h(\frac{\pi-\sigma}{2})) \right] \right\} \quad (7.43)$$

olarak bulunur. Ayrıca, tristörün iletim açısına (σ) bağlı reaktörün admitansı (Bohmann ve Lasseter, 1986)

$$Y_r^{(h)}(\sigma) = -j \frac{\sigma - \frac{\sin(h\sigma)}{h}}{hX_r^{(1)}\pi} \quad (7.44)$$

eşitliği ve FC-TCR'nin kapasite reaktansı kullanılarak eşdeğer süseptans,

$$B^{(h)}(\sigma) = (Y_r^{(h)}(\sigma) - \frac{1}{X_c^{(h)}}) \quad (7.45)$$

olarak bulunur ve $h = 1$ alınarak, FC-TCR'nin temel bileşen için reaktif güç ifadesi,

$$Q_m^{(1)} = V_m^{(1)} \cdot B^{(1)}(\sigma) \quad (7.46)$$

elde edilir. Burada $m=1$ 'den N 'e kadar bara numarasını göstermektedir. Bütün bu tanım ve ifadelerin kullanılması ile gerilim kararlılık analizi yapılabilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen nonlineer yükler içeren dengeli sistemlerin gerilim kararlılık analizi, geliştirilen şu çözüm algoritması ile yapılmıştır:

1. Adım : Örnek sistemin mevcut işletme durumu için harmonik güç akış analizi yapılarak, örnek sistem baralarına ait yük açıları, gerilimleri ve güçleri hesaplanır.
2. Adım : Gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara ve salınım barası hariç bütün baralardaki güçler, harmonik güç akışından elde edilen bara gerilimleri yardımıyla şönt admitanslara, temel ve harmonikli bileşenler için ayrı ayrı dönüştürülürler.
3. Adım : Elde edilen şönt admitanslar, akım yönleri de dikkate alınarak bara admitans matrisine katılırlar (Bu işlemler gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara ve salınım barası için yapılmaz).
4. Adım : Yeni bara admitans matrisi elde edildikten sonra, gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen bara elemanları 1. satır ve 1. sütunda, salınım barasına karşılık gelen elemanlarda 2. satır ve 2. sütunda olacak şekilde düzenlemeler yapılır.
5. Adım : Elde edilen (temel ve harmonik bileşenler için) bara admitans matrislerinde, ilgilenilen bara ve salınım barası hariç diğer bütün baralardaki elemanlar, bu iki baraya matris cebri yöntemiyle indirgenir. Son olarak elde edilen bara admitans matrislerinde düzenlemeler yapıldıktan sonra, matris indirgeme işlemleri uygulanarak 2×2 'lik en son indirgenmiş matris elde edilir.
6. Adım : Elde edilen iki baralı (radyal) sistem için, harmonik güç akışında hesaplanan

jakobyen matrisinin tekiliğinden (ıraksama noktalarından) yararlanarak, temel ve harmonik bileşenler için ayrı ayrı kritik yük açısı, kritik gerilim, kritik güç değerleri ve harmonik distorsiyon oranları bulunur. Böylece gerilim kararlılığı incelenen baranın kritik değerleri harmonik bileşenlerde gözönünde bulundurularak hesaplanmış olur. Ayrıca, sisteme FC-TCR bağlanması durumlarında, farklı işletim durumlarına göre güç sisteminin kararlılığının nasıl etkilendiği ve reaktif güç değerleri belirlenmiş olur.



8. SAYISAL UYGULAMALAR

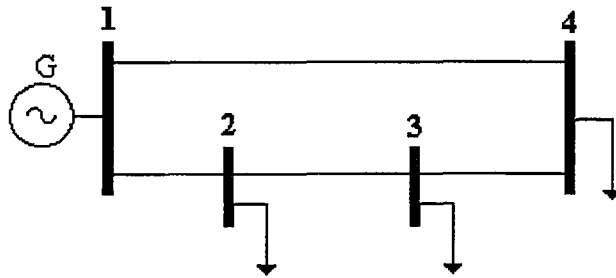
Nonlinear karakteristiğe sahip elemanların güç sistem gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini incelemek için dört sayısal uygulama yapılmıştır. Sürekli hal gerilim kararlılık analizlerinin yapıldığı bu sayısal uygulamalar, gözönüne alınan örnek sistemlerde şu yük durumları için gerçekleştirilmiştir:

- İlk sayısal uygulamada, lineer ve nonlinear yük durumlarında,
- İkinci sayısal uygulamada, radyal bir sisteme nonlinear eleman olarak sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatorü bağlı olması durumunda,
- Üçüncü sayısal uygulamada, birinci uygulamadaki örnek sisteme FC-TCR içeren statik VAR kompanzatorü bağlı olması halinde,
- Dördüncü sayısal uygulamada, üçüncü uygulamadaki örnek güç sistemine ilave olarak statik yüklerinde bulunması durumunda.

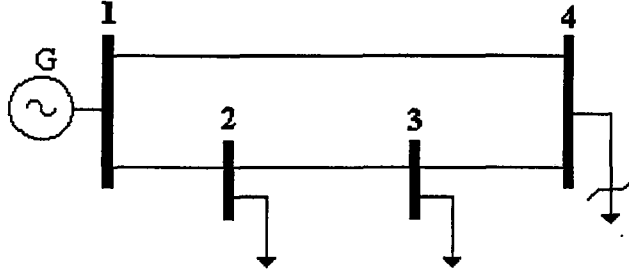
8.1 Sayısal Uygulama 1

Daha önceki bölümlerde ortaya konulan üç fazlı dengeli elektrik güç sistemlerinde lineer ve harmonik (nonlinear) güç akış analizine dayalı gerilim kararlılık analizini gerçekleştirmek için üç fazlı bir örnek sistem gözönüne alınmıştır.

Sayısal uygulamanın yapıldığı örnek sisteme ait tek hat şeması, lineer güç akışı için Şekil 8.1'de ve nonlinear güç akışı için ise Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8.1 Sadece lineer yükler içeren örnek güç sistemi



Şekil 8.2 Lineer ve nonlinear yükler içeren örnek güç sistemi

66 kV ve 10 MVA baz alınarak hatların karakteristik değerleri Çizelge 8.1'de ve baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri de Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Hatların karakteristik değerleri

Hat No	Bara No	Bara No	Z (pu)	Y (pu)
1	1	2	$0.01 + j0.01$	$j2.1125e-4$
2	2	3	$0.02 + j0.08$	$j8.4500e-4$
3	3	4	$0.01 + j0.02$	$j4.2250e-4$
4	1	4	$0.01 + j0.02$	$j4.2250e-4$

Çizelge 8.2 Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri

Bara No	$P_{yük}$ (pu)	$Q_{yük}$ (pu)
1	0.00	0.00
2	0.10	0.10
3	0.00	0.00
4	0.25	0.10

Örnek sistem olarak aldığımız 4 baralı sistemde, hat uzunlukları orta iletim uzunluğunda olduğundan nominal- π eşdeğer devresi ile modellenerek lineer ve nonlinear güç akışına dayalı sürekli hal gerilim kararlılık analizi yapılmıştır. Gerilim kararlılığı analizi çalışmasında salınım barası olarak 1 nolu bara seçilmiştir. Geliştirilen sürekli hal gerilim kararlılığı analizi sonucunda harmoniklerin, gerilim kararlılığı açısından etkinliği incelenmiştir. Bu analizde, örnek güç sisteminin 4 nolu barasında lineer ve nonlinear yük olması durumu ele alınmış ve

nonlinear yükün çeşitli yüklenme durumlarında kritik değerlerin değişimi ile nonlinear yükten gerilim kararlılığı bakımından en çok hangi baraların etkilendiği belirlenmiştir.

Nonlinear yükün değişik yüklenme durumu için sistemdeki 5. harmoniğe ait nonlinear yük akımının aktif ve reaktif bileşenleri sırasıyla,

$$g_{r,4}^{(5)} = k[(V_4^{(1)})^3 \cos(3\delta_4^{(1)}) + (V_4^{(5)})^3 \cos(3\delta_4^{(5)})] \quad (8.1)$$

$$g_{i,4}^{(5)} = k[(V_4^{(1)})^3 \sin(3\delta_4^{(1)}) + (V_4^{(5)})^3 \sin(3\delta_4^{(5)})] \quad (8.2)$$

ifadeleri ile verilebilir (Masoum, 1991). Bu ifadelerdeki nonlinear akım katsayısı (k) için çeşitli değerler verilerek nonlinear yük akımı değiştirilmiştir.

Nonlinear akım katsayısı $k = 0.3$ olması halinde yapılan gerilim kararlılığı analizi sonucu elde edilen kritik değerler (kritik açı δ_{kritik} , kritik gerilim V_{kritik} ve kritik güç P_{kritik}), Çizelge 8.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.3 Örnek güç sisteminin gerilim kararlılık analizi sonuçları

Gerilim kararlılığı incelenen bara no	Bileşen	Güç akışı cinsi	δ_{kritik} (rad)	V_{kritik} (pu)	P_{kritik} (pu)
4	Temel	Lineer	0.3725	0.5345	14.1168
4	Temel	Nonlinear	0.3603	0.5319	13.8403
	5. Harmonik		0.0002	0.0126	0.0002
2	Temel	Lineer	0.0229	0.4986	13.6913
2	Temel	Nonlinear	0.0229	0.4986	13.6907
	5. Harmonik		0.4079	0.0013	0.0000

Nonlinear akım katsayısı k 'nın değişik değerleri için gerilim kararlılığı incelenen 4 ve 2 nolu baraların, gerilim için tekil harmonik distorsiyon (HD_V) oranları yüzde olarak Çizelge 8.4'de verilmiştir.

Nonlinear yük akımının değerinin değişimini veren $g_{r,4}^{(5)}$ ve $g_{i,4}^{(5)}$ nonlinear yük akımlarının, k katsayısına bağlı olarak değiştirilmesiyle 4 nolu bara için elde edilen sonuçlar, Çizelge 8.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.4 Gerilim kararlılığı açısından incelenen baraların gerilim için tekil harmonik distorsiyon oranları

k, nonlinear akım katsayısı	4. bara için HD _v (%)	2. bara için HD _v (%)
0.1	0.8487	0.0828
0.2	1.6970	0.1655
0.3	2.5442	0.2482
0.4	3.3899	0.3306
0.5	4.2335	0.4129
0.6	5.0747	0.4948
0.7	5.9128	0.5764
0.8	6.7475	0.6577
0.9	7.5782	0.7385
1.0	8.4046	0.8188
1.5	12.4570	1.2117

Çizelge 8.5 Örnek güç sistemde 4 nolu baranın gerilim kararlılık analizi sonuçları

k, nonlinear akım katsayısı	Bileşen	Güç akışı cinsi	δ_{kritik} (rad)	V _{kritik} (pu)	P _{kritik} (pu)
0.0	Temel	Lineer	0.3725	0.5345	14.1168
0.1	Temel	Nonlineer	0.3711	0.5342	14.0857
	5. Harmonik		0.0002	0.0042	0.0000
0.2	Temel		0.3670	0.5333	13.9929
	5. Harmonik		0.0002	0.0084	0.0001
0.3	Temel		0.3603	0.5319	13.8403
	5. Harmonik		0.0002	0.0126	0.0002
0.4	Temel		0.3510	0.5301	13.6312
	5. Harmonik		0.0002	0.0167	0.0003
0.5	Temel		0.3395	0.5278	13.3699
	5. Harmonik		0.0002	0.0209	0.0005
0.6	Temel		0.3258	0.5252	13.0619
	5. Harmonik		0.0002	0.0250	0.0007
0.7	Temel	0.3103	0.5224	12.7133	
	5. Harmonik	0.0002	0.0292	0.0010	
0.8	Temel	0.2934	0.5196	12.3313	
	5. Harmonik	0.0002	0.0333	0.0012	
0.9	Temel	0.2752	0.5167	11.9231	
	5. Harmonik	0.0002	0.0374	0.0016	
1.0	Temel	0.2563	0.5139	11.4962	
	5. Harmonik	0.0002	0.0414	0.0019	
1.5	Temel	0.1600	0.5027	9.3151	
	5. Harmonik	0.0002	0.0613	0.0042	

Aynı şekilde, nonlinear yük akımlarının k katsayısına bağlı olarak değiştirilmesiyle 2 nolu bara için elde edilen sonuçlar Çizelge 8.6'da gösterilmiştir.

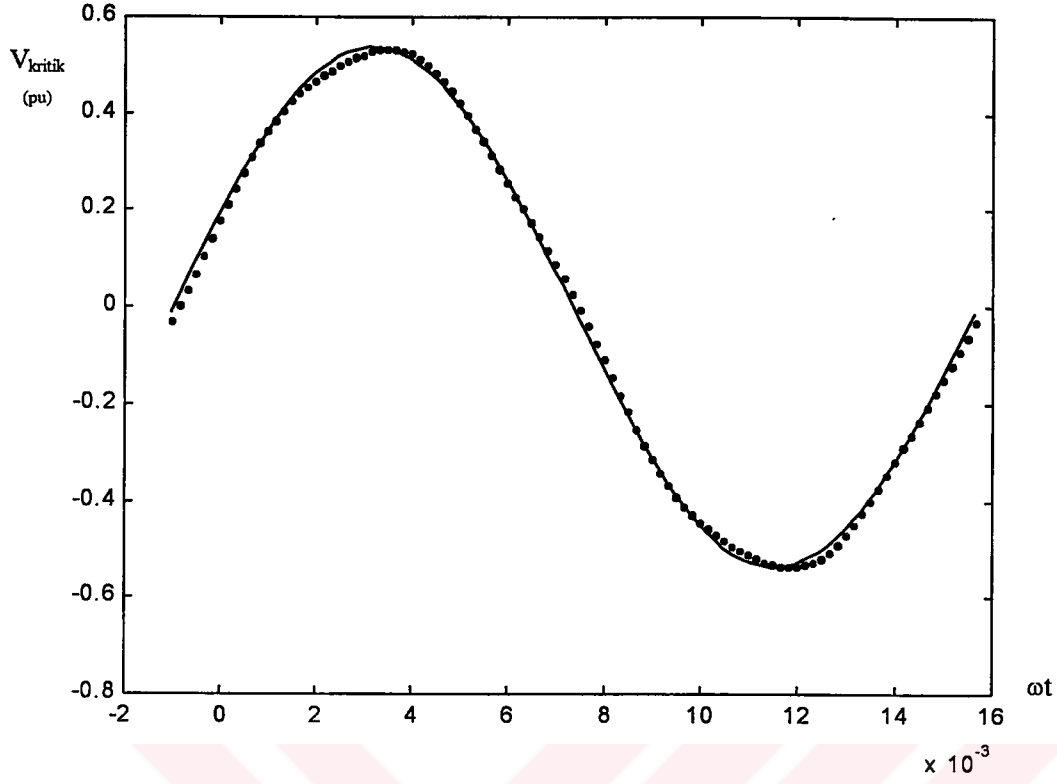
Çizelge 8.6 Örnek güç sistemde 2 nolu baranın gerilim kararlılık analizi sonuçları

k, nonlinear akım katsayısı	Bileşen	Güç akışı cinsi	δ_{kritik} (rad)	V_{kritik} (pu)	P_{kritik} (pu)
0.0	Temel	Lineer	0.0229	0.4986	13.6913
0.1	Temel	Nonlinear	0.0229	0.4986	13.6912
	5. Harmonik		0.4080	0.0004	0.0000
0.2	Temel		0.0229	0.4986	13.6910
	5. Harmonik		0.4079	0.0009	0.0000
0.3	Temel		0.0229	0.4986	13.6907
	5. Harmonik		0.4078	0.0013	0.0000
0.4	Temel		0.0229	0.4986	13.6902
	5. Harmonik		0.4077	0.0018	0.0001
0.5	Temel		0.0229	0.4986	13.6895
	5. Harmonik		0.4076	0.0022	0.0001
0.6	Temel		0.0229	0.4986	13.6888
	5. Harmonik		0.4074	0.0027	0.0001
0.7	Temel		0.0228	0.4986	13.6879
	5. Harmonik		0.4073	0.0031	0.0002
0.8	Temel	0.0228	0.4986	13.6868	
	5. Harmonik	0.4070	0.0036	0.0002	
0.9	Temel	0.0228	0.4985	13.6856	
	5. Harmonik	0.4068	0.0040	0.0003	
1.0	Temel	0.0228	0.4985	13.6843	
	5. Harmonik	0.4065	0.0044	0.0004	
1.5	Temel	0.0226	0.4984	13.6760	
	5. Harmonik	0.4047	0.0066	0.0008	

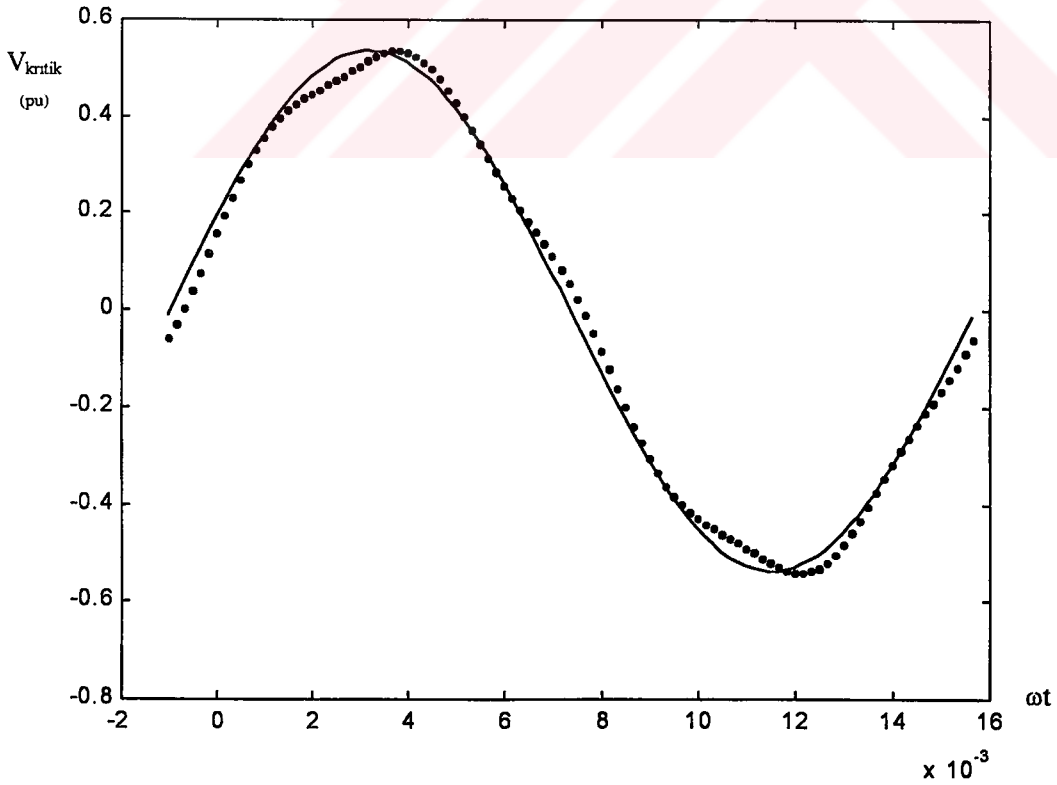
Sonuçlardan da görüldüğü gibi, sürekli hal gerilim kararlılık analizinde, yükün bulunduğu bara önemli olmaktadır. Nonlinear yükün bulunduğu barada harmonikler kararlılığı büyük bir oranda etkilemektedirler. Bunun yanısıra diğer baralarda bu ölçüde bir etkilenmenin olmadığı görülmüştür.

Bu sayısal uygulamada, lineer ve nonlinear güç akışlarına dayalı olarak yapılan sürekli hal gerilim kararlılık analizi sonucu elde edilen 4 nolu baradaki kritik gerilim değerlerinin frekans domeninde, k'ya bağlı değişimleri Şekil 8.3 - Şekil 8.6 'da verilmiştir.

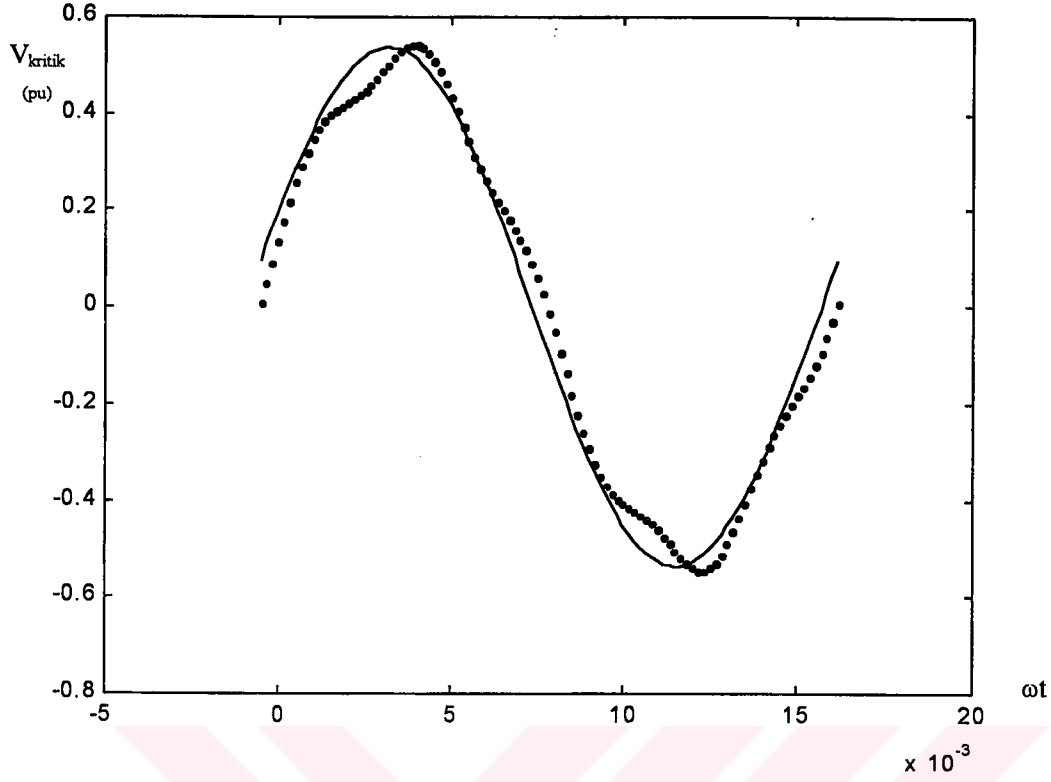
Ayrıca 2 nolu baradaki kritik gerilim değerlerinin frekans domenindeki k'ya bağlı değişimleri Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'de verilmiştir. Burada harmonikler dikkate alınmadan yapılan analizlerin sonucu "-" biçiminde ve sadece 5. harmonik bileşeni dikkate alınarak yapılan analizlerin sonucu da "•" biçiminde gösterilmiştir.



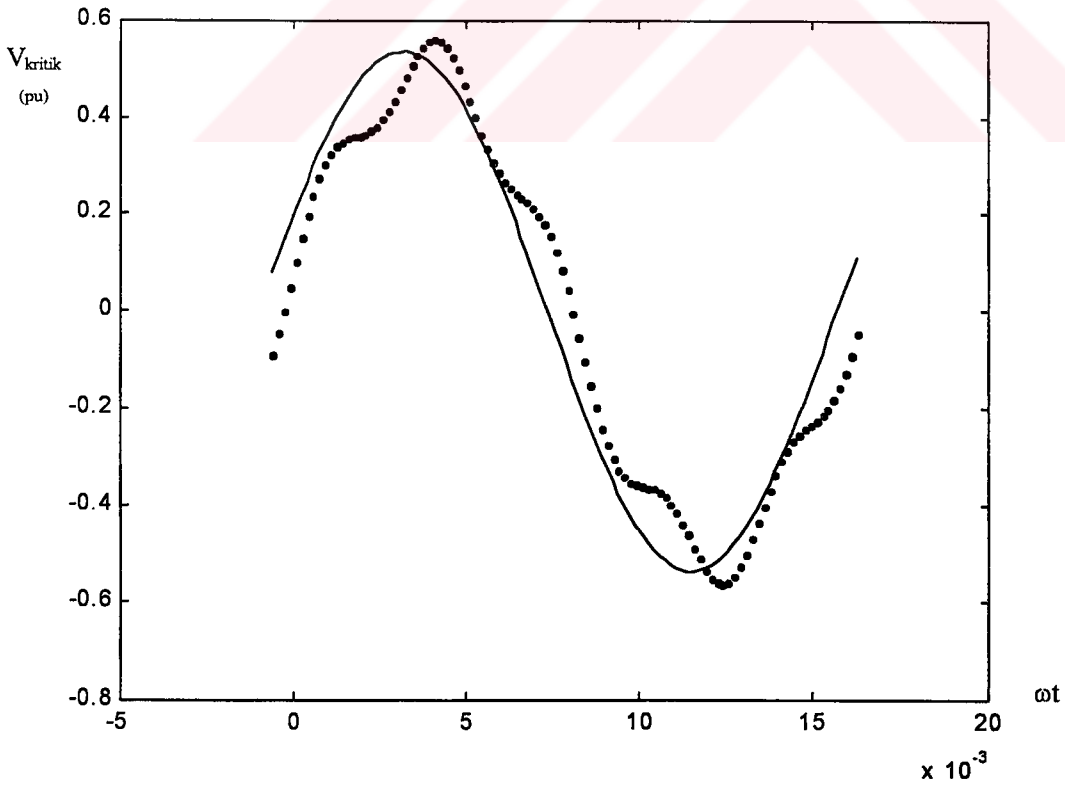
Şekil 8.3 Harmonikli ($k = 0.3$) ve harmoniksiz durumlarda elde edilen 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi



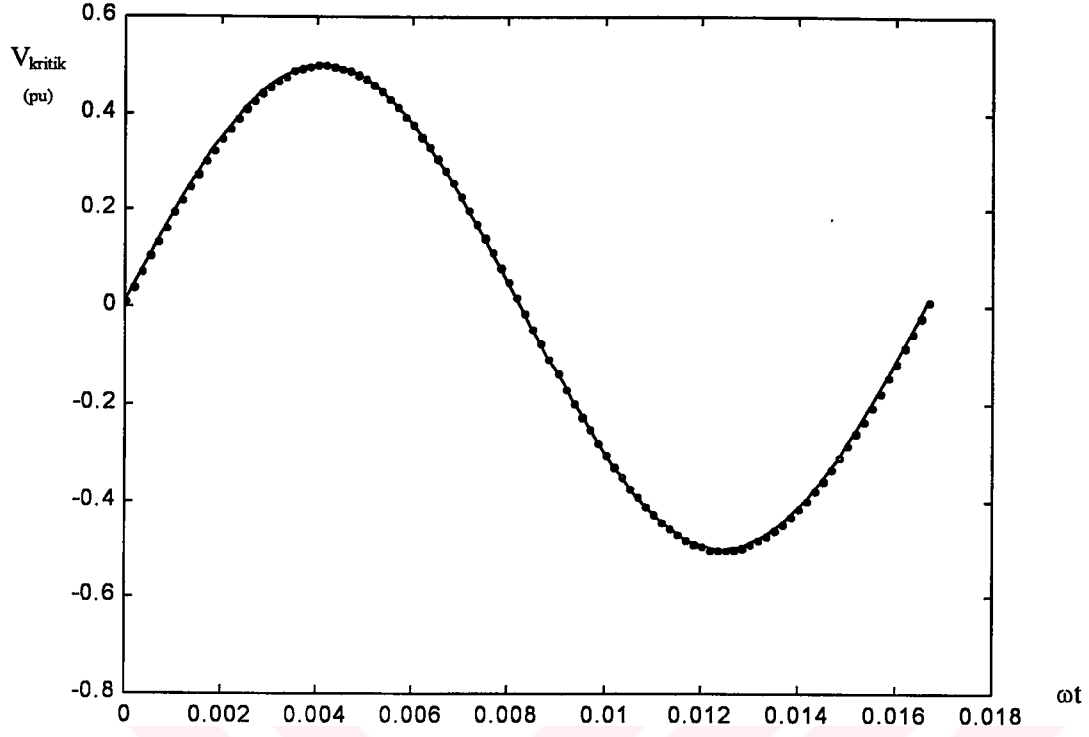
Şekil 8.4 Harmonikli ($k = 0.6$) ve harmoniksiz durumlarda 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi



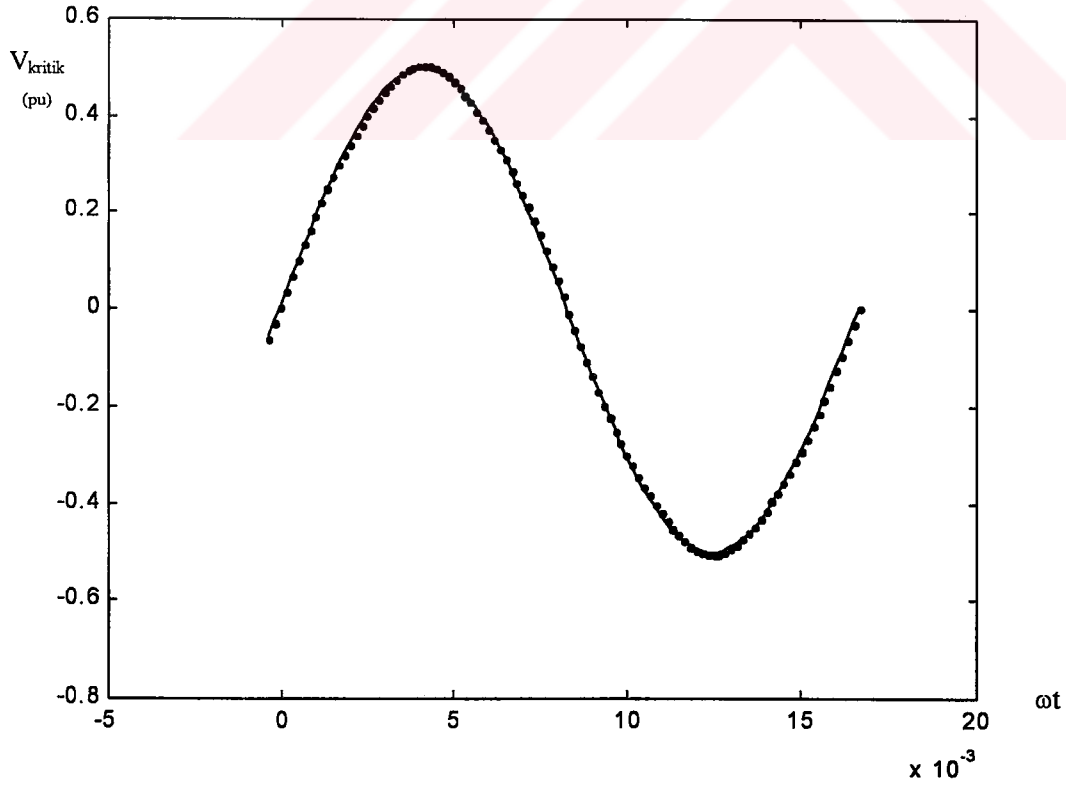
Şekil 8.5 Harmonikli ($k = 0.9$) ve harmoniksiz durumlarda 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi



Şekil 8.6 Harmonikli ($k = 1.5$) ve harmoniksiz durumlarda 4 nolu baranın kritik gerilim değişimi



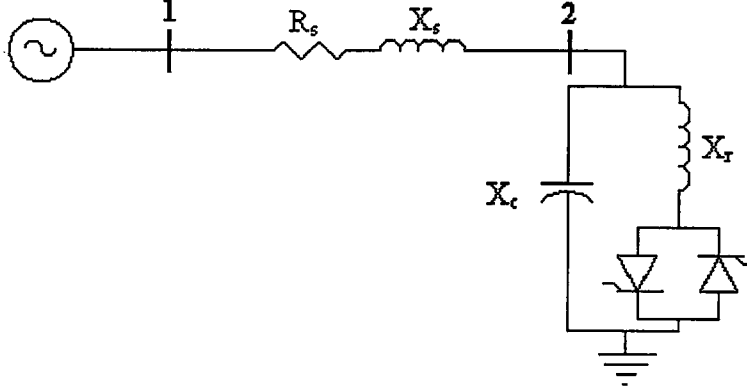
Şekil 8.7 Harmonikli ($k = 0.3$) ve harmoniksiz durumlarda 2 nolu baranın kritik gerilim değişimi



Şekil 8.8 Harmonikli ($k = 1.5$) ve harmoniksiz durumlarda 2 nolu baranın kritik gerilim değişimi

8.2 Sayısal Uygulama 2

Sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren iki baralı bir sistem için geliştirilen sürekli hal kararlılık analizi, farklı işletim durumları için gerçekleştirilmiştir. Sayısal uygulamanın yapıldığı örnek sistem Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



Şekil 8.9 FC-TCR içeren örnek sistem

Örnek sistemdeki 2 nolu barada reaktif güç kompanzasyon amaçlı bir sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör bulunmaktadır. TCR'nin temel bileşen reaktif gücü,

$$Q_2^{(1)} = V_2^{(1)} \cdot B^{(1)}(\sigma) \quad (8.3)$$

ifadesinden bulunur. Buradaki temel bileşen eşdeğer süseptansı

$$B^{(1)}(\sigma) = \left(\frac{1}{X_r^{(1)}(\sigma)} - \frac{1}{X_c} \right) \quad (8.4)$$

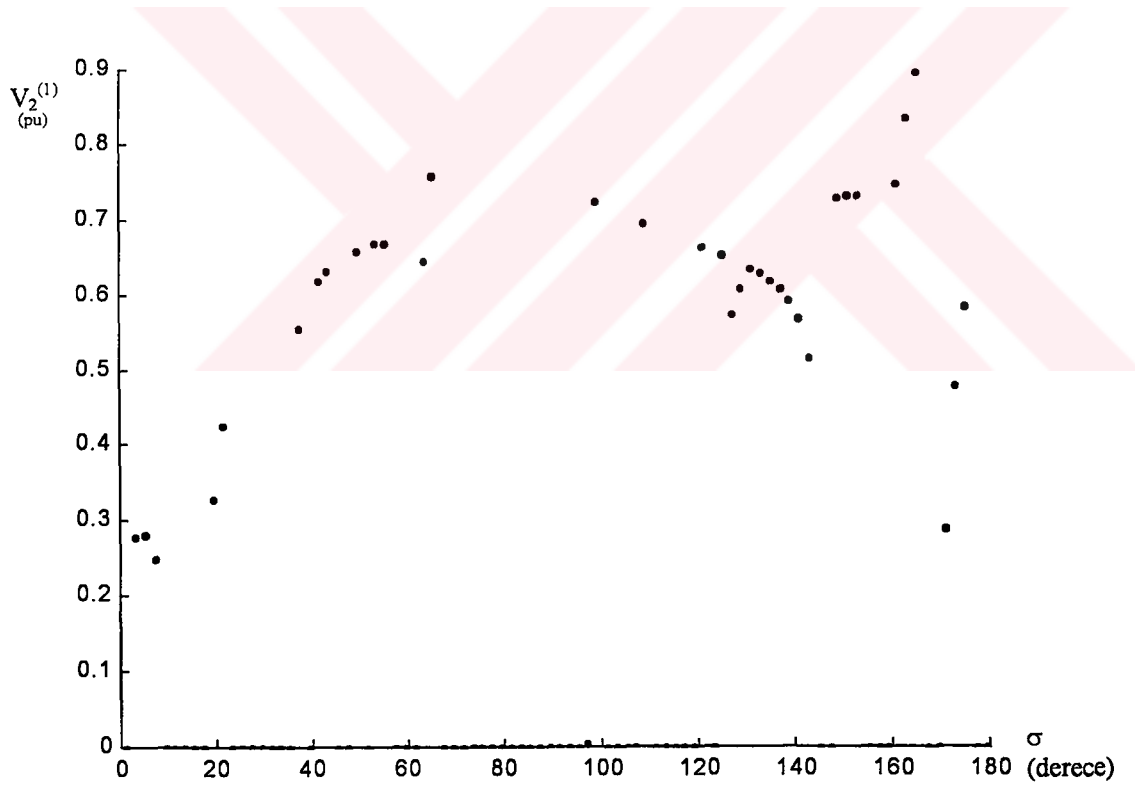
iletim açısına bağlı olarak hesaplanır. TCR, nonlineer karakteristiğe sahip olduğundan 5. harmoniğe ait nonlineer akımın reel ve imajiner bileşenleri sırasıyla,

$$g_{r,2}^{(5)} = \frac{V_2^{(1)}}{X_r} \left[\cos \delta_2^{(1)} - \cos\left(\frac{\pi - \sigma}{2}\right) \right] + \frac{V_2^{(5)}}{5 \cdot X_r} \left[\cos(5 \cdot \delta_2^{(1)}) - \cos\left(5 \cdot \left(\frac{\pi - \sigma}{2}\right)\right) \right] \quad (8.5)$$

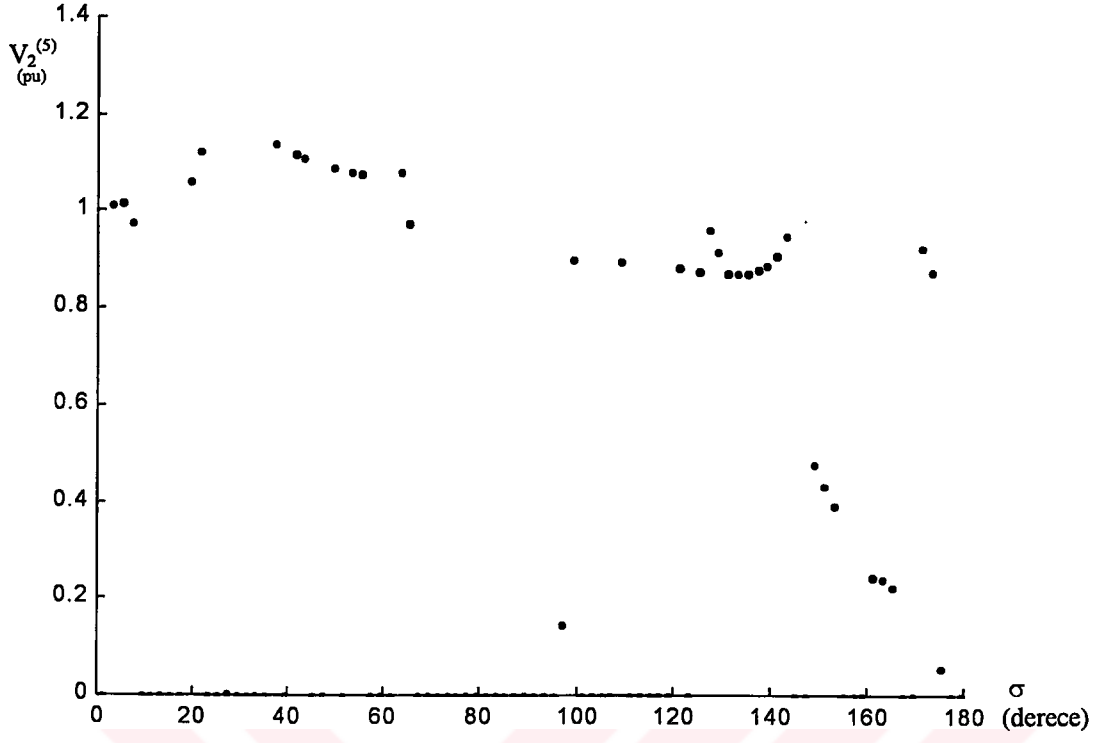
$$g_{i,2}^{(5)} = \frac{V_2^{(1)}}{X_r} \left[\sin \delta_2^{(1)} - \sin\left(\frac{\pi - \sigma}{2}\right) \right] + \frac{V_2^{(5)}}{5 \cdot X_r} \left[\sin(5 \cdot \delta_2^{(1)}) - \sin\left(5 \cdot \left(\frac{\pi - \sigma}{2}\right)\right) \right] \quad (8.6)$$

olarak alınmış ve sürekli hal gerilim kararlılığı analizi yapılmıştır. Sayısal uygulamada sisteme ait elemanların değerleri şöyledir; Reaktörün reaktansı $X_r = 0.2$ pu, kapasite reaktansı $X_c = 2$ pu, sistem direnci $R_s = 0.01$ pu, sistem reaktansı $X_s = 0.1$ pu olarak alınmıştır. Burada iletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerleri için sistemin kararlılığı incelenmiştir.

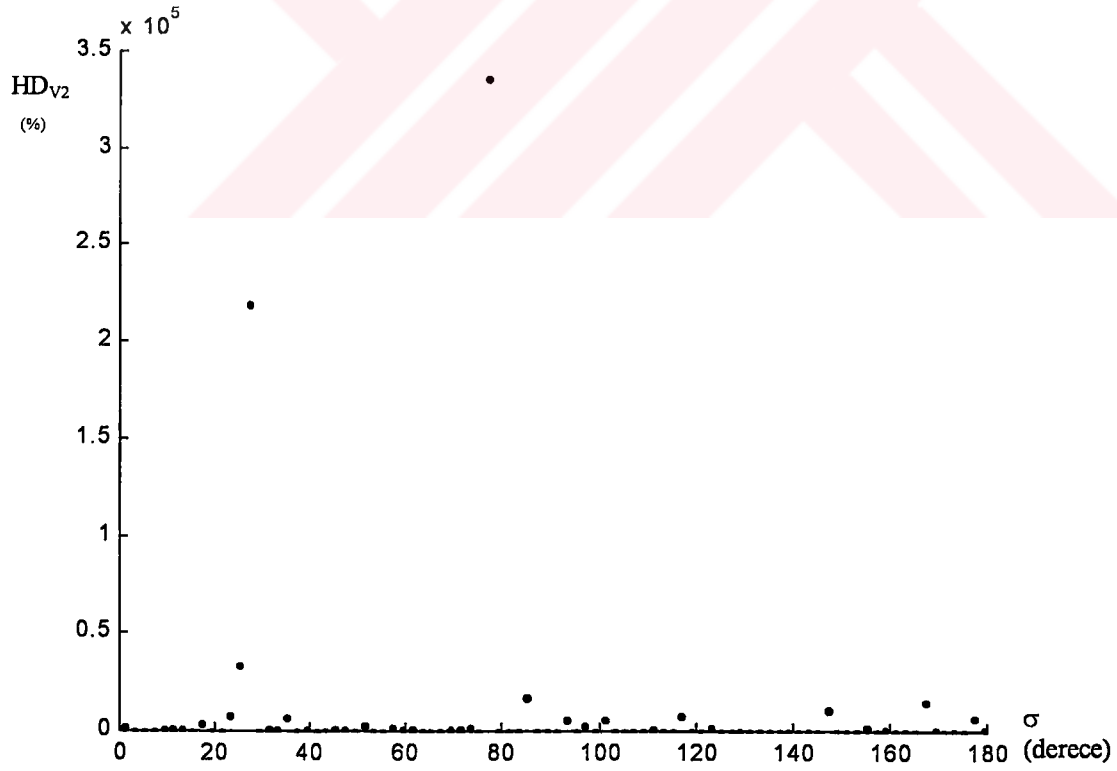
Daha önce yapılan çalışmalarda (Uzunoğlu vd., 1999) geçici kararlılık analizi için TCR'nin iletim açısı σ 'nın belli değerlerinde kararsızlıkların olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen algoritma ile yapılan analiz sonucunda σ 'nın belli değerleri için jakobyen matrisin tekilliğe ulaştığı ve sistemi kararsızlaştırdığı görülmüştür. Örnek sistem için σ 'nın 0° ila 180° arasındaki işletim durumlarında, 2 nolu baranın temel gerilim bileşeni ($V_2^{(1)}$), 5. harmonik gerilim bileşeni ($V_2^{(5)}$), gerilim için tekil harmonik distorsiyonu (HD_{V2}) ve reaktif güç (Q_2) değişimleri, Şekil 8.10 – Şekil 8.13'de verilmiştir.



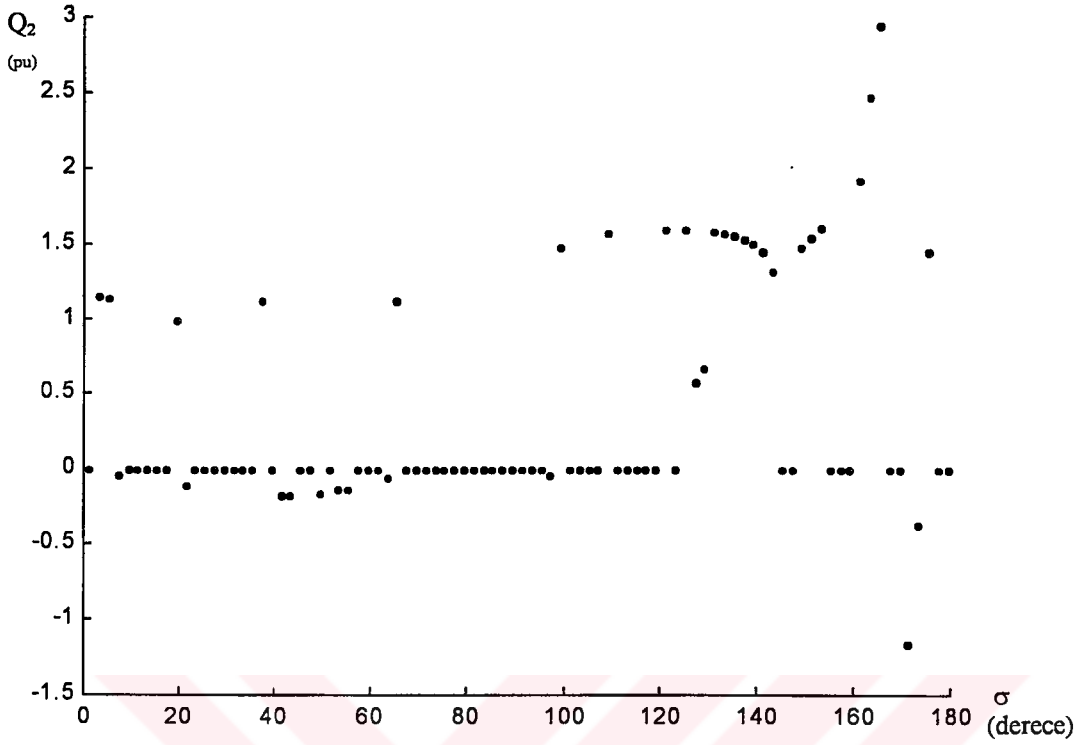
Şekil 8.10 $V_2^{(1)}$ 'in σ 'ya göre değişimi



Şekil 8.11 $V_2^{(5)}$ 'in σ 'ya göre değişimi



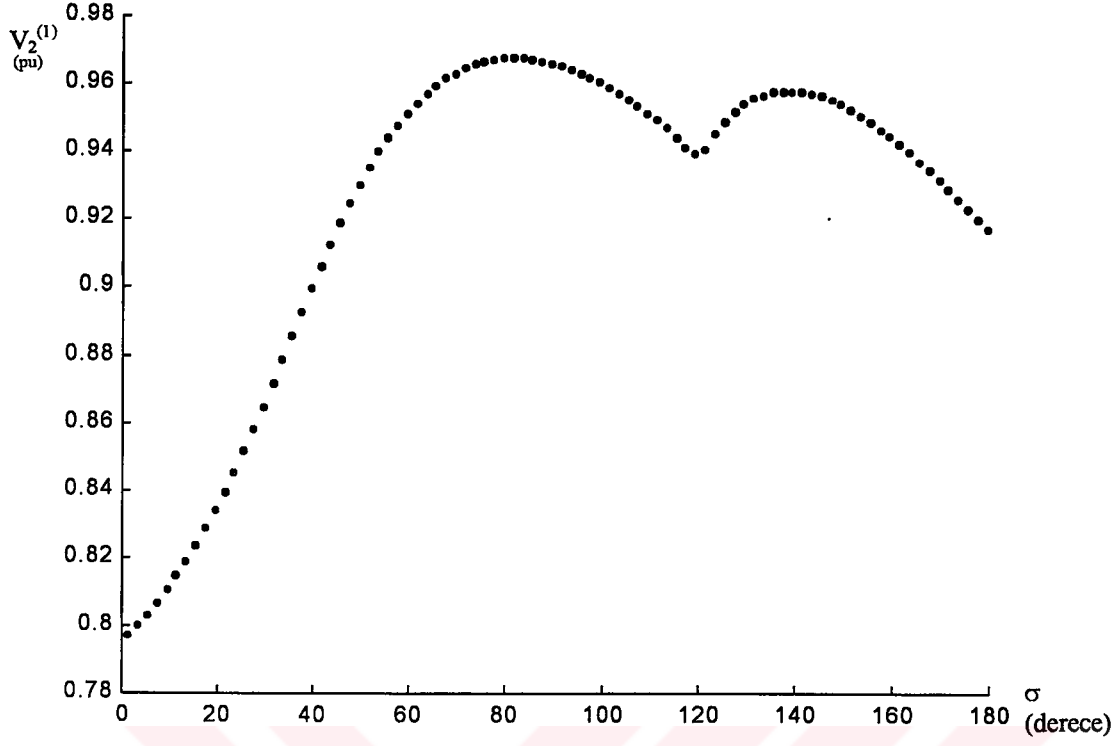
Şekil 8.12 HD_{V2} 'nin σ 'ya göre değişimi



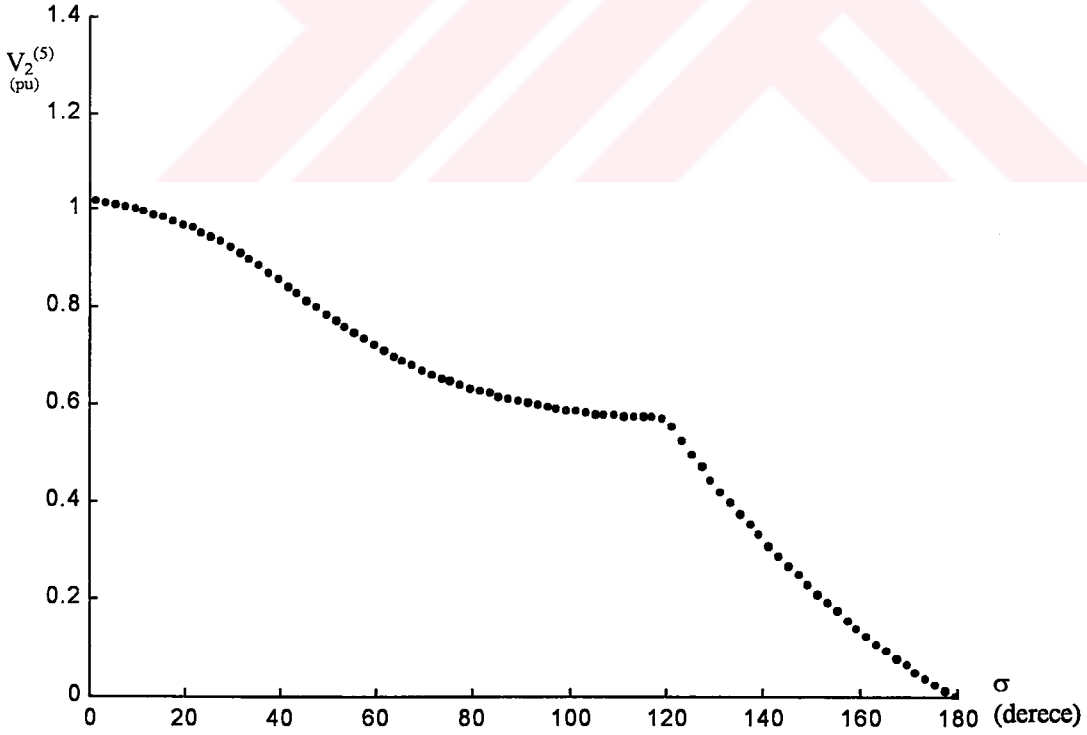
Şekil 8.13 Q_2 'nin σ 'ya göre değişimi

Aynı örnek sistem için farklı değerlerdeki parametrelerin olması durumunda iletim açısının bütün değerleri için kararlı bir işletim tespit edelim (Uzunoglu vd., 1999). Bu sayısal uygulamada da sistemdeki veriler $X_r = 0.9$ pu, $X_c = 2$ pu, $R_s = 0.01$ pu ve $X_s = 0.15$ pu olarak alınmaktadır. Burada, yazılan bilgisayar programını kullanarak yapılan gerilim kararlılığı analizinde kararsız işletim noktalarına rastlanmamıştır, yani jakobyen matrisi herhangi bir σ değerinde tekil olmamıştır.

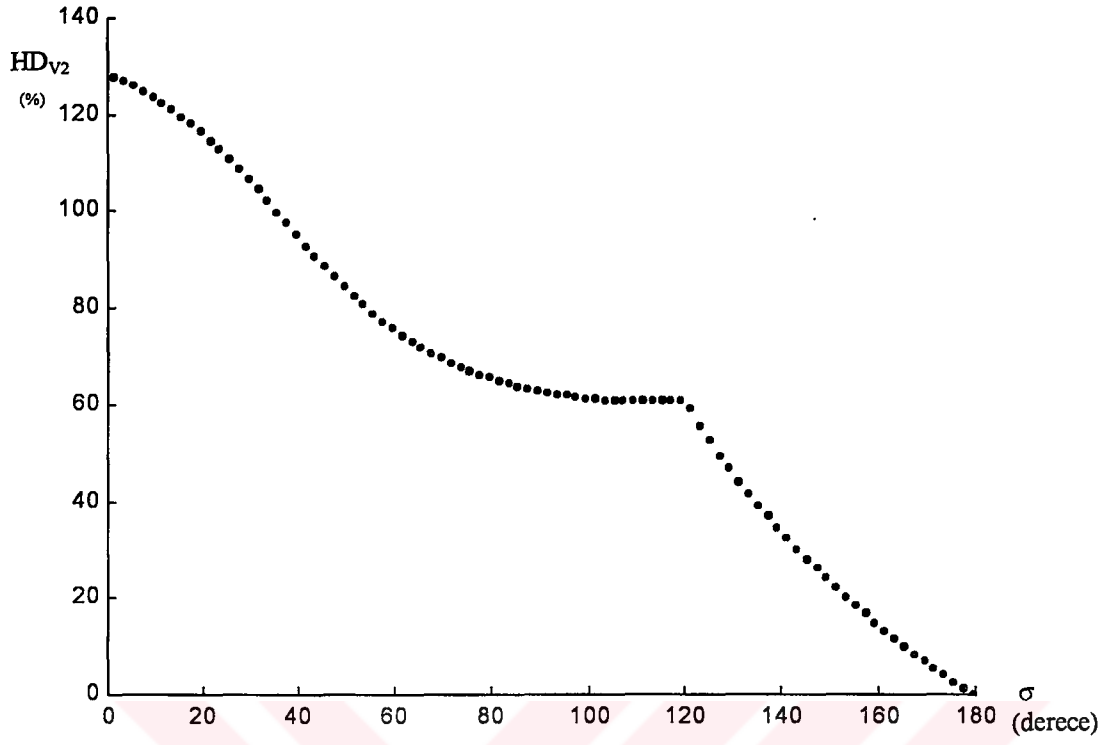
İletim açısının σ 'nın 0° ila 180° arasındaki işletim durumlarında, 2 nolu baranın temel gerilim bileşeni ($V_2^{(1)}$), 5. harmonik gerilim bileşeni ($V_2^{(5)}$), gerilim için tekil harmonik distorsiyonu (HD_{V_2}) ve reaktif güç (Q_2) değişimleri, Şekil 8.14 – Şekil 8.17'de verilmiştir.



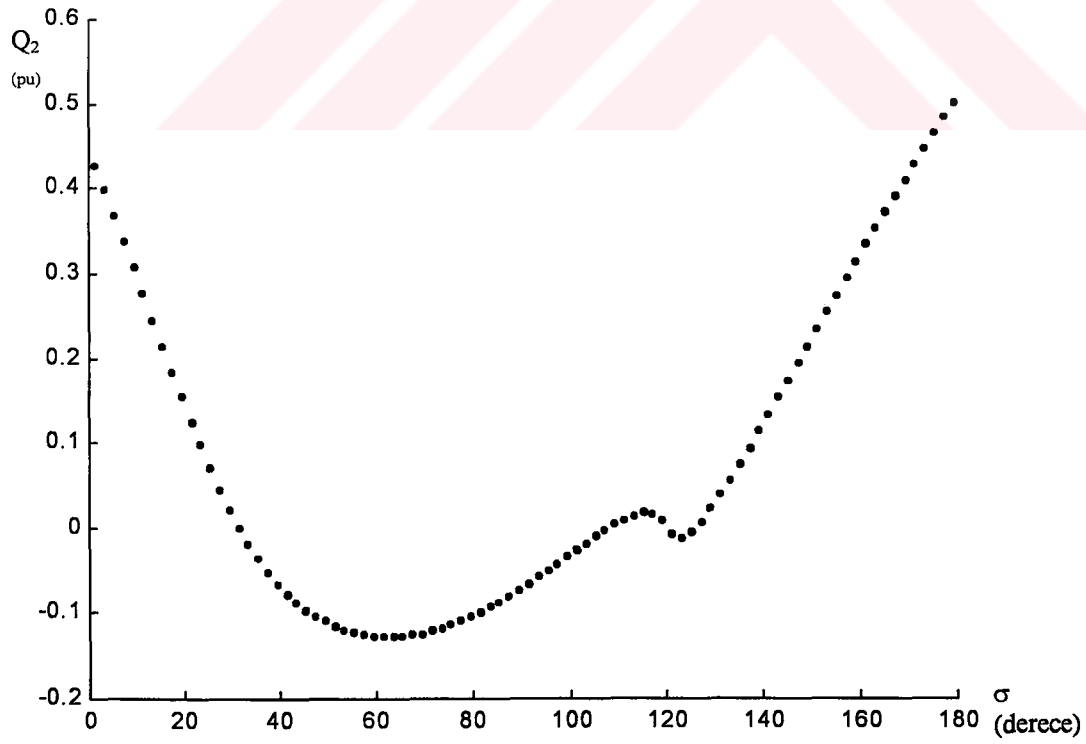
Şekil 8.14 $V_2^{(1)}$ 'in σ 'ya göre değişimi



Şekil 8.15 $V_2^{(5)}$ 'in σ 'ya göre değişimi



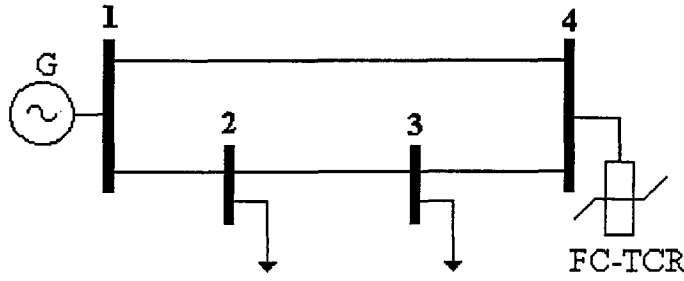
Şekil 8.16 HD_{v2} 'nin σ 'ya göre değişimi



Şekil 8.17 Q_2 'nin σ 'ya göre değişimi

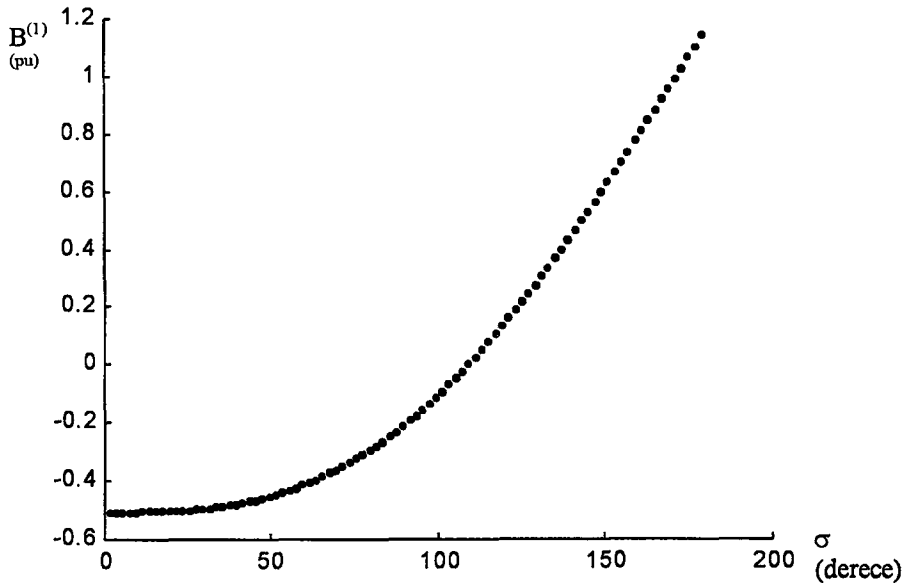
8.3 Sayısal Uygulama 3

Bu uygulamada nonlinear eleman olarak sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) kullanılmış ve buna ait örnek sistem Şekil 8.18’de verilmiştir (sayısal uygulama 1’de ele alınan örnek 4 baralı güç sisteminde, 4 nolu baradaki nonlinear yük yerine, nonlinear karakteristiğe sahip FC-TCR kullanılmıştır).



Şekil 8.18 FC-TCR içeren 4 baralı örnek güç sistemi

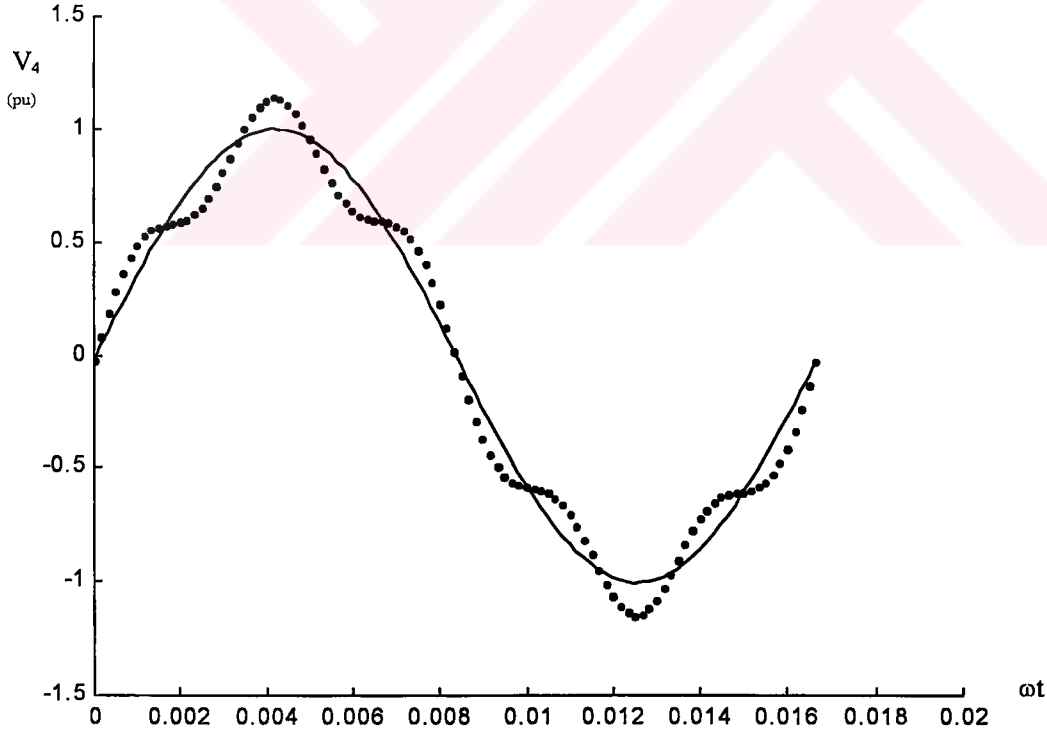
Bu sayısal uygulamada kullanılan hatların karakteristik değerleri ve baralardaki aktif ve reaktif güç değerleri, ilk sayısal uygulamada kullanılan örnek güç sistemi ile aynıdır. FC-TCR’deki elemanlardan $X_r = 0.6$ pu ve $X_c = 2$ pu olarak alınmış ve iletim açısı σ ’nın 0° ile 180° arasındaki değerleri için sistemin değişik analizleri yapılmıştır. Temel frekansta (60 Hz) eşdeğer süseptansın ($B^{(1)}$), σ ’ya göre değişimi Şekil 8.19’da verilmiştir.



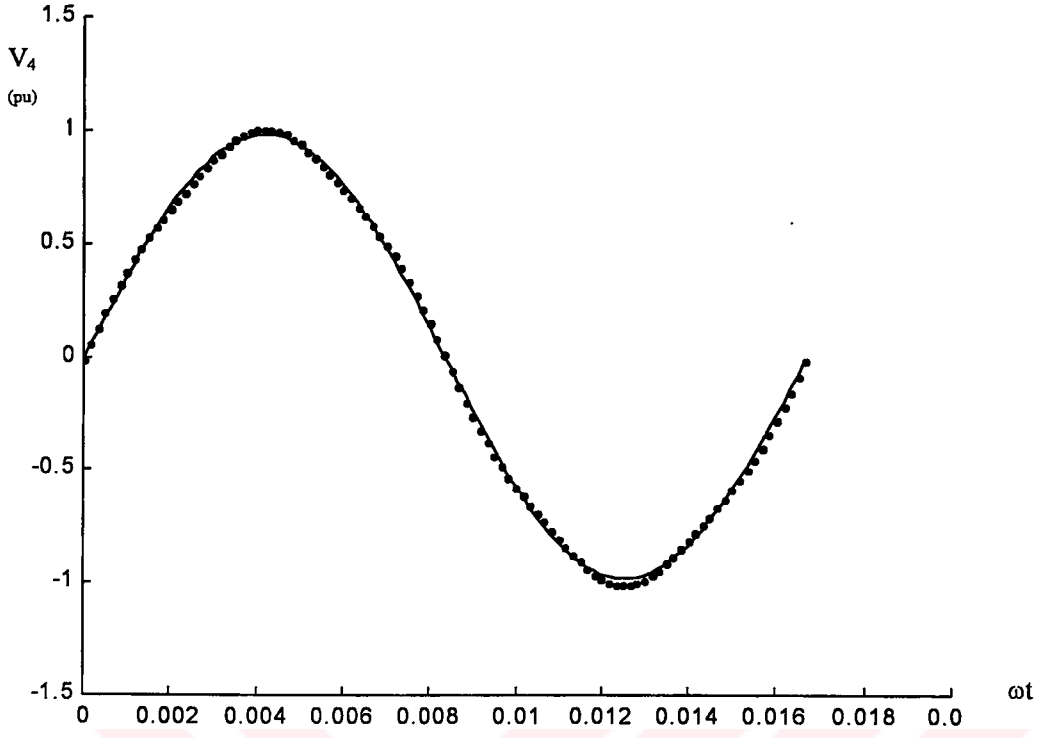
Şekil 8.19 Temel frekansta (60 Hz) eşdeğer süseptansın ($B^{(1)}$), σ ’ya göre değişimi

Yapılan analizler karşılaştırma açısından hem lineer güç akışına hem de harmonik güç akışına dayalı olarak geliştirilen algoritmalara göre yapılmıştır. Burada harmonikler dikkate alınmadan yapılan analizlerin sonucu “-” biçiminde ve sadece 5. harmonik bileşeni dikkate alınarak yapılan analizlerin sonucu da “•” biçiminde gösterilmiştir.

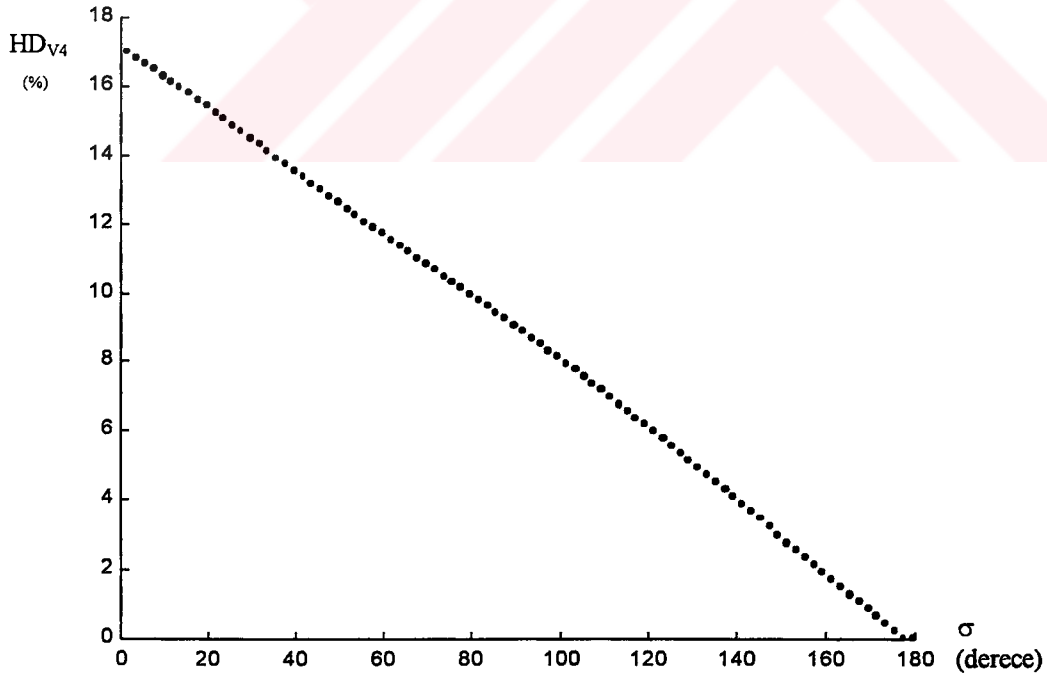
Analiz için, iletim açısının $0^\circ \leq \sigma \leq 180^\circ$ arasındaki değerlerinden alt ve üst sınır değerlerine yakın iki işletim noktası olan 60° ve 160° değerleri gözönüne alınmıştır. TCR'nin iletim açısı σ 'nın 60° ve 160° olması durumlarında 4 nolu baranın gerilim değerlerinin frekansa bağlı (frekans 60 Hz olarak alınmıştır) değişimleri sırasıyla Şekil 8.20 ve Şekil 8.21'de verilmiştir. İletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde, 5. harmonik bileşeni için 4 nolu baradaki tekil harmonik distorsiyonunun (HD_{V_4}) değişimi, Şekil 8.22'de gösterilmiştir. Harmoniklerin gözönüne alınması ve alınmaması durumlarda σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde 4 nolu baranın reaktif gücünün (Q_4) değişimi Şekil 8.23'de verilmiştir.



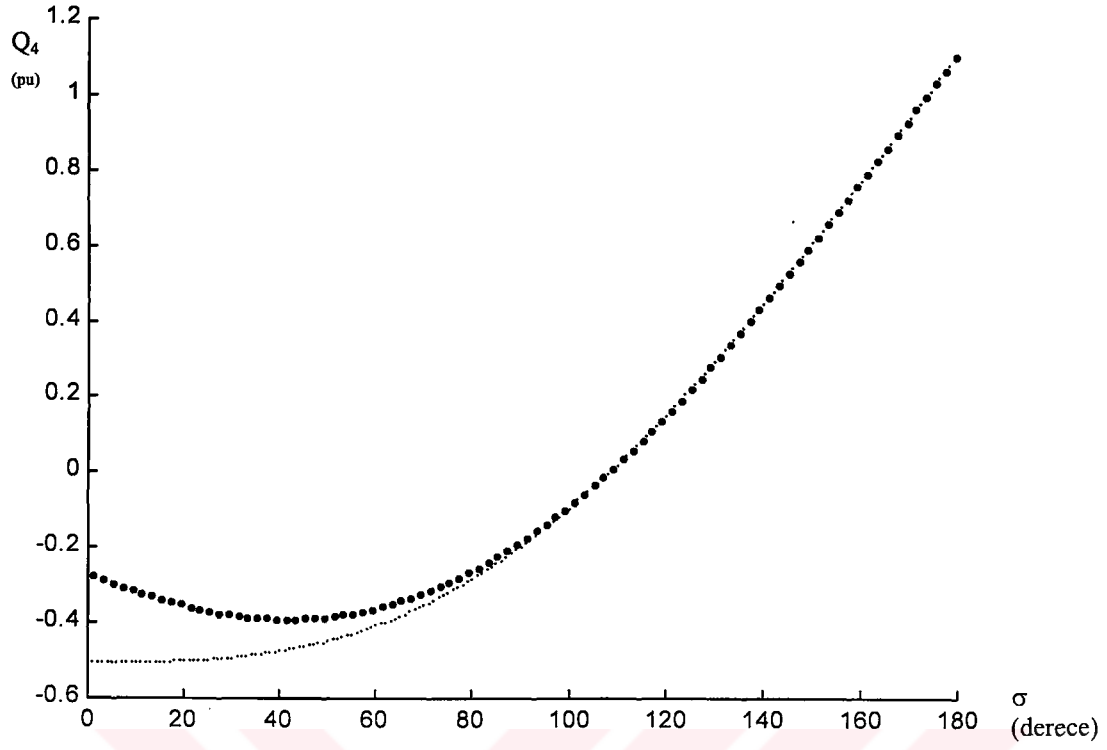
Şekil 8.20 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için V_4 'ün frekansa bağlı değişimi



Şekil 8.21 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için V_4 'ün frekansa bağlı değişimi



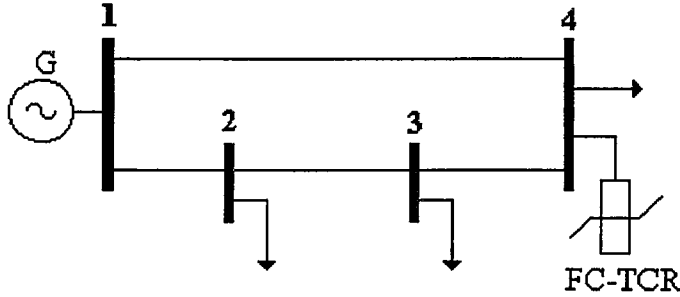
Şekil 8.22 İletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde HD_{V_4} 'ün değişimi



Şekil 8.23 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda, σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde Q_4 'ün değişimi

8.4 Sayısal Uygulama 4

Bu uygulamada, sayısal uygulama 3'deki örnek güç sistemindeki 4 nolu baraya FC-TCR ile birlikte statik yük bağlı olması durumu ele alınmış ve bu Şekil 8.24'de gösterilmiştir.



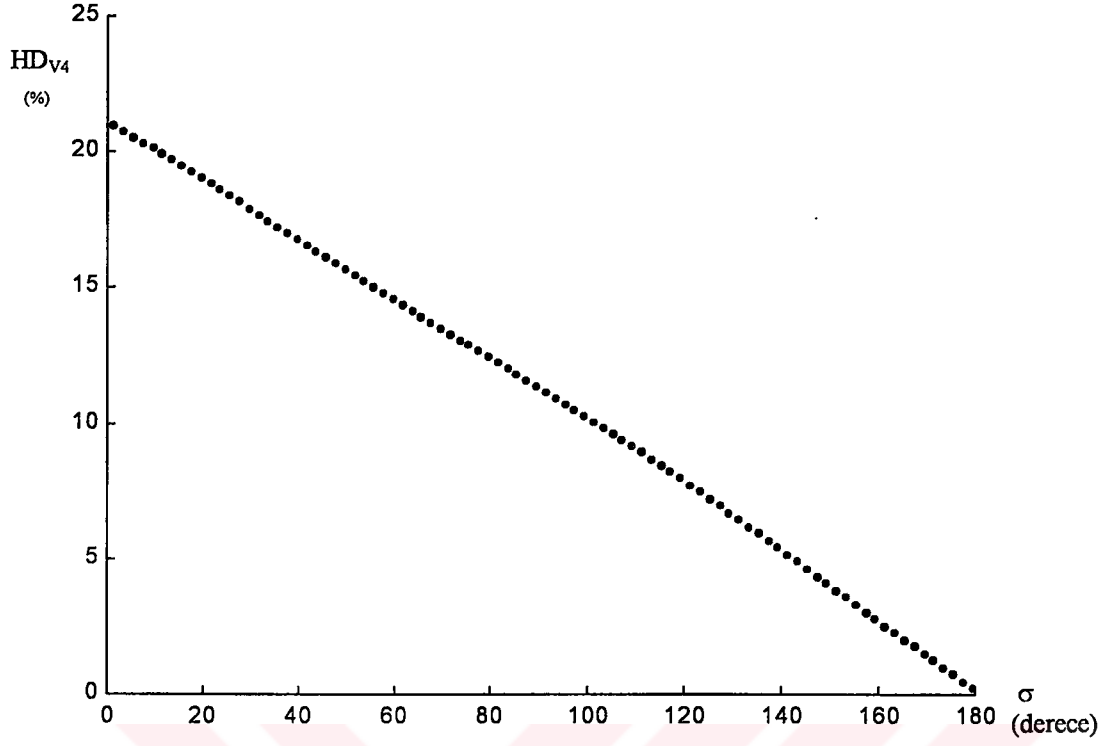
Şekil 8.24 FC-TCR içeren 4 baralı örnek güç sistemi

Kullanılan hatların karakteristik değerleri ilk sayısal uygulamada kullanılan örnek güç sistemi ile aynıdır. Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri de Çizelge 8.7'de verilmiştir.

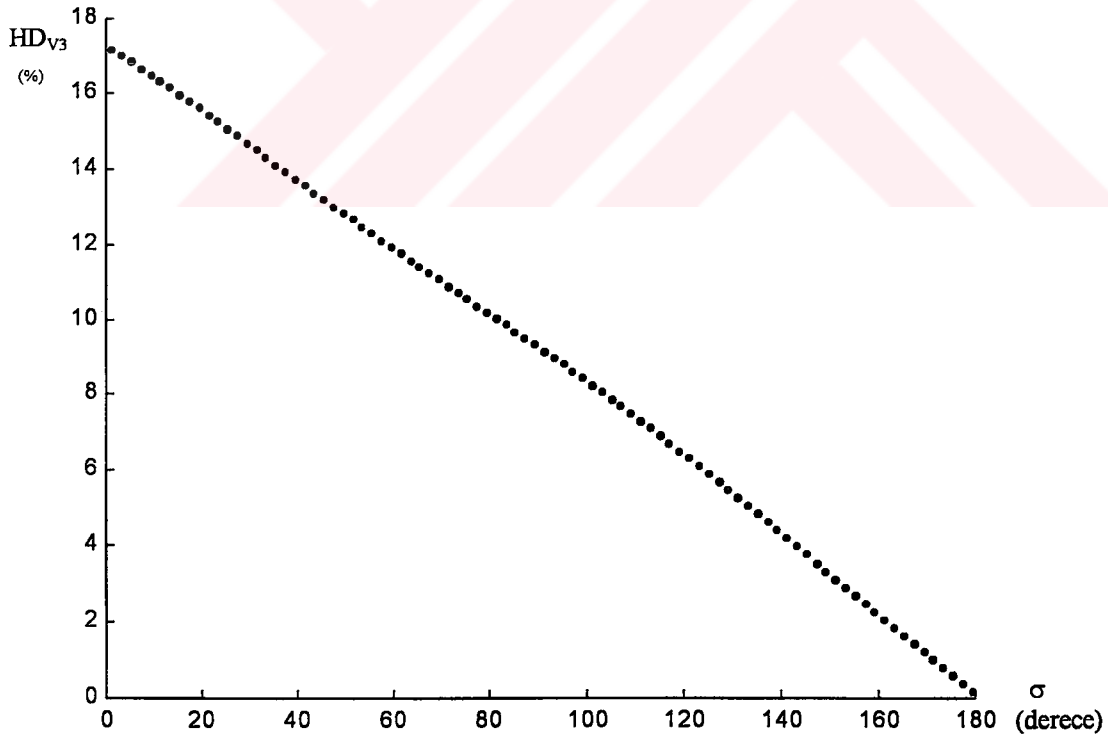
Çizelge 8.7 Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri

Bara No	$P_{yük}$ (pu)	$Q_{yük}$ (pu)
1	0.00	0.00
2	0.10	0.10
3	0.10	0.10
4	0.80	0.40

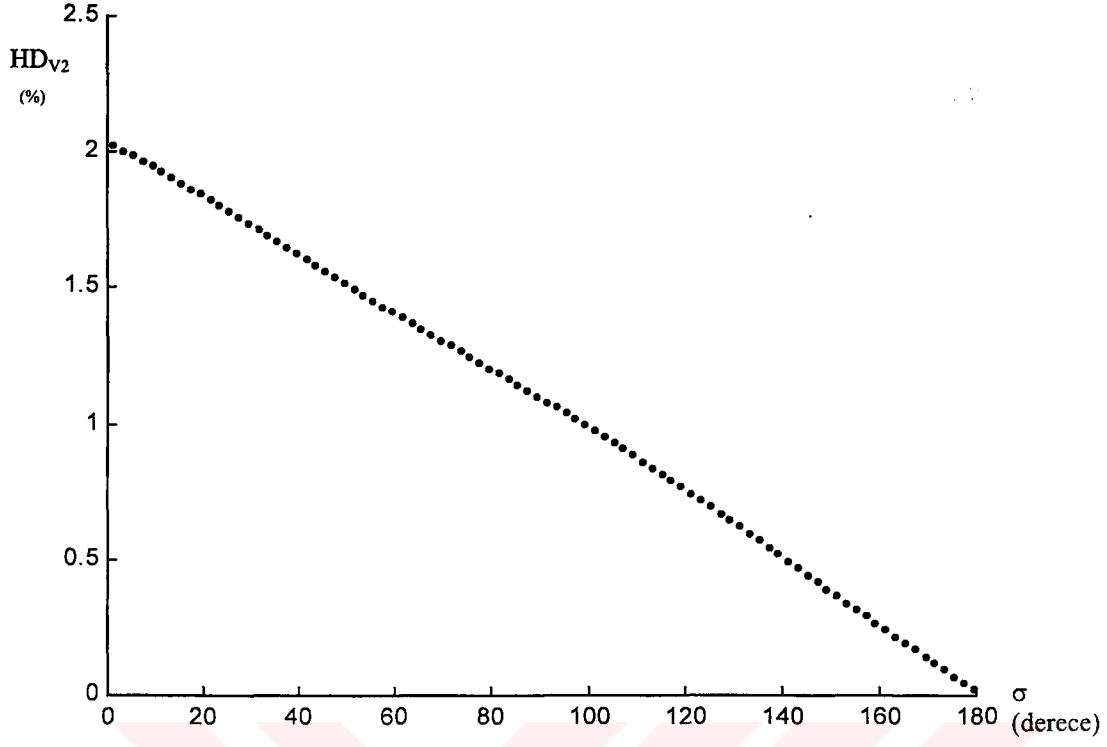
Bu sayısal uygulamada FC-TCR'deki elemanlardan $X_r = 0.6$ pu ve $X_c = 2$ pu olarak alınmış ve iletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerleri için sistemin değişik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler karşılaştırma açısından yine hem lineer güç akışına hem de harmonik güç akışına dayalı olarak geliştirilen algoritmalara göre yapılmıştır. Burada harmonikler dikkate alınmadan yapılan analizlerin sonucu "-" işareti ve sadece 5. harmonik bileşeni dikkate alınarak yapılan analizlerin sonucu da "•" biçiminde gösterilmiştir. İletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde, 5. harmonik bileşeni için 4, 3 ve 2 nolu baralardaki tekil harmonik distorsiyonunun (HD_V) değişimi Şekil 8.25 - Şekil 8.27'de gösterilmiştir. Harmoniklerin gözönüne alınması ve alınmaması durumlarında σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde 4 nolu baranın reaktif gücünün (Q_4) değişimi Şekil 8.28'de verilmiştir.



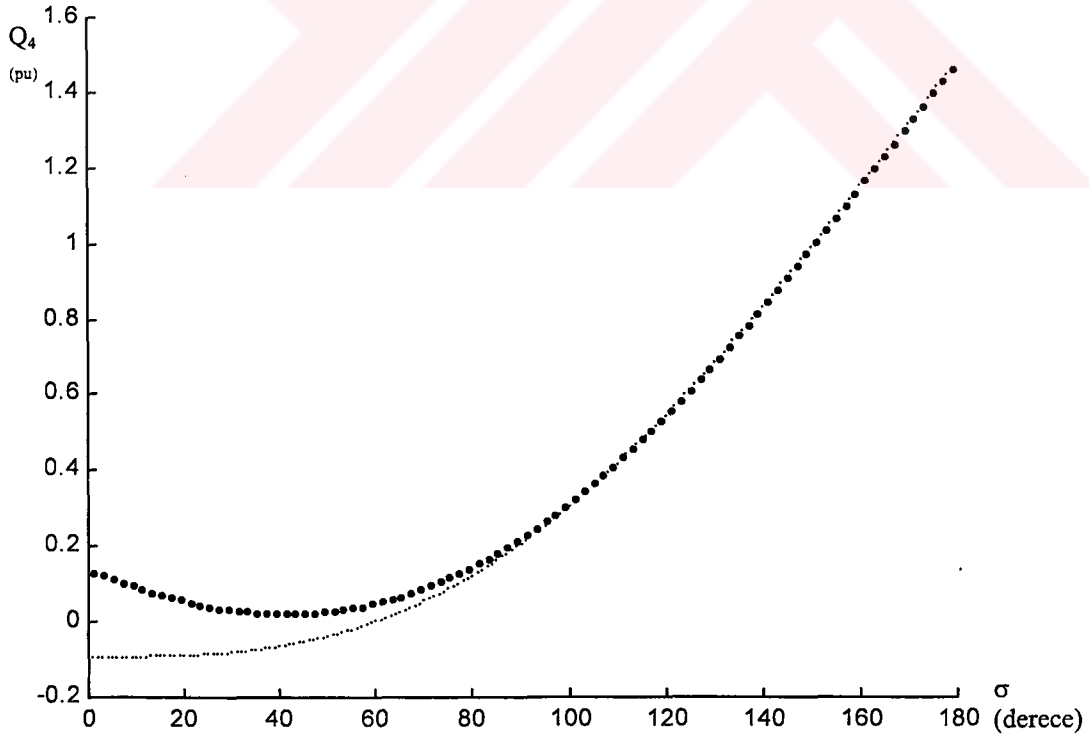
Şekil 8.25 İletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde HD_{v4}'ün değişimi



Şekil 8.26 İletim açısı σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde HD_{v3}'ün değişimi



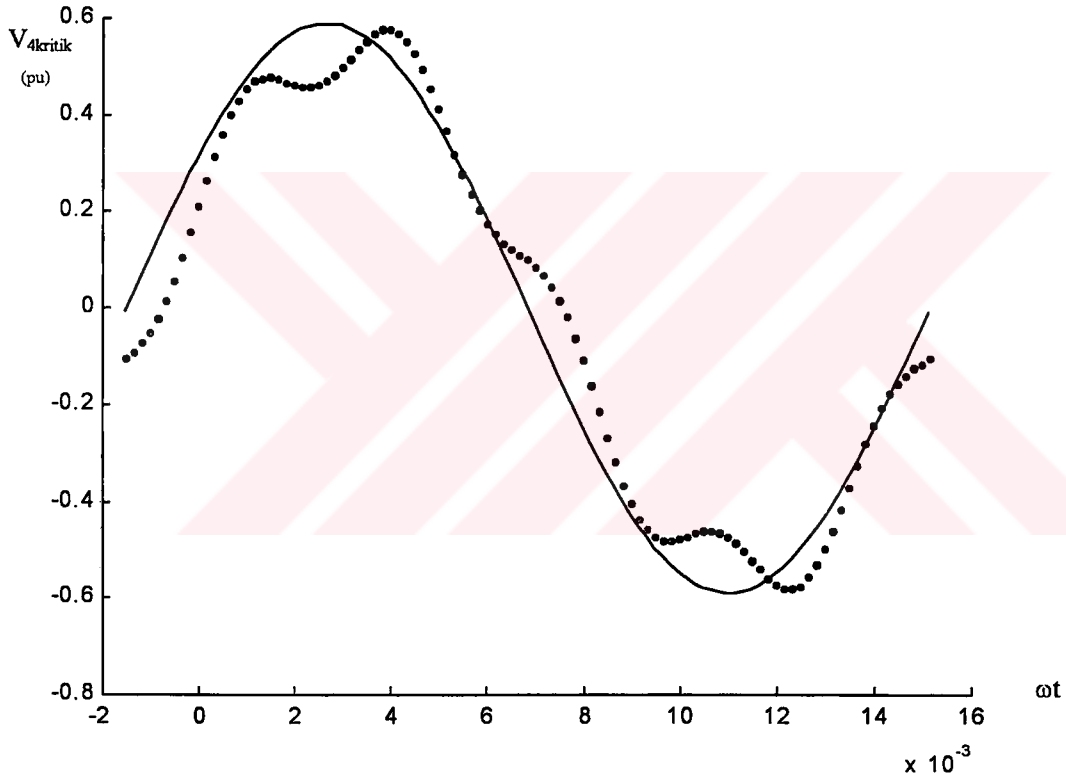
Şekil 8.27 İletim açısı σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde HD_{V2} 'nin değişimi



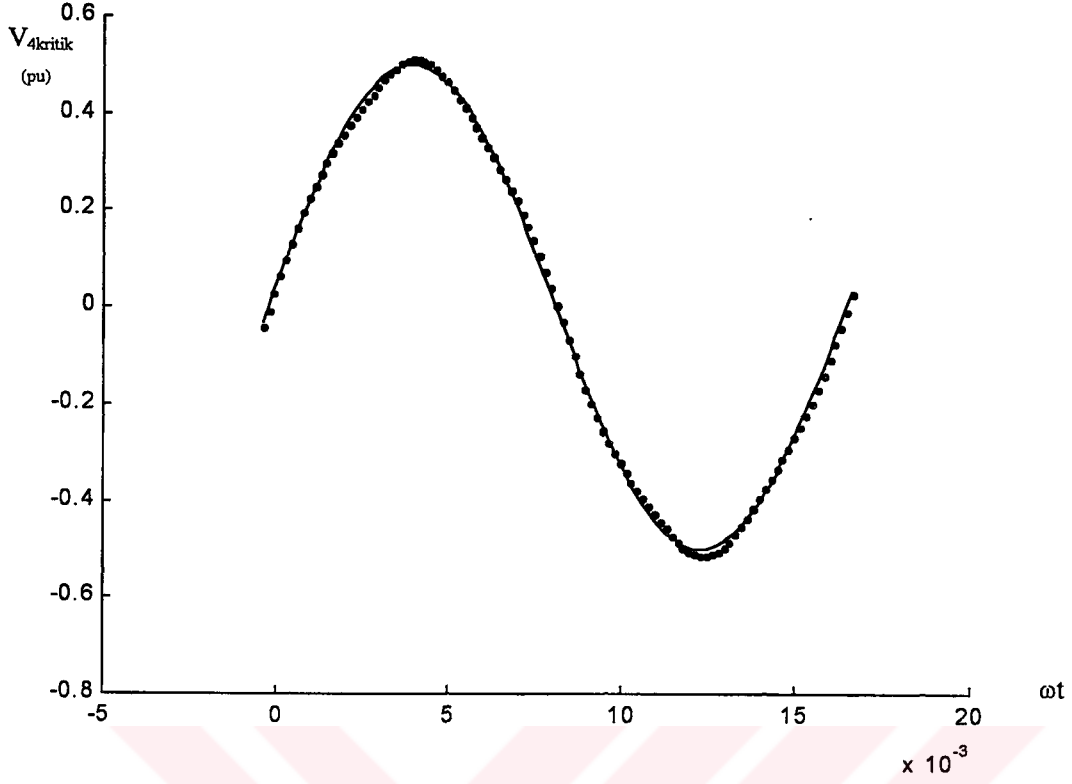
Şekil 8.28 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda, σ 'nın 0° ila 180° arasındaki değerlerinde Q_4 'ün değişimi

TCR'nin iletim açısı σ 'nın 60° ve 160° olması durumlarında 4, 3 ve 2 nolu baraların sürekli hal gerilim kararlılıkları açısından bu sistem ele alındığında kritik gerilim ($V_{4\text{kritik}}$, $V_{3\text{kritik}}$ ve $V_{2\text{kritik}}$) değerlerinin frekansa bağlı (frekans 60 Hz olarak alınmıştır) değişimleri sırasıyla, Şekil 8.29 - Şekil 8.34'de verilmiştir.

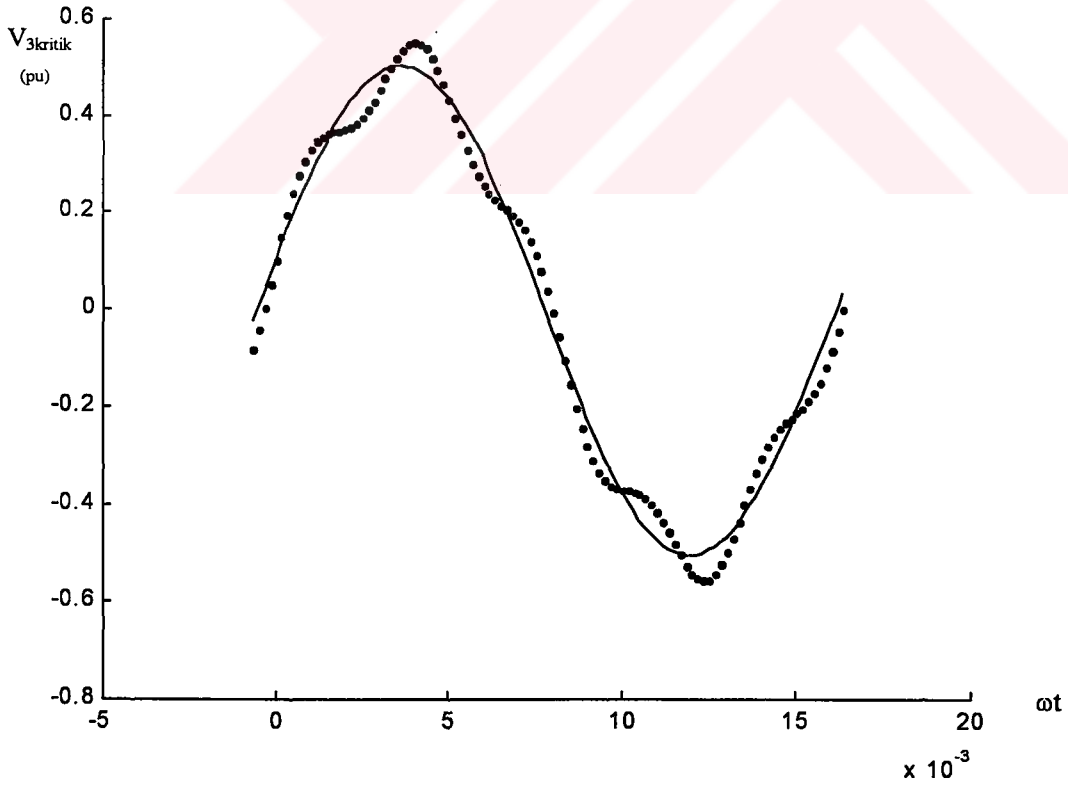
TCR'nin iletim açısı σ 'nın 0° ila 180° aralığında 4, 3 ve 2 nolu baraların sürekli hal gerilim kararlılığı açısından bu sistem ele alındığında kritik güç ($P_{4\text{kritik}}$, $P_{3\text{kritik}}$ ve $P_{2\text{kritik}}$) değerleri Şekil 8.35 - Şekil 8.37'de verilmiştir.



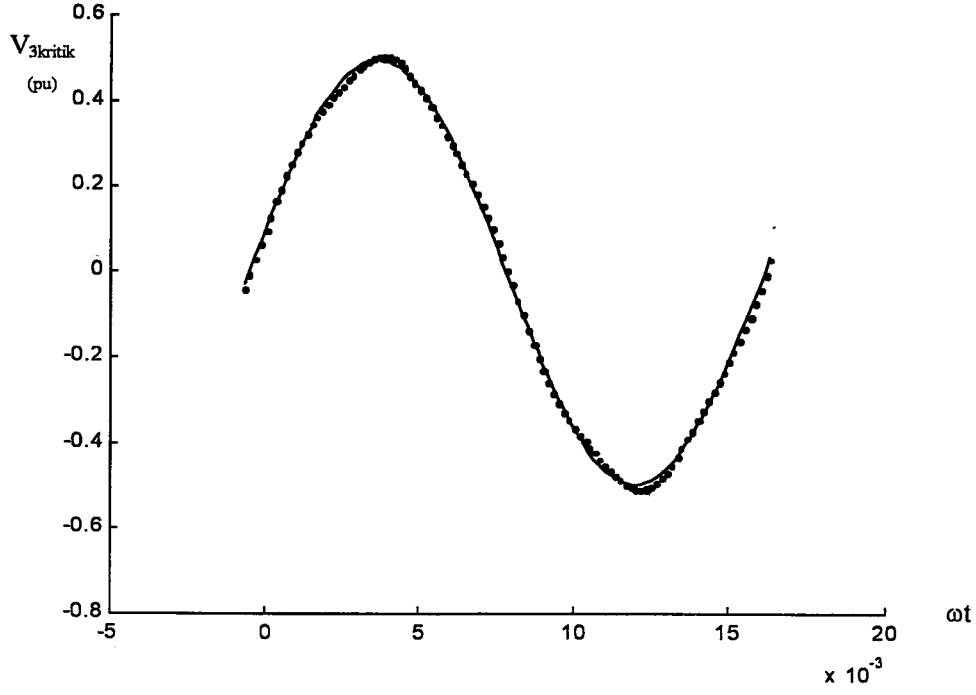
Şekil 8.29 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{4\text{kritik}}$ 'in frekansa bağlı değişimi



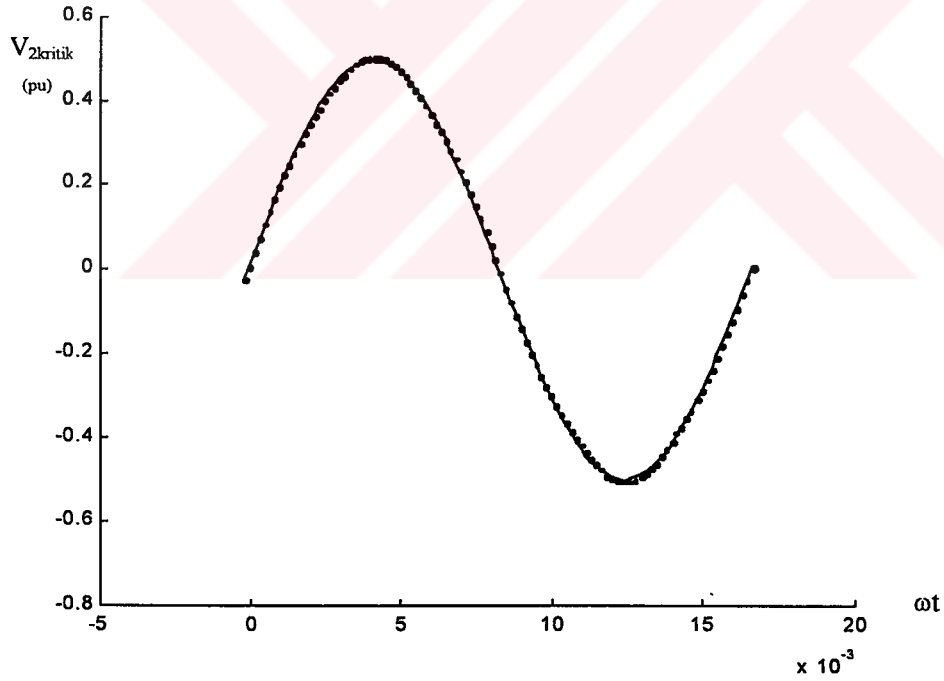
Şekil 8.30 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{4kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi



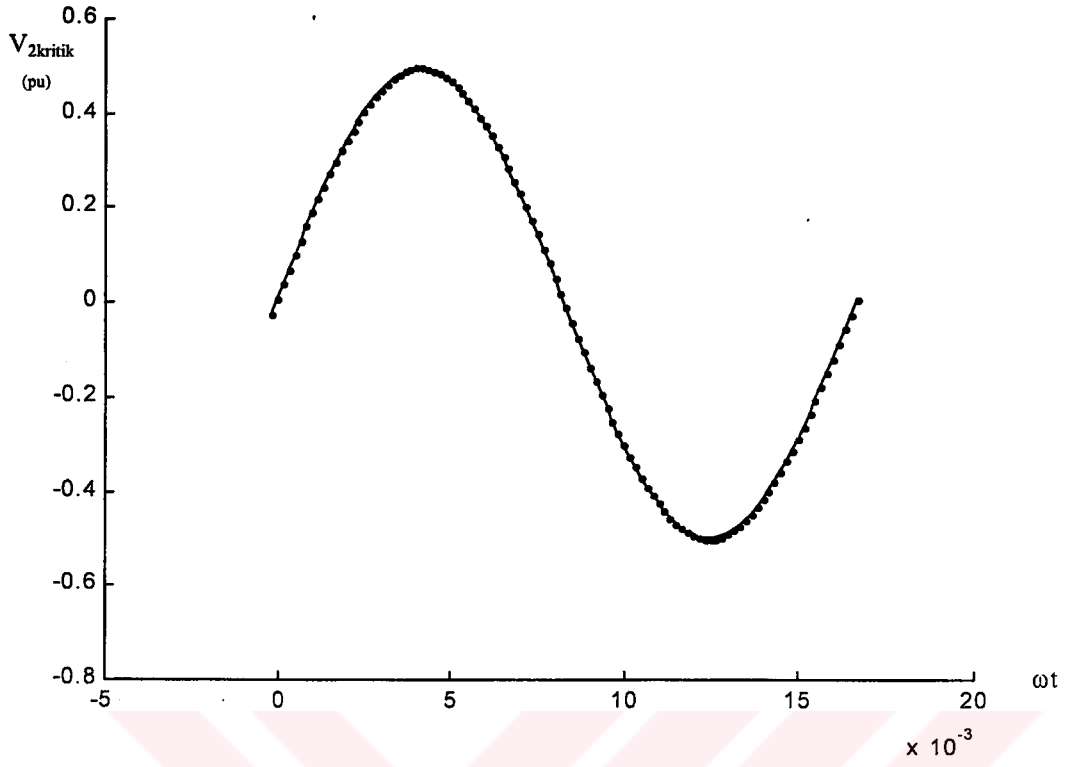
Şekil 8.31 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{3kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi



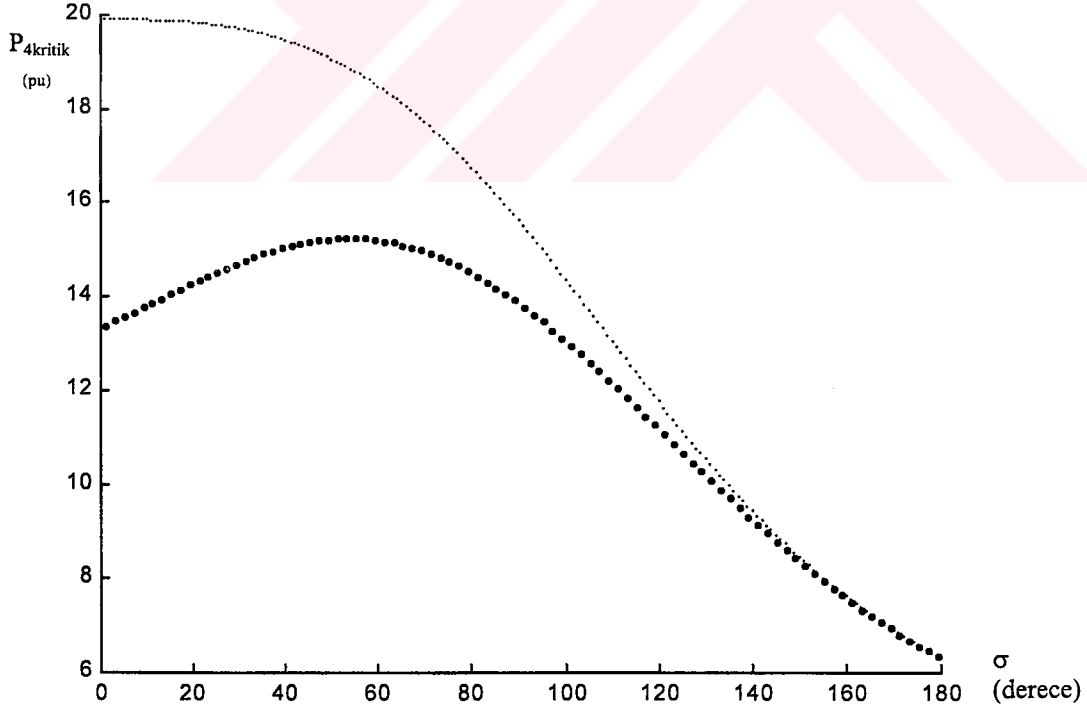
Şekil 8.32 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{3kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi



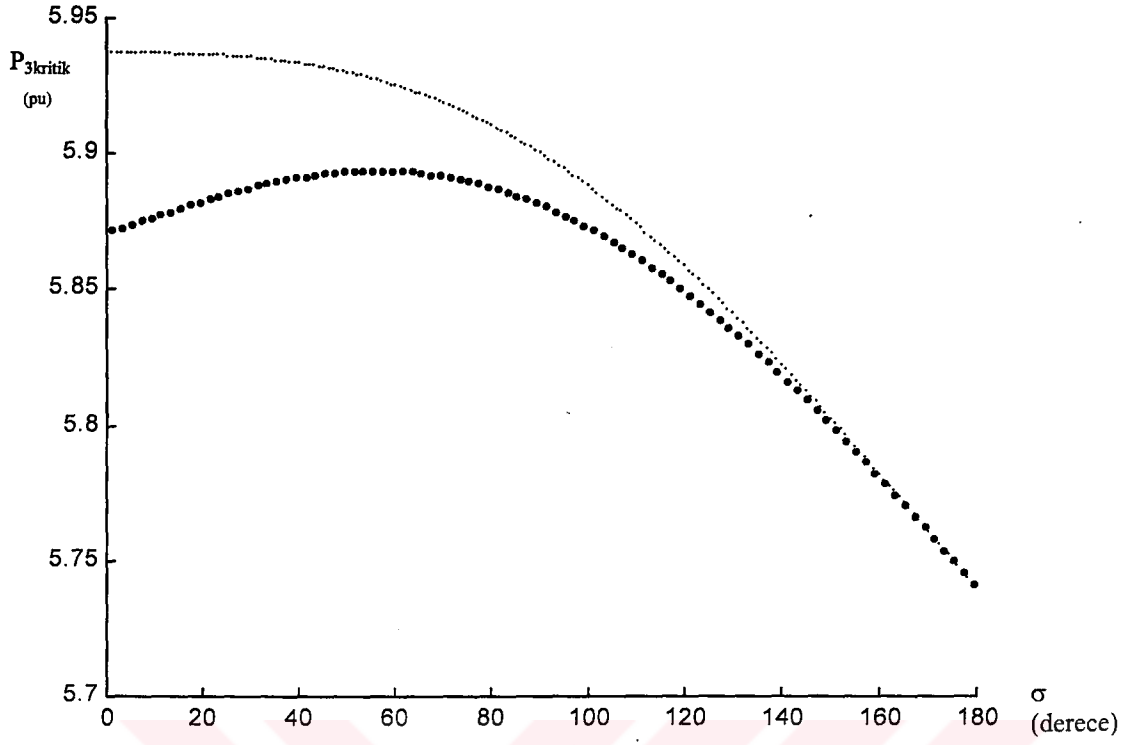
Şekil 8.33 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 60^\circ$ için $V_{2kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi



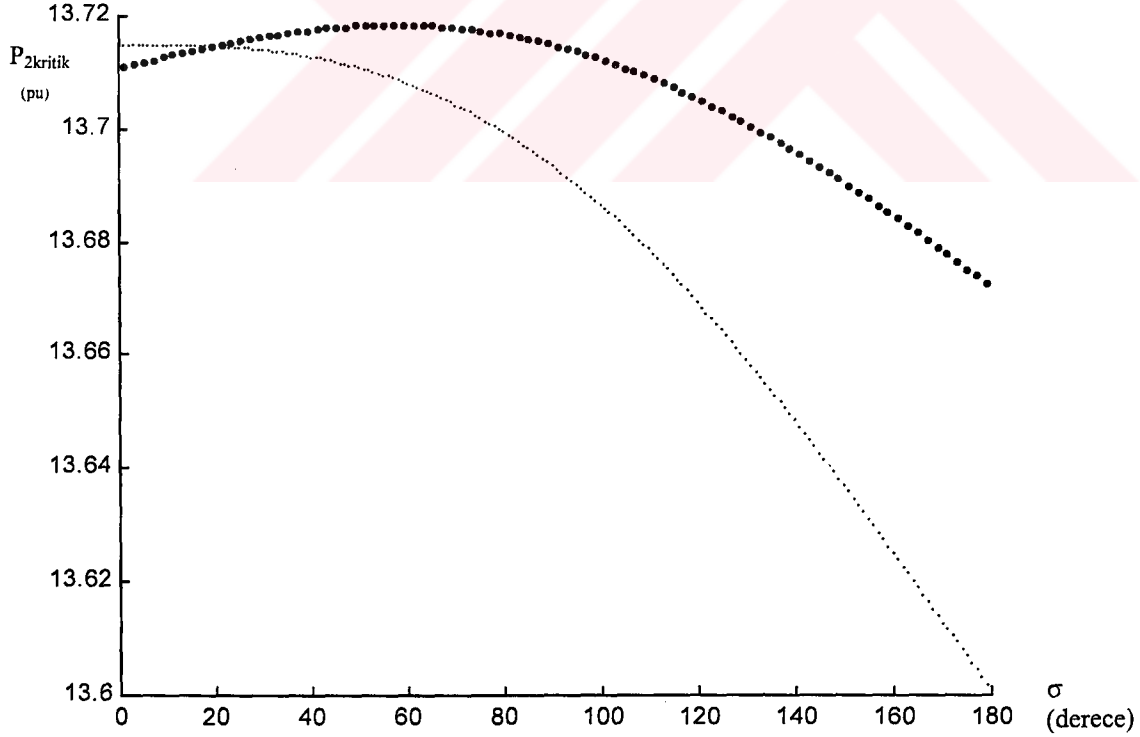
Şekil 8.34 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda $\sigma = 160^\circ$ için $V_{2kritik}$ 'in frekansa bağlı değişimi



Şekil 8.35 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda, σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde $P_{4kritik}$ 'in değişimi



Şekil 8.36 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda, σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde $P_{3kritik}$ 'in değişimi



Şekil 8.37 Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda, σ 'nın 0° ile 180° arasındaki değerlerinde $P_{2kritik}$ 'in değişimi

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

İnsanoğlunun yaşamında enerjiye olan ihtiyaç her zaman sözkonusu olmuştur. Çok çeşitli enerji türleri içinde bugüne kadar en çok kullanılanı ise elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisine olan talep miktarının sürekli artması, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ve bunu gerçekleştirmek için bir takım kriterlerin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında, bu kriterler mutlaka gözönünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, enerji kalitesi bakımından gerilim kararlılığı ve nonsinüoidal büyüklükler genel olarak incelenmiş ve nonsinüoidal büyüklüklerin gerilim kararlılığına etkileri detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, güç sisteminin planlaması, işletimi ve kontrolü açısından şu tespitler yapılabilir:

Gerilim kararlılığı, gerek normal koşullarda, gerekse bozucu bir etki sonrasında, bir enerji sistemindeki tüm baraların kabul edilebilir sınırlardaki gerilim değerlerini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Gerilim kararlılığı esas olarak yük kararlılığının bir parçasıdır ve gerçek bir gerilim çöküşü yükün niteliğine bağlıdır.

Güç sistemindeki nonlinear elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini azaltmaktadırlar.

Bir elektrik güç sisteminin güvenli ve arzu edilebilir bir biçimde çalışmasını sağlamak için, sistemin tasarım ve işletim aşamasında, enerji sisteminin kararlılığının ve nonlinear karakteristikli elemanların meydana getirdikleri harmoniklerin de gözönüne alınması gerekir.

Reaktif güç kompanzasyonu, gerilim kararlılığı açısından çok önemlidir. Nonlinear yüklerin bulunduğu durumlarda, harmoniklerin etkisi dikkate alınmadığı durumlarda tam olarak doğru olmayan kompanzasyon yapılabilir (Şekil 8.28). Bundan dolayı kompanzasyon yapılırken harmoniklerin etkisinin gözönünde bulundurulması gerekir.

Nonlinear yüklerin sebep olduğu harmonik bileşenlerin güç sistemini rezonansa getirmesi, kararlılık açısından önemli olup bu şartların incelenmesi gerekmektedir.

Karma yüklerin (statik ve dinamik yüklerin birarada bulunması durumunda) karakteristiği ele alındığında, hem küçük hem de büyük bozulmaları içeren gerilim kararlılığı, sürekli hal gerilim kararlılık analizinde kullanılan lineer ve nonlinear güç akış analizlerinden elde

edilmektedir. Kritik değerler açısından (ok özel durumlar hariç), dinamik gerilim kararlılık analizi yapmaya gerek yoktur.

Elektrik enerji sistemlerinde gerilim kararlılık analizini ortaya koyan ve çeşitli işletim durumları için, harmoniklerin gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmaya yönelik bu çalışma ile yapılan yenilikler, elde edilen sonuçlar ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Bugüne kadar yapılan çalışmalarda sürekli hal gerilim kararlılık analizleri, lineer yük durumları için tanımlanmıştır. Nonlinear yük elemanlarının da sisteme dahil edilmesi durumunda sürekli hal gerilim kararlılık analizi yapabilmek için yeni bir algoritmanın geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın temel amaçlarından biri olan, güç sistemlerinde nonlinear yüklerin bulunması durumunda gerilim kararlılık analizi; Newton-Raphson yöntemine dayalı harmonik güç akış analizi ile lineer yükler olması durumuna göre geliştirilen sürekli hal gerilim kararlılık analizinin sentezinden yararlanılarak, gerekli hata vektörü ve jakobyen matris elemanlarına ait kısmi türev bağıntıları çıkarılarak ve nonlinear yükler bulunması durumu için gerekli modellemeler gerçekleştirilerek adım adım ortaya konulmuştur. Bu algoritmaya uygun olarak MATLAB programından yararlanılarak gerçekleştirilen bir bilgisayar yazılımı Ek 1’de verilmiştir.
- Son yıllarda, gerilim kararlılığında ve dinamik güç faktörü düzeltilmesinde kullanılan sabit veya kademeli kapasite grulu tristör kontrollü reaktörlerin güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılması, bir çok avantajlar sağlamasının yanısıra, harmoniklere ve bunların sonucu istenmeyen durumlara neden olmaktadır. Kararlılık bakımından önemi olan rezonans veya yüksek distorsiyon oluşturması bu olumsuz etkilerdendir. G sisteminde dolaşan harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemde rezonansa veya büyük bozulmalara sebep olabilir ve sistemin kararlılığını bozabilir. Bu sebeple nonsinusoidal büyüklüklerin analizi ve bunların sistemdeki etkilerinin belirlenmesi bu çalışmayla gerçekleştirilmiştir.
- Çalışmamızda, nonlinear yük olarak davranan ve kompanzasyon maksadıyla güç sistemlerinde kullanılan tristör kontrollü reaktör (TCR) içeren statik VAR kompanzatörün (SVC), analizde kullanımını kolaylaştıracak matematik modelleme gerçekleştirilmiş, SVC’nin iletim açıları bakımından çeşitli işletme durumları için değişik parametrelere bağlı olarak çalışma değerleri belirlenmiş ve SVC’nin

nonsinüsoidal büyüklüklere sebep olması nedeniyle sistemde oluşacak gerilim distorsiyonuna bağlı olarak çalışma şartlarının ve güç sistem gerilim kararlılığının detaylı bir incelemesi yapılmıştır.

- Alışlagelmiş metotlarla yapılan analizlerle, güç akışının jakobyen matrisinin tekilliğe ulaştığı (ıraksadığı) noktalardan kritik değerler bulunmaktadır. Bu çalışmayla, N baralı sistem, radyal sisteme indirgenerek temel ve harmonik bileşenler için, harmonik güç akışının jakobyen matrisinin tekilliğe ulaştığı durumdaki elektrik güç sistemini kararsız yapan kritik değerlerin bulunması gerçekleştirilmiştir.
- Literatür çalışmalarından gerilim kararlılığına olumlu veya olumsuz etki yapan durumlar tespit edilmiştir. Güç faktörünün endüktif durumdan kapasitif duruma yönelmesi, aynı devre elemanlarına sahip hatlardan daha kısa olanları, kayıp faktörünün küçültülmesi, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması, genellikle sürekli hal gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Şönt kompanzasyon ise hattın modellenmesine göre olumlu yada olumsuz yönde gerilim kararlılığını etkileyebilmektedir. Bu çalışmayla, harmoniklerin sürekli hal gerilim kararlılığına etkisi ilk defa detaylı olarak araştırılmış ve olumsuz yönde etkilediği ispat edilmiştir. Bu olumsuzluktan en çok nonlineer yükün bulunduğu baranın etkilendiği ve nonlineer yük akımı ne kadar büyükse, kararsızlık etkisinin de o oranda büyük olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 8.3 - 8.6).
- Elde edilen kritik değerler, gerilim kararlılığı altında taşınabilecek maksimum güç sınırını belirlerler. Buna göre yapılan bu çalışmayla, nonlineer yükün büyüklüğü ile taşınabilecek maksimum gücün değerinin ters orantılı olarak azaldığı görülmüştür (Çizelge 8.5 ve 8.6).
- Analiz sonucunda elde edilen temel ve harmonik bileşenler için (gerilim kararlılığı bakımından ilgilenilen baranın) kritik gerilim değerlerinin, frekans domeninde nonlineer yüke bağlı değişimleri, klasik sistemlerden elde edilen kritik gerilim değerleriyle karşılaştırılarak verilmiştir. Burada nonlineer yükün bulunduğu barada nonlineer akım katsayısının artması ile klasik analiz ve geliştirilen analiz sonucu elde edilen kritik gerilim değerleri arasındaki farkların arttığı (Şekil 8.3 - 8.6), fakat nonlineer baranın bulunduğu bara haricinde iki analiz arasında kritik gerilimler arasında çok küçük farkların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8.7 ve 8.8).

- Harmoniklerin güç sistemlerinde ortaya çıkmaması için, ya başlangıç safhasında önlem alınarak ona göre dizayn edilmesi, ya da ortaya çıkmış harmonikler varsa bunların elimine edilmesi, örneğin filtre kullanılması yoluna gidilir. Harmoniklerin olumsuz etkilerinden biri de sistemi rezonansa getirmesidir. Bir TCR'nin işletim noktası ve parametre değerleri, sistemin seri/paralel rezonans frekanslarını anında etkileyebilir ve sonuç olarak, sistemi rezonans noktalarına sürükleyebilir. Böylelikle, tetikleme devresi için kullanılan model ile doğru tetikleme anlarının seçilmesi gerekir. Aksi takdirde, yanlış tetikleme anları sonucunda, karakterize edilemeyen harmonikler oluşacaktır. Sistemin bu harmoniklerden etkilenmesini minimize edebilecek şekilde tasarlanmasını sağlayan bu yaklaşımlar, sistem tesisinde ve işletilmesinde büyük kolaylık sağlamakta ve sistemin kararlı çalışmasına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmayla sistemi rezonansa getiren işletim durumları da ortaya çıkarılmıştır (Çizelge 5.1 ve 5.2).
- TCR, nonlinear karakteristiğe sahip olduğu için nonlinear akım ifadesi, orjinal bir biçimde bara gerilimlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiş ve sürekli hal gerilim kararlılık analizinde kullanılmaya hazır forma getirilmiştir.
- Literatürde genellikle, TCR'lerin geçici kararlılık analizleri yapılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen harmonik içeren sistemlerde sürekli hal gerilim kararlılık analizi, radyal bir sisteme TCR bağlı iken de yapılmış ve güç sistem elemanlarının değişik durumları için kararlı ve kararsız işletimlerin söz konusu olduğu görülmüştür (Şekil 8.10 - 8.17).
- Sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatörü 4 baralı bir sistemde 4 nolu baraya bağlanarak, aynı barada statik yük bulunup bulunmaması durumları için incelenmiş ve iletim açılarının küçük değerlerinde harmonikli ve harmoniksiz durumlara göre sürekli hal kararlılık analizlerinde büyük farkların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8.29 - 8.37). Ayrıca nonlinear yükün bulunduğu baraya yakın olan 3 nolu baranın tekil harmonik distorsiyonunun (HD_{V3}), 2 nolu baranınkinden (HD_{V2}) çok büyük fakat 4 nolu baranınkinden (HD_{V4}) ise küçük olduğu görülmüştür (Şekil 8.25 - 8.27). Buradan nonlinear yüke yakın baraların, harmoniklerden daha çok etkilendiği anlaşılmaktadır.

- Nonlineer yük akımı, bara gerilimlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilen herhangi bir yük için sürekli hal gerilim kararlılık analizi, geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla yapılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara ve tespitlere göre şu önerilere yer verilebilir:

- Nonlineer yükler olması durumunda, gerilim kararlılığına olumlu veya olumsuz etki yapan durumlar (güç faktörünün endüktiften kapasitife yönelmesi, aynı devre elemanlarına sahip hatlardan daha kısa olanları, kayıp faktörünün küçültülmesi, seri kompanzasyon yüzdesinin artırılması, şönt kompanzasyon yapılması gibi) yeniden ele alınarak incelenmesine, bu çalışma önemli bir katkı sağlayacaktır.
- Geliştirilen algoritma daha da detaylandırılarak, dengesiz sistemler için de gerilim kararlılık analizi yapılabilir.
- Nonlineer yükler düşük güçlü olmalarına rağmen, bara geriliminin dalga şeklini bozmaktadırlar. Enerji sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü nonlineer yük bulunduğu gözönüne alınırsa, ek kayıpların, harmonik gerilimlerinin ve THD değerlerinin de yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz bir gerçektir. Bu gibi durumlarda gerilim kararlılığı dikkate değer bir ölçüde etkilenmektedir. O halde enerji sistemlerinde mümkün olduğunca nonlineer yüklerin etkilerinin azaltılması gerilim kararlılığı açısından önem kazanmaktadır.
- Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin daha da artacağı gözönüne alınarak, nonlineer yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı nonlineer yük, bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece üç ve üçün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca mümkün olduğu kadar tüketicilerin konverter kullanımında ekonomik kriterler de dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren yüksek darbe sayılı konverterleri tercih etmesi teşvik edilmelidir.
- Son yıllarda ülkemizde yarı-iletken kontrol elemanlarının hızla yaygınlaşması, ark fırınlarının kullanıldığı demir-çelik tesislerindeki kapasite artırımları vb. dikkate alındığında, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, gerek akımlar ve gerekse gerilimler için

THD, TDD, HD_v ve HD_I değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerler standartlaştırılmalıdır.

- Nonlineer y¼klerin bulunduğu t¼keticilerde, filtre devrelerinin tesis edilmesi bir y¼netmelik yaptırımını olarak ¼ng¼r¼lebilir. Bu yaptırımın uygulanması halinde t¼keticilerin kullanacağı harmonik filtreleri ¼nceden belirlenecek standartlara g¼re seğimiyle tesis edilerek, kararlılık bakımından daha olumlu sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abe, S., Fukunova, Y., Isono, A., Kondo., B., (1982), "Power System Voltage Stability", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 10(101): 3830-3840.
- Anderson, P.M., FOUAD, A.A., (1994), Power System Control and Stability, Revised Printing, IEEE Press
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Norwich.
- Arrillaga, J. ve Arnold, C.P., (1990), Computer Analysis of Power Systems, John Wiley & Sons, Essex.
- Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997), Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons.
- Begovic, M.M. ve Phadke, A.G., (1992), "Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, 1(7): 114-123.
- Bohmann, L.J. ve Lasseter, R.H., (1986), "Equivalent Circuit for Frequency Response of a Static VAR Compensator", IEEE Trans. Power Systems, 4(1): 68-74.
- Bohmann, L.J. ve Lasseter, R.H., (1991), "Stability and Harmonics in Thyristor Controlled Reactors", IEEE Trans. Power Delivery, 2(5): 1175-1181.
- Brown, P.J. ve Tunçay, R.N., (1989), "Güç Sistemi Harmoniklerinin Bilgisayar Destekli Analizi ve Ölçülmesi", Elektrik Mühendisliği III. Ulusal Kongresi, İ.T.Ü, İstanbul, 3(1): 75-78.
- Brucoli, M., Scala, M.I., Sbrizzai, R., Trovato, M., (1993), "Voltage Stability Analysis of Electric Power Systems with Frequency Dependant Loads", IEE Proceeding-C, 1(140): 1-7.
- Canizares, C., A., (1995), "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modelling", IEEE Trans. On Power Systems, 1(10): 512-522.
- Chiang, H.D., Dobson I., Thomas, R.J., Thorp J.S. ve Ahmed L.F., (1990), "On Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Trans. On Power Systems, 2(5): 601-611.
- Chow, J.C., Fischl, R., Yan, H., (1990), "On The Evaluation of Voltage Collapse Criteria", IEEE Trans. on Power Systems, 7(1): 114-123.
- CIGRE Working Group 36-05, (1981), "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Electra, 77: 35-54.
- CIGRE Report, (1986), Static VAR Compensators, Prepared by WG 38-01, Task Force No.2, Paris.
- Çakır, H., (1989), Enerji İletimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Çetin, İ., (1987), Elektrik Motorları, Fatih Yayınevi Matbaası, İstanbul.

D'Angelo, H., (1970), *Linear Time-Varying Systems, Analysis and Synthesis*; Allyn and Bacon, Boston.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill.

Edris, A.A., (1989), "Controllable VAR Compensator: A Potential Solution to Loadability Problem of Low Capacity Power Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(4): 561-567.

Elgerd, O.I., (1983), "Electric Energy Systems Theory", McGraw-Hill.

Emanuel, A.E. ve Wang, X., (1985), "Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS 104(3): 628-636).

EPRI report EL-2583, (1982), "HVDC-AC System Interaction from AC Harmonics, 1: "Harmonic Impedance Calculations".

Filipski, P.S. ve Labaj, P.W., (1992), "Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7(4): 1793-1799.

Forrest, J.A.C., (1991), "Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6(1): 153-157.

Fuchs, E.F., Roesler, D.J., ve Kovacs, K.P., (1986), "Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power System's Voltage", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 3(1): 301-307.

Fuchs, E.F., Roesler, D.J. ve Alashhab, F.S., (1987), "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage Part I: Transformers and Induction Machines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2(2): 437-444.

Fuchs, E.F., Roesler, D.J., ve Kovacs, K.P., (1987), "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage Part II: Television Sets, Induction Watt-hour Meters and Universal Machines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 4(7): 1793-1799.

Fuchs, E.F., Masoum, M.A. S. ve Roesler, D.J., (1991), "Large Signal Nonlinear Model of Anisotropic Power Transformers for Nonsinusoidal Operations Part I: λ -i Characteristic", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6: 174-185.

Galloway, R.H., (1964), "Calculation of Electrical Parameters of for Short and Long Polyphase Transmission Lines", *Proc. IEE*, 111(2): 2051-2059.

Gao, B., Morison, G.K., Kundur, P., (1988), "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transaction on Power Systems*, 4(7): 1529-1536.

Geçkinli, E.A., (1989), *Metalografi*, İTÜ Kütüphanesi Sayı 1391, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.

Glinkowski, M.T. ve Estergalyos, J., (1996a), "Transient Modeling of Electromechanical Relays Part I: Armature Type Overcurrent Relays", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11(2): 763-770.

Glinkowski, M.T. ve Estergalyos, J., (1996b), "Transient Modeling of Electromechanical Relays Part II: Plunger Type 50 Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, 11(2): 771-782.

Glover, J.D. ve Sarma, M., (1989), Power System Analysis and Design, PWS-KENT Publishing Company.

Gönen, T., (1988), Modern Power System Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition.

Grady, W.M., (1983), Harmonic Power Flow Studies, Ph. D. Thesis, Purdue University (U.S.A.).

Grady, W.M. ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 97:1935-1945.

Gyugyi L., (1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Static VAR Compensators", Proceeding of the IEEE, 4(76): 483-494.

Hammad, A.E., El-Sadek, M.Z., (1989), "Prevention of Transiyent Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by Static VAR Compensators", IEEE Trans. on Power Systems, 3(4): 1182-1190.

Hiskens, I.A., Mc Lean, B.B., (1992), "SVC Behavior Under Voltage Collapse Conditions", IEEE Trans. on Power Systems, 3(7): 1078-1087.

Horton, W.F. ve Goldberg, S., (1985), "The Effect of Harmonics on the Operating Points of Electromechanical Relays", IEEE TRans. on Power Apparatus and Systems, PAS-104(5): 1178-1188.

Hwang, M.S., Grady, W.M. ve Sanders, H.W., (1988), "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, 3(3): 1074-1079.

IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, (1999), "Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides", Final Draft.

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, (1993), New York, USA.

IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static VAR Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, 1(9): 229-240.

IEEE Wave Distortion on Consumer's Interconnection Working Group, (1984), "The Impact of Sine-Wave Distortion on Protective Relays", IEEE Trans. on Industry App., 20(2): 335-343.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 102(8): 2455-2460.

IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996a), "Modeling and Simulation of Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I : Concepts, Models and Simulation Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, 11(1): 452-460.

IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996b), "Modeling and Simulation of Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part II : Sample Systems and Examples", IEEE Trans. on Power Delivery, 11(1): 466-474.

Indulkar, C.S. ve Viswanathan, B., (1983), "Deterministic and Probabilistic Approach to Voltage Stability of Series Compensated EHV Transmission Lines", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 7(102): 2317-2322.

Indulkar, C.S. ve Viswanathan, B., (1983), "Effects of Series Compensated on the Voltage Instability of EHV Long Lines", Electric Power System Research, 6: 185-191.

Indulkar, C.S., Viswanathan, B., Venkata, S.S., (1987), "Reactive Power Constrained Loadability Limits of Series Capacitor Compensated EHV Transmission Lines", IEEE Transaction on Power Systems, 2(2): 585-591.

Indulkar, C.S., Viswanathan, B., Venkata, S.S., (1989), "Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schemes for AC Transmission Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, 2(4): 1246-1252.

Kao, W.S., Lin, C.J., Huang, C.T., (1994), "Comparasion of Simulated Power System Dynamics Applying Various Load Models with Actual Recorded Data", IEEE Transaction on Power Systems, 1(9): 248-254.

Karlsson, D. ve Hill, D.J., (1994), "Modeling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems", IEEE Transaction on Power Systems, 1(9): 157-166.

Kimbark, E.W., (1971), Direct Current Transmission, Vol 1, Wiley-Interscience.

Kocatepe, C., (1995), "Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simulasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kocatepe, C., Yumurtacı, R. ve Demir, A., (1997), "The Analysis of Harmonic Effects on Low-Voltage Systems Including Nonlinear Loads", Arab Electricity '97 International Conference, 3-5 March, Manama-Bahreyn.

Kundur, P., (1994), Power System Stability and Control, Mc Graw-Hill, Inc.

Lander, C.W. (1981), Power Electronics, McGraw-Hill Book Company Limited, Michigan.

Lasseter, R.H. ve Lee, S.Y., (1982) "Digital Simulation of Static VAR System Transients" ; IEEE Trans. Power Apparatus and Sysys.,10(101): 4171-4177.

Magnusson, P.C., (1965), Transmission Lines and Wave Propagation , Allyn and Bacon, Boston.

Makram, E.B., Wrigght, C.L. ve Girgis, A.A., (1992), "A Harmonic Analysis of the Induction Watthour Meter's Registration Error", IEEE Trans. on Power Delivery, 7(3): 1080-1088.

Masoum, M.A.S., (1991), *Generation and Propagation of Harmonics in Power System Feeders Containing Nonlinear Loads*, Ph. D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering of University of Colorado, U.S.A.

Martinon, J., Fauquembergue, P., Lachaume, J. ve Meunier, M., (1996), "A New Statistical Approach of Harmonic Propagation in Transmission Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11 (2): 1032-1038.

Meliopoulos, A.P.S. ve Martin, M.A., (1992), "Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacity in the Presence of Harmonics", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2(7): 451-459.

Miller, Timothy J. E., ed., (1982), *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley and Sons, Inc., N.Y.

Mithulananthan, N., Canizares, C.A. ve Reeve, J., (1999), "Hopf Bifurcation Control in Power Systems Using Power System Stabilizers and Static Var Compensators", North American Power Symposium (NAPS), San Luis Obispo, California.

Ohtski, H., Yokoyama, A., Sekine, Y., (1991), "Reverse Action of on Load Tap Changer in Association with Voltage Collapse", 1(6): 300-306.

Ortmeyer, T.H., Chakravarthi, K.R. ve Mahmoud, A.A., (1985), "The Effects of Power Systems Harmonics on Power System Equipment and Loads", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 9(104): 2555-2563.

Pai, M.A., (1984), *Computer Techniques in Power System Analysis*, Tata Mc Graw-Hill Lth., 4th printing.

Pal, M.K., (1992), "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", *IEEE Trans. on Power Systems*, 1(7): 243-249.

Price, W.W., Wirgau, K.A., Murdoch, A., Mitsche, J.V., Vaahedi, E., El-Kadey, M.A., (1988), "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", *IEEE Trans. on Power Systems*, 1(3): 180-187.

Rashid, M.H., (1993), *Power Electronics*, Prentice Hall, New Jersey.

Sekine, Y. Ve Ohtsuki, H., (1990), "Cascaded Voltage Collapse", *IEEE Trans. on Power Systems*, 1(5): 250-256.

Shepherd, W. ve Zand, P., (1978), *Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits*, Cambridge University Press, London.

Shipp, D.D., (1979), "Harmonic Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", *IEEE Trans. on Industrial Application*, 5(15): 453-458.

Slow Transients Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, (1996), "Modeling and Analysis of Guidelines for Slow Transient – Part II, Controller Interactions; Harmonic Interactions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(11): 1672-1677.

Song, W., Heydt, G.T. ve Grady, W.M., (1984), "The Integration of HVDC Subsystems into the Harmonic Power Flow Algorithm", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS103 (8): 1953-1961.

Stevenson, W.D., (1988), Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill Ltd., 1988.

Stratford, R.P., (1980), "Harmonic Pollution on Power Systems – A Change in Philosophy, IEEE Trans. on Ind. Application, 1(16): 617-623.

Sttot, B. ve Tarkan O., (1970), Elektrik Enerji Şebekeleri Çözümlerinde Modern Metotlar, ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.24, Başnur Matbaası.

Tacer, E., (1990), Enerji Sistemlerinde Kararlılık , İTÜ Kütüphanesi Sayı 1407, E-E Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.

Taylor, C.W., (1992), Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, Inc.

Tranuchit, A., Thomas, R.J., (1988), "A Posturing Strategy Voltage Instability in Electric Power Systems", IEEE Transaction on Power Systems, 1(3): 87-93.

Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., Yumurtacı, R. And Tanrıöven M., "Harmonic and Resonance Conditions in Thyristor Controlled Reactor Circuits", ELECO'99 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 218-223.

Weedy, B.M., (1987), Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., 3th edition.

Venikov, V.A., Stroeve, V.A., Idelchick, V.A., Tarasov, V.A., (1975), "Estimation of Electric Power System Steady-State Stability in Load-Flow Calculation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 3(94): 1034-1041.

Wagner, V.E. ve IEEE Task Force, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery, 2(8): 672-680.

Williams, S.M., Brownfield, G.T. ve Duffus, J.W., (1993), "Harmonic Propagation on an Electric Distribution System: Field Measurements Compared with Computer Simulation, IEEE Transaction on Power systems, 2(8): 547-552.

Wood, Peter, (1981), Switching Power Converters; Van Nostrand Reinhold Company, N.Y.

Wourmas, C.D., (1993), "Voltage Stability as Effected by Static Load Characteristics", IEE Proceeding-C, 3(140): 221-228.

Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982a), "Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 101 (6): 1257-1265.

Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982b), "Harmonic Power Flow Studies Part II – Implementation and Practical Application, PAS 101 (6): 1266-121270.

Xu, W., Marti, J.R. ve Herman, W.D., (1991), "Harmonic Analysis of Systems with Static Compensators", IEEE Transactions on Power Systems with Static Compensators, 1(6): 183-190.

Yakubovich, V. A. ve Starzhiaskii, V. M., (1975) *Linear Differential Equations with Periodic Coefficients*; John Wiley and Sons; N.Y.

Yalçın, M.A., (1995), “Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yorino, N., Sasaki, H., Masuda, Y., Tamura, Y., Kitagawa, M., Oshima, A., (1992) “An Investigation of Voltage Instability Problems”, *IEEE Transaction on Power systems*, 2(7) : 600-611.

Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M. ve Kocatepe, C., (1996), “Design of Artificial Neural Networks for Nonsinusoidal Waveform Analysis”, *I. Symposium on Mathematical & Computational Applications*, 19-21 Nov. 1996, Manisa, 144-149.

Yumurtacı, R., Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Selamoğulları, U.S. ve Demir, A., (1998), “The Analysis of Harmonic Load Flow in the Low-Voltage Ring Networks”, *PEMC'98 8th International Power Electronic & Motion Control Conference*, 8-10 September 1998, Prague, 6: 194-198.

Yumurtacı, R., (2000), “Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simulasyonu”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Zimmerman, R.D. ve Chiang, H.D., (1995), “Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems”, *IEEE Trans. on Power Systems*, 10 (4): 2045-2052.

EK - 1

**HARMONİK GÜÇ AKIŞINA DAYALI GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ İÇİN
BİLGİSAYAR PROGRAMI YAZILIMI**


```
%-----
%   HARMONİK GÜÇ AKIŞINA DAYALI GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ
%   PROGRAMI
%
%   harmstability.m
%-----
```

```
%-----ALTPROGRAMLARIN TANITILMASI-----
%
```

```
% data.m      : Veri dosyasıdır.
% start.m     : Bara gerilim ve faz açıları için başlangıç değerleri tahmin edilir.
% ybara.m    : Temel bileşen ve harmonik bileşenleri için bara admitans matrisi(Ybara)
%             oluşturulur.
% nonakim.m  : Nonlineer yük akımları hesaplanır.
% hata.m     : Hata matrisleri (vektörleri) hesaplanır.
% jakob.m    : Jakobyen matrisi oluşturulur.
% tetav.m    : Jakobyen matris ve hata matrisi yardımı ile bara değişken matrisi eleman
%             değerleri güncelleştirilir.
% hybara.m   : Her bir harmonik bileşeni için Ybara matrisi hesaplanır.
% kararlilik.m : Gerilim kararlılık analizi yapılarak kritik değerler hesaplanır.
```

```
clear
iter=0;
KPQ=1;
kontrol=0;
data
start
ybara
while ~ kontrol
nonakim
hata
jakob
tetav
end
save data
kararlilik
```

```
%----- data.m -----
```

```
%----- GENEL AÇIKLAMALAR-----
```

```
% ny ..... : Lineer yük barası sayısı
% nn ..... : Non-lineer yük barası sayısı
% ng ..... : Generatör barası sayısı
% n ..... : Toplam bara sayısı (n=1+ny+nn)
% nhata ..... : Hat sayısı
% nzseri ..... : Seri empedans sayısı
% nzshunt ..... : Paralel empedans sayısı
% ntrf..... : Transformator sayısı
% maxiter ..... : Maksimum iterasyon sayısı
% tolerans ..... : Tolerans (% olarak)
```

```

% Nh ..... : Maksimum harmonik sayısı
% harm ..... : Harmonik mertebeleri dizisi (Nh boyutlu)
% m1 ..... : İlk nonlinear yük barası
% Psp ..... : Baralar için önceden bilinen aktif güç değerleri matrisi
% Qsp ..... : Baralar için önceden bilinen reaktif güç değerleri matrisi
% ilg ..... : Gerilim kararlılığı incelenecek olan bara no
% isal ..... : Salınım bara no
%
%----- GENEL VERİLERİN GİRİLMESİ -----
%
ny=2;
nn=1;
ng=1;
nhat=4;
nzseri=0;
nzshunt=0;
ntrf=0;
maxiter=250;
tolerans=1e-5;
Nh=2;
harm=[1 5];
ilg=4;
isal=1;
% bara no :1 (gen), 2.....m1-1:lineer, m1...n: nonlinear
n=1+ny+nn;
%
%----- ÖNCEDEDEN BİLİLEN GÜÇ VE GERİLİM DEĞERLERİNİN GİRİLMESİ -----
%
% Linear yük baralarına (1...ny), generatör terminal baralarına (ny+1...m-1)
% ve nonlinear yük baralarına (m...nb) ait aktif ve reaktif güç değerleri
%
Psp=[1e-12 0.1 1e-12 0.25];
Qsp=[1e-12 0.1 1e-12 0.1];
%
% Nonlinear yük akımlarının temel ve harmonik bileşenlerine ait katsayıların girilmesi
%
% ggr(ii)(hh)=toplam(vv=1..Nh)(b(ii)(vv)*[V(ii)(vv)^nv(ii)(vv)]*cos(c(ii)(vv)*(teta(ii)(vv))
% ggi(ii)(hh)=toplam(vv=1..Nh)(b(ii)(vv)*[V(ii)(vv)^nv(ii)(vv)]*sin(c(ii)(vv)*(teta(ii)(vv))
%
% harmonik gerilimlerin katsayılar matrisi
%
%b=(1e-12)*[0.3 0.3 ];
%b=[0.1 0.1 ];
%b=[0.2 0.2 ];
b=[0.3 0.3 ];
%b=[0.4 0.4 ];
%b=[0.5 0.5 ];
%b=[0.6 0.6 ];
%b=[0.7 0.7 ];
%b=[0.8 0.8 ];
%b=[0.9 0.9 ];
%b=[1.0 1.0 ];

```

```

%b=[1.5 1.5 ];
%
% harmonik gerilimlerinin üslerine ait katsayılar matrisi
%
    nv=[3 2];
%
% harmonik gerilimlerinin faz açalarına ait katsayılar matrisi
%
    c=[3 2];
%
% -----GÜÇ SİSTEM ELEMANLARI İLE İLGİLİ VERİLERİN GİRİLMESİ-----
%
% -----HATLARA AİT SERİ EMPEDANS-PARALEL ADMİTANS VERİLERİ-----
%
% hatların seri empedansları
%
    zh1=[0.01+j*0.01 0.02+j*0.08 0.01+j*0.02 0.01+j*0.02];
%
% hatların paralel admitansları
%
    Bh1=2*j*(1e-4)*[2.1125 4*2.1125 2*2.1125 2*2.1125];
%
% Seri endüktans veya kapasitelere ait empedans verileri
%
    Zseri=[ ];
%
% Paralel endüktans veya kapasitelere ait empedans verileri
%
    Zshunt=[ ];
%
% Transformator empedansları (kısa devre empedansı) " (a+j*b) olarak "
%
    Ztrf=(1e-9)*j*[0.0533 0.12 0.16];
%
% ----- ŞEBEKE BAĞLANTI MATRİSİNİN GİRİLMESİ -----
%
%
% Eleman kodları
% -----
% HATLAR ..... = 1 ... 100
% TRANSFORMATÖRLER ..... =101 ... 200
% SERİ EMPEDANSLAR ..... =201 ... 300
% PARALEL EMPEDANSLAR ..... =301 ... 400
% GENERATÖRLER ..... =401 ... 500
%
    Nconnect(1,2)=1;
    Nconnect(2,3)=2;
    Nconnect(3,4)=3;
    Nconnect(1,4)=4;
%
% matrisin tamamlanması
%
    Nconnect(2,1)=1;

```

```

Nconnect(3,2)=2;
Nconnect(4,3)=3;
Nconnect(4,1)=4;
%
%-----start.m altprogramı-----
%
n=1+ny+nn;
m1=2+ny;
%
% Yük baralarının ve generatör terminal baralarının gerilim ve açıları
%
for hh=1:Nh,
    s=n*(hh-1);
for k=1:n,
if hh==1
    V(k)=1;
end
if hh~=1
    V(s+k)=0.1;
end
    teta(s+k)=0;
end
end
    V=abs(V);
%
% Nonlinear baralardaki akımların açıları (Gama) için ilk değerlerin girilmesi ----
%
    Gama=(1e-9)*ones(Nh*n);
%
% Nonlinear baralardaki Alfa ve Beta değerlerinin girilmesi
%
for ii=m1:n,
    Alfa(ii)=0;
    Beta(ii)=0;
end

%-----ybara.m altprogramı-----
%
Ybara=(1e-10)*ones(n);
%
% Temel bileşen için Ybara matrisinin oluşturulması
%
hh=1;
hybara
Y=Ybara;
%
% Harmoniklere ait Ybara matrislerinin oluşturulması
%
for hh=2:Nh,
tzybara5
Y=[Y;Ybara];
end

```

```

Y1=abs(Y);
yteta=angle(Y);
%
% ----- hybara.m altprogramı -----
%
% HATLAR
% hatların seri empedansları
%
    hzh1=real(zh1)+j*harm(hh)*imag(zh1);
%
% hatların paralel admitansları
%
    hBh1=real(Bh1)+j*imag(Bh1)*harm(hh);
for ii=1:nhat,
    Ych1=hBh1(ii);
    Yh1=inv(hzh1(ii));
    Ychat(ii)=Ych1;
    Yhat(ii)=Yh1;
end
%
% Seri endüktans veya kapasitelere ait empedans verileri "(a+j*b) olarak "
%
    hZseri=real(Zseri)+j*harm(hh)*imag(Zseri);
for ii=1:nzseri,
    Yseriabc=inv(hZseri(ii));
    Yseri(ii)=Yseriabc;
end
%
% Paralel endüktans veya kapasitelere ait empedans verileri "(a+j*b) olarak "
%
    hZshunt=real(Zshunt)+j*harm(hh)*imag(Zshunt);
for ii=1:nzshunt,
    Yshabc=inv(hZshunt(ii));
    Yshunt(ii)=Yshabc;
end
%
% TRANSFORMATÖRLER
%
    hZtrf=real(Ztrf)+j*harm(hh)*imag(Ztrf);
%
% TEMEL BİLEŞEN (hh=1) VE HARMONİKLER (hh=2,3,...) İÇİN Y-BARA
% MATRİSİNİN OLUŞTURULMASI
%
for ii=1:n,
    Ybara(ii,ii)=(1e-10);
for kk=1:n,
%
% HATLAR
%
if Nconnect(ii,kk)>=1 & Nconnect(ii,kk)<101
    hatno=Nconnect(ii,kk);
if ii~=kk

```

```

Ybara(ii,kk)=-Yhat(hatno);
Ybara(kk,ii)=-Yhat(hatno);
Ybara(ii,ii)=Ybara(ii,ii)+Yhat(hatno)+0.5*Ychat(hatno);
end
end
%
% Seri endüktans veya kapasiteler
%
if Nconnect(ii,kk)>=201 & Nconnect(ii,kk)<301
    seriLCno=Nconnect(ii,kk)-200;
if ii~=kk
    Ybara(ii,kk)=-Yseri(seriLCno);
    Ybara(kk,ii)=Ybara(h3:h3+2,qq:qq+2);
    Ybara(ii,ii)=Ybara(ii,ii)+Yseri(seriLCno);
end
end
%
% Paralel endüktans veya kapasiteler
%
if Nconnect(ii,kk)>=301 & Nconnect(ii,kk)<401
    shuntno=Nconnect(ii,kk)-300;
if ii==kk
    Ybara(ii,ii)=Ybara(ii,ii)+Yshunt(shuntno);
end
end
end
end
%
% TRANSFORMATÖRLER
%
for ii=1:n,
for kk=ii:n,
if Nconnect(ii,kk)>=101 & Nconnect(ii,kk)<201
    trfno=Nconnect(ii,kk)-100;
if ii~=kk
    Ybara(ii,kk)=-hZtrf(trfno);
    Ybara(kk,ii)=-hZtrf(trfno);
    Ybara(ii,ii)=Ybara(ii,ii)+hZtrf(trfno);
end
end
end
end
if hh>=2
for ii=1,
    Ybara(ii,ii)=Ybara(ii,ii)+inv((1e-4)*j*harm(hh));
end
end
%
% ----- nonakim.m altprogramı -----
%
% Nonlineer baralar için gr(ii) ve gi(ii)'in hesaplanması
%
```

```

for hh=1:Nh,
    s=n*(hh-1);
for ii=m1:n,
if hh==1
    Gama(ii)=teta(ii)-atan(Qsp(ii)/Psp(ii));
elseif hh>=2 & iter==0

    Gama(s+ii)=0;
else
if hh>=2 & iter>=1
    Gama(s+ii)=teta(s+ii)-atan(Q(s+ii)/P(s+ii));
end
end
end
end
for ii=m1:n,
ggr(ii)=Psp(ii)*cos(Gama(ii))/(V(ii)*cos(teta(ii)-Gama(ii)));
ggi(ii)=Psp(ii)*sin(Gama(ii))/(V(ii)*cos(teta(ii)-Gama(ii)));
end
%
% Nonlineer yük akımlarının harmonik bileşenlerinin hesaplanması
%
for hh=2:Nh,
    sh=n*(hh-1);
for ii=1:nn,
    hp=nn*(hh-2)+ii;
    ggr(sh+m1-1+ii)=0;
    ggi(sh+m1-1+ii)=0;
for vv=1:Nh,
    vp=vv;
    sv=n*(vv-1);
    ggr(sh+m1-1+ii)=ggr(sh+m1-1+ii)+
    b(hp,vp)*(V(sv+m1-1+ii)^nv(hp,vp))*cos(c(hp,vp)*teta(sv+m1-1+ii));
    ggi(sh+ii+m1-1)=ggi(sh+m1-1+ii)+
    b(hp,vp)*(V(sv+m1-1+ii)^nv(hp,vp))*sin(c(hp,vp)*teta(sv+m1-1+ii));
end
end
end
%
% Temel bileşen için Pt ve Qt'nin hesaplanması
%
for hh=2:Nh,
    s=n*(hh-1);
for ii=m1:n,
    II(s+ii)=ggr(s+ii)/cos(Gama(s+ii));
    Pt(s+ii)=abs(II(s+ii))*abs(V(s+ii))*cos(teta(s+ii)-Gama(s+ii));
    Qt(s+ii)=abs(II(s+ii))*abs(V(s+ii))*sin(teta(s+ii)-Gama(s+ii));
end
end
for ii=m1:n,
    Ptharm(ii)=Psp(ii);Qtharm(ii)=Qsp(ii);
for hh=2:Nh,

```

```

s=n*(hh-1);
Ptharm(ii)=Ptharm(ii)+Pt(s+ii);
Qtharm(ii)=Qtharm(ii)+Qt(s+ii);
end
end
%
%Temel bileşen ve harmoniklere ait Ir(ii) ve Ii(ii)'nin hesaplanması
%
for hh=1:Nh,
s=n*(hh-1);
for ii=1:n,
Iir(s+ii)=1e-12;ggr(s+ii)=1e-12;
Iii(s+ii)=1e-12;ggi(s+ii)=1e-12;
h=s+ii;
for k=1:n,
Iir(s+ii)=Iir(s+ii)+V(s+k)*Y1(h,k)*cos(teta(s+k)+yteta(h,k));
Iii(s+ii)=Iii(s+ii)+V(s+k)*Y1(h,k)*sin(teta(s+k)+yteta(h,k));
ggr(s+ii)=ggr(s+ii)-V(s+k)*Y1(h,k)*cos(teta(s+k)+yteta(h,k));
ggi(s+ii)=ggi(s+ii)-V(s+k)*Y1(h,k)*sin(teta(s+k)+yteta(h,k));
end
end
end
%
% ----- hata.m altprogramı -----
%
% P(i)ve Q(i)'nin hesaplanması
%
for hh=1:Nh,
s=n*(hh-1);
for ii=1:n,
P(s+ii)=0;
Q(s+ii)=0;
h=s+ii;
for k=1:n,
q=k;
x=teta(s+ii)-teta(s+k)-yteta(h,q);
P(s+ii)=P(s+ii)+V(s+ii)*V(s+k)*Y1(h,q)*cos(x);
Q(s+ii)=Q(s+ii)+V(s+ii)*V(s+k)*Y1(h,q)*sin(x);
end
end
end
% deltaP(i) ve deltaQ(i)'nin hesaplanması
% Linear baralar için deltaP(i) ve deltaQ(i)'nin hesaplanması
%
for ii=2:m1-1,
deltaP(ii-1)=Psp(ii)+P(ii);
deltaQ(ii-1)=Qsp(ii)+Q(ii);
end
%
% Nonlinear baralar için deltaP(i) ve deltaQ(i)'nin hesaplanması
%
for ii=m1:n,

```



```

Pharm(ii)=0;Qharm(ii)=0;
deltaP(ii-1)=Psp(ii)+P(ii);
deltaQ(ii-1)=Qsp(ii)+Q(ii);
for hh=1:Nh,
    s=n*(hh-1);
    Pharm(ii)=Pharm(ii)+P(s+ii);
    Qharm(ii)=Qharm(ii)+Q(s+ii);
end
end
for ii=m1:n,
    deltaP(ii-1)=Psp(ii)+Pharm(ii);
    deltaQ(ii-1)=Qsp(ii)+Qharm(ii);
end
%
% deltaP ve deltaQ'nun sütun matris haline getirilmesi
%
    delP=conj((deltaP)');
    delQ=conj((deltaQ)');
%
% deltaI(i)'nin hesaplanması (Temel bileşen için)
%
for ii=m1:n,
    deltaI1((ii-m1)+1,1)=IIr(ii)+ggr(ii);
    deltaI1(nn+ii-m1+1,1)=IIi(ii)+ggi(ii);
end
%
% Harmoniklere ait deltaI(i)'nin hesaplanması
%
for hh=2:Nh,
    s=n*(hh-1);
    s2=2*n*(hh-2);
for ii=1:n,
    if ii<=(m1-1)
        delta2I(s2+ii,1)=IIr(s+ii);
        delta2I(s2+n+ii,1)=IIi(s+ii);
    elseif ii>=m1
        delta2I(s2+ii,1)=IIr(s+ii)+ggr(s+ii);
        delta2I(s2+n+ii,1)=IIi(s+ii)+ggi(s+ii);
    end
end
    deltaI=[deltaI1;delta2I];
end
%
% delM hata vektörünün oluşturulması
%
    delM=[delP;delQ;deltaI];
    ITERASYON=iter;
    HATA=max(abs(delM));
%
% Yakınsama olup olmadığının kontrol edilmesi
%
if all(abs(delM)<=tolerans)

```

```

K PQ=0; bitir=1;
disp('YAKINSAMA SAĞLANDI');
end
%
% ----- jakob.m altprogramı -----
%
% J11,J12,J21 ve J22 jakobyen altmatrisinin hesaplanması
%
for hh=1:Nh,
    s=n*(hh-1);
    for ii=2:n,
        h=s+ii;
        h1=ii-1;
        ks=1;
    if hh==1
        ks=2;
    end
    for k=ks:n,
        q1=(k-1);
        q1a=k;
        q=s+k;
        x=teta(s+ii)-teta(s+k)-yteta(h,q1a);
        q2=(n-1)+n*(hh-2)+k;
    if hh==1
        J11(h1,q1)=V(ii)*V(k)*Y1(h,q)*sin(x);
        J12(h1,q1)=V(ii)*Y1(h,q)*cos(x);
        J21(h1,q1)=-V(k)*V(ii)*Y1(h,q)*cos(x);
        J22(h1,q1)=V(ii)*Y1(h,q)*sin(x);
    if ii==k
        for ia=1:n,
            toppteta=0;
            toppv=0;
            topqteta=0;
            topqv=0;
            for ja=1:n,
                if ia~=ja
                    toppteta=toppteta-V(ia)*V(ja)*Y1(ia,ja)*sin(teta(ia)-teta(ja)-yteta(ia,ja));
                    toppv=toppv+V(ja)*Y1(ia,ja)*cos(teta(ia)-teta(ja)-yteta(ia,ja))
                    +2*V(ia)*Y1(ia,ia)*cos(-yteta(ia,ia));
                    topqteta=topqteta+V(ia)*V(ja)*Y1(ia,ja)*cos(teta(ia)-teta(ja)-yteta(ia,ja));
                    topqv=topqv+V(ja)*Y1(ia,ja)*sin(teta(ia)-teta(ja)-yteta(ia,ja))
                    +2*V(ia)*Y1(ia,ia)*sin(-yteta(ia,ia));
                end
            end
            J11(h1,q1)=toppteta;
            J12(h1,q1)=toppv;
            J21(h1,q1)=topqteta;
            J22(h1,q1)=topqv;
        end
    end
end
end
if hh~=1

```

```

J11(h1,q2)=1e-12;
J12(h1,q2)=1e-12;
J21(h1,q2)=1e-12;
J22(h1,q2)=1e-12;
end
if ii>=m1 & h>=2
    J11(h1,q2)=V(s+ii)*V(s+k)*Y1(h,q1a)*sin(x);
    J12(h1,q2)=V(s+ii)*Y1(h,q1a)*cos(x);
    J21(h1,q2)=-V(s+k)*V(s+ii)*Y1(h,q1a)*cos(x);
    J22(h1,q2)=V(s+ii)*Y1(h,q1a)*sin(x);
if ii==k
for ia=1:n,
    toppteta=0;
    toppv=0;
    topqteta=0;
    topqv=0;
for ja=1:n,
if ia~=ja
    toppteta=toppteta-V(s+ia)*V(s+ja)*Y1(s+ia,ja)*sin(teta(s+ia)-teta(s+ja)-yteta(s+ia,ja));
    toppv=toppv+V(s+ja)*Y1(s+ia,ja)*cos(teta(s+ia)-teta(s+ja)-yteta(s+ia,ja))+2*V(s+ia)*Y1(s+ia,ia)*cos(-yteta(s+ia,ia));
    topqteta=topqteta+V(s+ia)*V(s+ja)*Y1(s+ia,ja)*cos(teta(s+ia)-teta(s+ja)-yteta(s+ia,ja));
    topqv=topqv+V(s+ja)*Y1(s+ia,ja)*sin(teta(s+ia)-teta(s+ja)-yteta(s+ia,ja))+2*V(s+ia)*Y1(s+ia,ia)*sin(-yteta(s+ia,ia));
end
end
    J11(h1,q2)=toppteta;
    J12(h1,q2)=toppv;
    J21(h1,q2)=topqteta;
    J22(h1,q2)=topqv;
end
end
end
end
end
end
    J13=(1e-12)*ones(n-1,2*nn);
    J23=(1e-12)*ones(n-1,2*nn);
%
% J31 ve J32 jakobyen alt matrislerinin oluşturulması
%
% hh=1, v=1...L için J31 ve J32'nin oluşturulması
    hh=1;
for vv=1:Nh,
    s=n*(vv-1);
for ii=m1:n,
    h1=ii;
    nm=1;
if vv==1
    nm=2;
end
for k=nm:n,

```

```

    q1=k-1;
    q2=(n-1)+n*(vv-2)+k;
    YtetaR=1e-12; YtetaI=1e-12;
    YVR=1e-12; YVI=1e-12;
    x=teta(k)+yteta(h1,k);
    if hh==vv
        YtetaR=-V(k)*Y1(h1,k)*sin(x);
        YtetaI=V(k)*Y1(h1,k)*cos(x);
        YVR=Y1(h1,k)*cos(x);
        YVI=Y1(h1,k)*sin(x);
    end
    GtetaR=1e-12; GtetaI=1e-12;
    GVR=1e-12; GVI=1e-12;
    if k>=m1 & ii==k & hh==vv
        GtetaR=-Psp(k)*sin(Gama(k))/(V(k)*cos(teta(k)-Gama(k)));
        GtetaI=Psp(k)*cos(Gama(k))/(V(k)*cos(teta(k)-Gama(k)));
        GVR=-Psp(k)*cos(Gama(k))/((V(k)^2)*cos(teta(k)-Gama(k)));
        GVI=-Psp(k)*sin(Gama(k))/((V(k)^2)*cos(teta(k)-Gama(k)));
    end
    if hh==1
        GtetaR=-YtetaR;
        GtetaI=-YtetaI;
        GVR=-YVR;
        GVI=-YVI;
    end
    q12=q2;
    if vv==1
        q12=q1;
    end
    J31a(ii-m1+1,q12)=YtetaR+GtetaR;
    J31a(nn+ii-m1+1,q12)=YtetaI+GtetaI;
    J32a(ii-m1+1,q12)=YVR+GVR;
    J32a(nn+ii-m1+1,q12)=YVI+GVI;
end
end
end
%
% hh=2...L, vv=1...L için J31 ve J32'nin oluşturulması
%
for hh=2:Nh,
for vv=1:Nh,
    vp=nn*(vv-1);
    sv=n*(vv-1);
    nm=1;
    if vv==1
        nm=2;
    end
    for ii=1:n,
        hp=nn*(hh-2)+ii-m1+1;
        vp=vv;
        h=n*(hh-1)+ii;
    for k=nm:n

```

```

q1=k-1;
q2=(n-1)+n*(vv-2)+k;
x=teta(sv+k)+yteta(h,k);
YtetaR=1e-12; YtetaI=1e-12;
YVR=1e-12; YVI=1e-12;
if hh==vv
YtetaR=-V(sv+k)*Y1(h,k)*sin(x);
YtetaI=V(sv+k)*Y1(h,k)*cos(x);
YVR=Y1(h,k)*cos(x);
YVI=Y1(h,k)*sin(x);
end
GtetaR=1e-12; GtetaI=1e-12;
GVR=1e-12; GVI=1e-12;
if k>=m1 & ii==k
GtetaR=-c(hp,vp)*b(hp,vp)*V(sv+ii)^(nv(hp,vp))*sin(c(hp,vp)*teta(sv+ii));
GtetaI=c(hp,vp)*b(hp,vp)*V(sv+ii)^(nv(hp,vp))*cos(c(hp,vp)*teta(sv+ii));
GVR=b(hp,vp)*V(sv+ii)^(nv(hp,vp)-1)*cos(c(hp,vp)*teta(sv+ii));
GVI=b(hp,vp)*V(sv+ii)^(nv(hp,vp)-1)*sin(c(hp,vp)*teta(sv+ii));
end
q12=q2;
if vv==1
q12=q1;
end
YGteta(2*n*(hh-2)+ii,q12)=YtetaR+GtetaR;
YGteta(2*n*(hh-2)+n+ii,q12)=YtetaI+GtetaI;
YGV(2*n*(hh-2)+ii,q12)=YVR+GVR;
YGV(2*n*(hh-2)+n+ii,q12)=YVI+GVI;
end
end
end
end
J31=[J31a;YGteta];
J32=[J32a;YGV];
%
%J33 Jakobyen alt matrisinin oluşturulması
%
hh=1;
for ii=m1:n,
h1=ii-m1+1;
for k=m1:n,
q1=k-m1+1;
Halfa(h1,q1)=1e-12;Hbeta(h1,q1)=1e-12;
if hh==1 & ii==k
Halfa1(h1,q1)=10;
Halfa1(nn+h1,q1)=20;
Hbeta1(h1,q1)=30;
Hbeta1(nn+h1,q1)=15;
end
end
end
Halfa=[Halfa1;(1e-12)*ones(2*n*(Nh-1),nn)];
Hbeta=[Hbeta1;(1e-12)*ones(2*n*(Nh-1),nn)];

```

```

J33=[Halfa,Hbeta];
%
% ----- tetav.m altprogramı -----
%
deltetaV=inv([J11 J12 J13;J21 J22 J23;J31 J32 J33])*delM;
J11=0;J12=0;J13=0;J21=0;J22=0;J23=0;J31=0;J32=0;J33=0;
for hh=1:Nh,
    s=n*(hh-2)+n-1;
    s1=n*(hh-1);
    nm=n;
    if hh==1
        s=0;nm=n-1;
    end
    for ii=1:nm,
        sira=(n-1+n*(Nh-1));
        h=s+ii;
        if hh~=1
            teta(s1+ii)=teta(s1+ii)-deltetaV(h);
            V(s1+ii)=V(s1+ii)-deltetaV(sira+n-1+ii);
        end
        if hh==1
            teta(ii+1)=teta(ii+1)-deltetaV(h);
            V(ii+1)=V(ii+1)-deltetaV(sira+ii);
        end
    end
    end
    end
    sira1=2*sira;sira2=sira1+nn;
    for ii=m1:n,
        h=ii-m1+1;
        Alfa(ii)=Alfa(ii)-deltetaV(sira1+h);
        Beta(ii)=Beta(ii)-deltetaV(sira2+h);
    end
    %
    % eğer gerilimin değeri (-) ise açı, pi kadar kaydırılıyor
    %
    for ii=1:n*Nh,
        if V(ii)<0
            teta(ii)=teta(ii)+pi;
        end
    end
    %
    % eğer açılar 2pi'den daha büyük ise, 2pi kadar 0.....2pi arasına getiriliyor
    %
    for ii=1:Nh*n,
        kats1=teta(ii)/(2*pi);
        kats2=fix(kats1);
        teta(ii)=teta(ii)-kats2*2*pi;
        if teta(ii)>pi
            teta(ii)=-2*pi+teta(ii);
        end
    end
    end
    V=abs(V);

```

```

iter=iter+1;
if iter>=maxiter
    bitir=1
    disp('çözüm yoktur');
    disp([iter HATA]);
end
%
% ----- kararlilik.m altprogramı -----
%
for hh=1:Nh,
    Ybarah=Y(n*(hh-1)+1:n*(hh-1)+n,:);
    %
    % Sistemde ilgilenilen bara ve salınım barası dışındaki 2. ve 3. baralardaki aktif
    % ve reaktif güçler, bara gerilimleri kullanılarak şönt admitanslara dönüştürülür
    for kk=1:n,
        if kk~=ilg | kk~=isal | (abs(P(n*(hh-1)+kk)<1e-9) & abs(Q(n*(hh-1)+kk)<1e-9))
            Skkh=sqrt(P(n*(hh-1)+kk)^2+Q(n*(hh-1)+kk)^2);
            Fiikkh=atan(Q(n*(hh-1)+kk)/P(n*(hh-1)+kk));
            zkkh=((V(n*(hh-1)+kk)^2)/(Skkh))*exp(i*Fiikkh);
            ykkh=(1/zkkh);
        %
        % Burada elde edilen şönt elemanlar akım yönleride gözönüne alınarak orjinal bara
        % admitans matrisine katılırlar
        %
        Ybarah(kk,kk)=Ybarah(kk,kk)+ykkh;
    if hh>1 & kk>(ny+1)
        Ybarah(kk,kk)=Ybarah(kk,kk)-ykkh;
    end
end
%
% Yeni Ybara matrisi oluşturulur
%
Ybarahh=Ybarah;
%
% 1. satır ve sütun gerilim kararlılığı incelenen bara
% 2. satır ve sütun salınım barası değerleri
%
Bh=Ybarahh;
Bh(1,:)=Ybarahh(ilg,:);
Bh(ilg,:)=Ybarahh(1,:);
    Ybarahh=Bh;
Bh(:,1)=Ybarahh(:,ilg);
Bh(:,ilg)=Ybarahh(:,1);
    Ybarahh=Bh;
if isal==1
    isal=ilg;
end
Bh(2,:)=Ybarahh(isal,:);
Bh(isal,:)=Ybarahh(2,:);
    Ybarahh=Bh;
Bh(:,2)=Ybarahh(:,isal);
Bh(:,isal)=Ybarahh(:,2);

```

```

    Ybarahh=Bh;
    Ah=Ybarahh(1:2,1:2);
    Bh=Ybarahh(1:2,3:n);
    Ch=Ybarahh(3:n,1:2);
    Dh=Ybarahh(3:n,3:n);
    Ybarahh=Ah-Bh*inv(Dh)*Ch;
    y12h=-(Ybarahh(1,2));
    z12h=1/y12h;
    y1uh=Ybarahh(1,1)-y12h;
    y2uh=Ybarahh(2,2)-y12h;
    A1h=1+z12h*y1uh;
    B1h=z12h;
    C1h=y1uh+y2uh*(1+z12h*y1uh);
    D1h=1+z12h*y2uh;
    Fiiilgh=atan(Q(n*(hh-1)+ilg)/P(n*(hh-1)+ilg));
    K1h=real(A1h)*(imag(B1h)-
    real(B1h)*tan(Fiiilgh))+imag(A1h)*(real(B1h)+imag(B1h)*tan(Fiiilgh));
    K2h=real(A1h)*(real(B1h)+imag(B1h)*tan(Fiiilgh))+imag(A1h)*(-
    imag(B1h)+real(B1h)*tan(Fiiilgh));
    K1h=abs(K1h);
    K2h=abs(K2h);
    Deltakilgh=(pi/4)+(1/2)*(atan(K2h/(-K1h)));
    K3h=real(B1h)*cos(Deltakilgh)+imag(B1h)*sin(Deltakilgh);
    K4h=real(A1h)*cos(Deltakilgh)+imag(A1h)*sin(Deltakilgh);
    K3h=abs(K3h);
    K4h=abs(K4h);
    Vkilgh=V(isal)/(2*K4h);
    Pkilgh=(V(isal)^2)*(2*K3h*K4h-(real(A1h)*real(B1h)+
    imag(A1h)*imag(B1h)))/(4*(K4h^2)*((real(B1h)^2)+(imag(B1h)^2)));
if hh>1
    Iilgh=(P(n*(hh-1)+ilg)*cos(Fiiilgh))/(V(n*(hh-1)+ilg));
    Visalh=A1h*V(n*(hh-1)+ilg)*(cos(teta(n*(hh-1)+ilg))+
    i*sin(teta(n*(hh-1)+ilg)))+B1h*Iilgh;
    Visalh=abs(Visalh);
    Vkilgh=Visalh/(2*K4h);
    Pkilgh=(Visalh^2)*(2*K3h*K4h-(real(A1h)*real(B1h)+
    imag(A1h)*imag(B1h)))/(4*(K4h^2)*((real(B1h)^2)+(imag(B1h)^2)));
end
end
    k=b
    disp([' kritikaçı, kritikgerilim, kritikgüç'])
    disp([Deltakilgh,Vkilgh,Pkilgh])
end

```


Ek 2 Rezonans Analizi için Yazılan Bilgisayar Programları

```

%
% Çizelge 5.1'in oluşturulmasında kullanılan program
%
clear
Xs=0.082;
Xr=0.6;
Xc=2.0;
tolerans=2.6e-3;
f=50;
Lr=Xr/(2*pi*f);
Xes=Xr*Xs/(Xr+Xs);
Woa=sqrt(Xc/Xs);
Wou=sqrt(Xc/Xes);
a=fix(Woa);
b=fix(Wou);
if a~=b
    h=0;
for ii=a:b,
    k1=ii/2;
    k2=fix(k1);
if abs(k1-k2)>0
    h=h+1;
    harmonik(h)=ii;
end
end
end
    Woa,Wou,harmonik
for jj=1:h,
for sigma=0:180,
    sigmarad=sigma*pi/180;
    Lrh(h,sigma+1)=Lr*pi/(sigmarad-(sin(harmonik(h)*sigmarad)/harmonik(h)));
    XLrh(h,sigma+1)=2*pi*f*harmonik(h)*Lrh(h,sigma+1);
    Xsh=harmonik(h)*Xs;
    Xch=Xc/harmonik(h);
    Xesh=Xsh*XLrh(h,sigma+1)/(Xsh+XLrh(h,sigma+1));
if abs(Xesh-Xch)< tolerans
%
    disp('***** rezonans var! *****')
%
    harmonik(h),sigma
end
end
end

```

% Çizelge 5.2'nin oluşturulmasında kullanılan program
%

```

clear
Xs=0.082;
Xr=0.6;
Xc=2.0;
tolerans=2e-2;
f=60;
w=2*pi*f;
Lr=Xr/w;
Ls=Xs/w;
C=1/(w*Xc);
alfa=sqrt(1/(Ls*C)+1/(Lr*C));
beta=sqrt(1/(Ls*C));
Xes=Xr*Xs/(Xr+Xs);
Woa=sqrt(Xc/Xs);
Wou=sqrt(Xc/Xes);
a=fix(Woa);
b=fix(Wou);
if a~=b
    h=0;
    for ii=a:b,
        k1=ii/2;
        k2=fix(k1);
        if abs(k1-k2)>0
            h=h+1;
            harmonik(h)=ii;
        end
    end
end
Woa,Wou,harmonik
for jj=1:h,
    for sigma=0:180,
        sigmarad=sigma*pi/180;
        delta1=alfa*sigmarad/W;
        delta2=beta*(pi-sigmarad)/W;
        if 2*cos(delta1)*cos(delta2)-
            ((beta/alfa)-(alfa/beta))*sin(delta1)*sin(delta2)+2< tolerans
            %
            disp('***** rezonans olan noktalar! *****')
            %
            sigma
        end
    end
end
end

```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	12.10.1970	
Doğum yeri	Boyabat	
Lise	1984-1987	Boyabat Lisesi
Lisans	1987-1991	Yıldız Teknik Üniversitesi Elk.-Elektronik Fak. Elk. Müh. Bölümü (Bölüm Birincisi olarak)
Yüksek Lisans	1995-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı
Doktora	1997-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1991-1995	Özel Şirket
1995-Devam ediyor	YTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında Araş. Gör.