

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ  
ve  
BU HARMONİKLERİN  
ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE  
BELİRLENMESİ ve DEĞERLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Y.Müh.Nuran YÖRÜKEREN

Ana Bilim Dalı : Elektrik  
Programı : Elektrik Tesisleri

Mayıs, 1994

38932

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ  
ve  
BU HARMONİKLERİN  
ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE  
BELİRLENMESİ ve DEĞERLENDİRİLMESİ

38932

DOKTORA TEZİ

Y.Müh.Nuran YÖRÜKEREN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 1993  
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Mayıs 1994

Tez Danışmanı  
Prof.Dr.Ahmet URAL  
(.....)

Üye  
Prof.Dr.Nesrin TARKAN  
(.....)

Üye  
Prof.Dr.Hüseyin ÇAKIR  
(.....)

Mayıs, 1994

# **GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ ve BU HARMONİKLERİN ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE BELİRLENMESİ ve DEĞERLENDİRİLMESİ**

Nuran YÖRÜKEREN

**Anahtar Kelimeler:** Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Kaynaklar ve Analizi, Etkileri, Elektrik Ulaşım Sistemlerindeki Harmoniklerin Modellemesi ve Simülasyonu

**Özet :** Giriş gücünü sinüs biçiminde bir elektrik sisteminden alan, lineer olmayan  $V - I$  karakteristikli donanımlar, harmonik akımları ve gerilimleri güç sistemlerine katarlar. Harmonikler diye adlandırılan bu bozucu etkiler, şebekelerde ve haberleşme sistemlerinde önemli karışıklıklara neden olurlar.

Tezde, önce güç sistem harmonikleri teorik olarak ele alınmış, daha sonra modern elektrikli ulaşım sistemlerinde örneklerle değerlendirilmiştir. İncelenen örneklerde, simülasyon sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

Harmoniklerin giderek artan ölçülerde şebekeleri olumsuz olarak etkilemesi bu konu ile ilgili çalışmalarını aynı oranda artırmıştır. Bu nedenle bu çalışmaya gereksinim duyulmuş ve daha sonraki bilimsel araştırmalara yardımcı olması amaçlanmıştır.

**POWER SYSTEM HARMONICS ,  
DETERMINING and EVALUATING THESE HARMONICS  
in ELECTRICAL TRANSPORTATION SYSTEMS**

Nuran YÖRÜKEREN

**Keywords** : Harmonics Sources in Power Systems and Analysis , Effects, Modelling and Simulating of Harmonics in Electrical Transportation Systems.

**Abstract** : Nonlinear hardwares which have  $V - I$  characteristic and consume the input power from a sinusoidal shaped electrical system convey harmonic currents and voltages to the power systems. These distortions called harmonics cause important disturbances in network and communication systems.

In the thesis , firstly power systems harmonics are covered theoretically then are evaluated by samples in modern electrical transportation systems. In the samples examined , simulation and test results are compared.

Because of increasing disturbances of harmonics in the networks , the studies on the area are proportionally increased. So such a study is needed and aimed to help other researches in this area.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerji üretimi , iletimi ve tüketimi sırasında meydana gelen bozulmalar , güç sistemlerindeki harmonikler olarak günümüzde önemli bir çalışma alanını oluştururlar.

Bu tezde ; güç sistemlerinde harmonik oluşturan kaynaklar, bu kaynakların olumsuz etkileri, harmoniklerin analizi ve kontrolü , harmoniklerin sınırlaması için gerekli standartlar , modelleme ve simülasyon konularına yer verilmiştir. Elektrikli ulaşım sistemlerinin ürettiği harmonikler ele alınmış olup , bu konudaki modelleme ve simülasyon örnekleri değerlendirilmiştir. Demiryollarımız için gerekli olduğuna inandığım bu çalışmamın , toplu taşıma sistemlerindeki karmaşık bazı problemlerin çözümünde katkısı olmasını dilerim.

Bu tezin hazırlanıp ortaya çıkmasında değerli görüşleri ile bana her zaman yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. Atif URAL ' a en içten teşekkürlerimi sunar , ayrıca çalışmamda bana yardımcı olan arkadaşlarım Öğ. Gör. Erhan Bütün 'e , Ar. Gör. Ali Bekir Yıldız 'a , Ar. Gör. Nurten Dursun 'a ( K.Ü ), Elek. Müh. Beyhan Balta 'ya ( TCDD ) ve her konuda desteğini gördüğüm eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 1993 , KOCAELİ

Nuran YÖRÜKEREN

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	1
ABSTRACT.....	11
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	111
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xix
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1.Genel Tanımlamalar.....	1
1.1.1.Bozucu Etki.....	2
1.1.2.Bozucunun Büyüklüğü.....	2
1.1.3.Uygunluk Seviyesi.....	2
1.1.4.Bağlantı Noktası.....	2
1.1.5.Bağlantı Noktasının Kısa Devre Gücü... 2	
1.1.6.Gerilim Dalgalanması.....	3
1.1.7.Fliker.....	3
1.1.8.Harmonik.....	3
1.2.Harmonik Kaynaklar.....	3
1.2.1.Güç Elektronik Düzenli Donanımlar..... 4	
1.2.1.1.Enerji tasarrufu amacı ile kullanılan donanımlar ve uygulanan yöntemler.....	5
1.2.1.2.Motor hız kontrol devreleri.....	5
1.2.1.3.Yüksek doğru gerilim ile enerji nakli (HVDC) .....	5
1.2.1.4.Yeni enerji kaynakları kullanarak elektrik enerjisi üreten donanımların şebekeye bağlanması....	6
1.2.1.5.Statik Var sistemleri.....	6
1.2.1.6.Kesintisiz güç kaynakları.....	6
1.2.1.7.Direkt frekans dönüştürücüsüyle beslenen momentli büyük hızı küçük motorlar.....	7

	1.2.1.8. Endüstriyel ısıtma sağlayan fırınlarda tam periyod (Integral Cycle) kontrol tekniğinin kullanılması.....	7
	1.2.1.9. Elektrikli otomobillerin kullanılması.....	7
	1.2.2. Elektromagnetik Aygıtlar.....	7
	1.2.2.1. Generatörler.....	7
	1.2.2.2. Transformatörler.....	8
	1.2.2.3. Elektrik makinaları.....	9
	1.2.3. Ark Prensibi ile Çalışan Aygıtlar.....	9
	1.2.3.1. Ark fırını.....	9
	1.2.3.2. Civa ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri.....	9
<b>BÖLÜM</b>	<b>2. HARMONİK ANALİZİ.....</b>	<b>15</b>
	2.1. Giriş.....	15
	2.2. Fourier Analizi.....	15
	2.2.1. Fourier Analizi ve Katsayıları.....	15
	2.2.2. Tek Simetri.....	17
	2.2.3. Çift Simetri.....	18
	2.2.4. Yarı Dalga Simetrisi.....	19
	2.3. Fourier Dönüşümü (Transform).....	21
	2.4. Örneklenmiş Zaman Fonksiyonları.....	23
	2.5. Ayrık Fourier Dönüşümü (Transform).....	24
	2.6. Hızlı Fourier Dönüşümü (Transform).....	27
	2.7. Hızlı Fourier Dönüşümü (Transform)	
	Kullanımındaki Zorluklar.....	31
	2.7.1. Nyquist Frekansı ve Girişim (Aliasing).....	32
	2.7.2. Sızıntı (Spektral Kaçak).....	34
	2.7.2.1. Pencere fonksiyonları.....	34
	2.7.3. Çit Etkisi (Picket Fence).....	36
<b>BÖLÜM</b>	<b>3. GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİNİN KONTROLU ve SINIRLAMASI İÇİN STANDARTLAR.....</b>	<b>37</b>
	3.1. Giriş.....	37
	3.2. Bozulmanın Tanımı.....	38

3.3.	Ulusal Harmonik Standartlar.....	42
3.3.1.	Fransa.....	43
3.3.2.	İsveç.....	44
3.3.3.	Amerika.....	45
3.3.4.	Almanya.....	45
3.3.5.	Avustralya.....	45
3.3.6.	Finlandiya.....	47
3.3.7.	Yeni Zelanda.....	48
3.3.8.	İngiltere.....	50
<b>BÖLÜM</b>	<b>4. HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>
4.1.	Giriş.....	59
4.2.	Büyük Güç Dönüştürücüleri.....	60
4.2.1.	Altı Darbeli Bağlantıya İlişkin Harmonikler.....	63
4.2.2.	Oniki Darbeli Bağlantıya İlişkin Harmonikler.....	69
4.2.2.1.	Yüksek darbe şekillerinde sistem empedansının ve transformatörünün etkisi.....	73
4.2.2.2.	Doğru gerilim harmonikleri.....	76
4.3.	Orta Büyüklükteki Dönüştürücüler.....	81
4.3.1.	Dönüştürücüden Beslenen DC Sürücüler.....	81
4.3.2.	Yarı-Kontrollu Doğrultma.....	84
4.3.3.	Teker Teker Kontrol Edilmiş Köprüler.....	86
4.3.4.	Evirici Beslemeli AC Sürücüler.....	87
4.4.	DGM Tekniği.....	94
4.4.1.	Darbe Genişlik Modülasyonlu Eviricilerde Harmonikler.....	95
4.4.1.1.	Sinüs şeklindeki DGM yöntemi.....	95
4.4.1.2.	Harmonik yoketme yöntemi.....	97
4.4.2.	Basamaklı Dalga Çıkışlı Eviricilerde Harmonikler.....	102
4.5.	Düşük Güç Dönüştürücüleri.....	105
4.6.	Diğer Harmonik Üreten Kaynaklar.....	105
4.7.	Örnek Program.....	106



<b>BÖLÜM</b>	<b>5. HARMONİKLERİN ETKİLERİ.....</b>	<b>107</b>
	5.1.Giriş.....	107
	5.2.Elektrik Makinalarındaki Harmoniklerin Etkisi.....	108
	5.3.Taşıma Sistemlerinde Harmoniklerin Etkisi.....	113
	5.4.Kablolarda Harmoniklerin Etkisi.....	113
	5.5.Transformatörlerde Harmoniklerin Etkisi....	116
	5.6.Rezonanslar.....	117
	5.6.1.Genel Tanıtım.....	117
	5.6.2.Paralel Rezonans.....	118
	5.6.3.Seri Rezonans.....	120
	5.6.4.Sistem Davranışındaki Rezonansın Etkileri.....	121
	5.7.Kapasitör Gruplarında Harmoniklerin Etkisi.....	122
	5.8.Güç Ölçümünde Harmoniklerin Etkileri.....	127
	5.9.Haberleşme Sistemleri Üzerinde Harmoniklerin Etkileri.....	133
	5.10.Güç Elektronik Düzenekli Donanımlar Üzerinde Harmoniklerin Etkileri.....	133
<b>BÖLÜM</b>	<b>6. MODELLEME VE SİMÜLASYON.....</b>	<b>135</b>
	6.1.Giriş.....	135
	6.2.Y <sub>bara</sub> Matrisinin Oluşumu.....	137
	6.3.Tek-Faz Modelleme.....	143
	6.4.Üç-Faz Modelleme.....	145
<b>BÖLÜM</b>	<b>7. ELEKTRİKLİ ULAŞIM YÜKLERİNİN HARMONİK KARAKTERİSTİKLERİNE AİT SİMÜLASYON VE MODELLEME ÖRNEKLERİ.....</b>	<b>151</b>
	7.1.Giriş.....	151
	7.2.Birinci Örnek Ototransformatörlü Bir Çer Sisteminin Frekans Domeni Modeli.....	151
	7.2.1.Genel Tanıtım.....	151
	7.2.2.Güç Sisteminin Tanıtılması.....	153
	7.2.3.Model Seçimi.....	154
	7.2.3.1.Bir AT çer sistem modelinin koşulları.....	154

7.2.4.Frekans Domeni Modellemesi.....	155
7.2.5.Çok Uçlu ABCD Parametre Şebekeleri..	156
7.2.5.1.Alt sistemler.....	157
7.2.5.2.Düzgün kaskadlama algoritması.....	158
7.2.5.3.Dalga şekli algoritması.....	162
7.2.6.Modelleme Yönteminin Pratik Olarak İspatı.....	164
7.3.Elektrikli Demiryollarınının Katener Hatlarındaki Duran Dalga Olayı ve Rezonans Koşulları.....	170
7.4.İkinci Örnek Yeni Zelanda 'da Devreye Alınmış Olan Çer Sisteminin Simülasyonu.....	171
7.4.1.Giriş.....	171
7.4.2.Şebekenin Tanıtımı.....	172
7.4.2.1.Harmonik akım.....	172
7.4.2.2.Psofometrik (Gürültü) akım.....	172
7.4.2.3.Gerilim bozulması.....	172
7.4.3.Güç Sisteminin Seçimi.....	173
7.4.4.Elektrikli Lokomotifler.....	174
7.4.4.1.Psofometrik (Gürültü) akım.....	175
7.4.4.2.Harmonik akımlar.....	175
7.4.5.Güç Sistemi İçin Bilgisayar Simülasyonu.....	175
7.4.6.Pratik Test Programı.....	177
7.4.7.Lokomotif İçin Alınan Test Sonuçları.....	178
7.4.7.1.Harmonik spektrum.....	178
7.4.7.2.Psofometrik (Gürültü) akım.....	178
7.4.7.3.Güç katsayısı.....	178
7.4.7.4.Faydalı frenleme sırasındaki enerji transferi.....	179
7.4.7.5.Gerilim bozulması.....	179
7.4.8.Yardımcı İstasyonlar İçin Test Sonuçları.....	179
7.4.8.1.Harmonik gerilimler.....	179
7.4.8.2.Harmonik akımlar.....	180
7.4.8.3.Sistem güç faktörü.....	181

BÖLÜM	8. İDEALTEPE TRAFÖ İSTASYONUNDA YAPILAN	
	ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRMELER.....	187
	8.1.Giriş.....	187
	8.2.İdealtepe Besleme Merkezi.....	187
	8.2.1.Güç Trafolarının	
	Karakteristikleri.....	188
	8.2.2.Hatta Çalışan Elektrikli Trenlerin	
	Karakteristikleri.....	189
	8.3.Yapılan Ölçümler ve Değerlendirmeler.....	191
	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	204
	KAYNAKLAR.....	213
	EKLER.....	220
	ÖZGEÇMİŞ.....	226



## SİMGELER DİZİNİ

$a_0$	: Fourier serisinin sabit terimi
$a_n$	: Fourier serisinin katsayısı ( Cos )
$A_n$	: n. harmonik vektörünün genliği
$A_1, A_2, A_3$	: Binary durumundaki katsayılar
$b_n$	: Fourier serisinin katsayısı ( Sin )
$C_s$	: Sistem kapasitansı
$C_y$	: Yük kapasitansı
$C_f$	: Filtre kapasitansı
$d$	: İletkenler arasında eksenel aralık ile bölünmüş iletken çapı
$e^{-jz\pi f_n t}$	: Birim vektör
$e_a, e_b, e_c$	: Faz-nötr gerilimleri
$E$	: Gerilim
$f$	: Frekans
$f_s$	: Örnekleme frekansı
$fn_v$	: Rotorda endüklenen harmonik akımların frekansı (Uzay harmonikleri derecesine göre)
$f_1$	: Temel bileşen frekansı
$f_p$	: Paralel rezonans frekansı
$f_{seri}$	: Seri rezonans frekansı
$f_c$	: Kesim frekansı
$F_p$	: Pozitif akım darbeleri için Fourier serisi
$F_n$	: Negatif akım darbeleri için Fourier serisi
$i_a$	: a fazındaki ac akım
$i_a, i_b, i_c$	: Dönüştürücü faz akımları
$i_C$	: Komütasyon akımı
$(i_a)_{12}$	: a fazındaki bileşke akım ( Yıldız-yıldız (1) ve üçgen-yıldız (2) bağlı transformatörlerdeki bileşke ac akım)
$i_p$	: Frekans domeniinde motor faz akımı
$I_1$	: Temel bileşen frekansındaki akım
$I_n$	: n. harmonik bileşen akımı
$I_{ref}$	: Referans akımı
$I_d$	: Doğru akım
$I_r$	: Doğru akımın alternatif dalgalılığı

$I_m$	$X(f)$	: $X(f)$ 'nin imajiner kısmı
$I_{TOP}$		: Toplam akım
$I_{SYMBARA_n}$		: Harmonik akım vektörü ( simetrikli bileşenler )
$I_k$		: Sistem kısa devre akımı
$I_Y$		: Maksimum yük akımının temel bileşeni
$I_{nom}$		: Nominal akım
$I_c$		: Kapasitör akımı
$I_{cn}$		: Kapasitör akımının nominal değeri
$k$		: Herhangi bir tamsayı
$k_z, k_1, k_0$		: Binary bitleri
$kVar_T$	(pu)	: Pu olarak toplam reaktif güç
$K$		: Sabit
$L_d$		: Süzgeç bobini
$L$		: Endüktans
$L_m$	( $L_{motor}$ )	: Motor endüktansı
$L_s$		: Sistem endüktansı
$L_f$		: Filtre endüktansı
$L_{hat}$		: Hat endüktansı
$L_{tr}$		: Transformator endüktansı
$m$		: Herhangi sabit pozitif tamsayı
$m_1$		: Çeyrek periyottaki sıfırdan farklı basamak sayısı
$m_2$		: Stator sargı fazlarının sayısı
$M_1$		: Herhangi bir tamsayı
$n$		: Harmonik sayısı
$n_z, n_1, n_0$		: Binary bitleri
$N_1$		: Herhangi bir tamsayı
$N$		: Örnekleme sayısı
$p$		: Faz sayısı
$P$		: Güç
$P_1$		: Taşıyıcı/ referans frekans oranı
$P_t$		: Tüketicinin saat başına ortalama gücü
$q$		: Darbe sayısı
$Q$		: Kalite faktörü
$Q_c$		: Kondansatör gücü
$Q_{cn}$		: Kondansatör gücünün nominal değeri
$r$		: Dalgalılık oranı

$R$	: Direnç
$R_m$	: Motor direnci
$R_n$	: Harmonik frekansındaki sistem direnci
$R_{dc}$	: Doğru akım direnci
$R_{ac}$	: Effektif alternatif akım direnci
$R_{sik_n}$	: $n$ harmonik derecesine göre , $i$ ve $k$ arasındaki taşıma hattının seri direnci
$R_{pik_n}$	: $n$ harmonik derecesine göre , $i$ ve $k$ arasındaki taşıma hattının paralel direnci
$Re X(f)$	: $X(f)$ 'in gerçek kısmı
$R_{hat}$	: Hat direnci
$S$	: kVA cinsinden güç
$S(f)$	: Güç spektrumunu
$S_t$	: Tüketicinin kVA olarak maksimum güç isteği
$S_c$	: Kapasitör gücü
$S_{tr}$	: Transformator gücü
$S_y$	: Yük gücü
$S_k$	: Kaynağın kısa devre gücü
$t$	: Zaman
$T$	: Periyod
$THD_v$	: Toplam harmonik bozulması ( gerilim için )
$THD_i$	: Toplam harmonik bozulması ( akım için )
$u$	: İletkenin magnetik geçirgenliği
$U$	: Eşdeğer matris
$U_1$	: Temel bileşen gerilimi
$U_n$	: Harmonik bileşen gerilimi
$U_{nom}$	: Nominal sistem gerilimi
$U_c$	: Kapasitör gerilimi
$v$	: Uzay harmonik derecesi
$V_p$	: Frekans domeniindeki motor faz gerilimi
$V_{P(n)}$	: $n$ . harmonik için motor faz gerilimi
$V_{bara}$	: Bara gerilimi
$V_{P(1)}$	: Temel bileşen faz gerilimi
$V_T (pu)$	: Toplam pu rms uç gerilimi
$V_{TP} (pu)$	: Toplam pu tepe uç gerilimi
$V_n (pu)$	: pu harmonik ve temel bileşen rms gerilimi
$V_1$	: Temel bileşen gerilimi

$V_{SYMBara_n}$	: Harmonik gerilim vektörü ( simetrikli bileşenler )
$V_d$	: Doğru gerilim
$V_c$	: Faz-faz (komütasyon) rms gerilimi
$V_{neg}$	: Negatif uçtaki gerilim
$V_{poz}$	: Pozitif uçtaki gerilim
$V_m$	: Maksimum gerilim
$V_{RS}$	: Faz- faz gerilimi
$V_{dAV}$	: Ortalama dc gerilim
$V_{AN}$	: Motor faz gerilimi
$V_N$	: Nötr gerilim
$V_{AN(n)}$	: n. harmonik motor faz gerilimi
$V_A, V_B, V_C$	: Evirici çıkış faz-nötr gerilimleri
$V_{A(n)}$	: n.harmonik evirici faz çıkış gerilimi
$V_{TOP}$	: Toplam gerilim
$W$	: Açısal hız
$W_1$	: Temel bileşen frekansı
$W_c$	: Taşıyıcı dalga frekansı
$W_s$	: Referans (modülasyon) frekansı
$W$	: Enerji
$[ W^{kn} ]$	: Birim vektör matrisi ( n ve k binary bitleridir )
$Y_{CS}$	: Deri clayına göre direnç bileşeni
$Y_{CP}$	: Yakınlık etkisine göre direnç bileşeni
$Y_{şönt}$	: Şönt admitans
$Y_{hat}$	: Hat admitansı
$Y_s$	: Seri admitans
$Y_p$	: Paralel admitans
$Y_{sik_n}$	: n harmonik derecesindeki seri admitans ( elemanlar i , k )
$Y_{pik_n}$	: n harmonik derecesindeki paralel admitans ( elemanlar i , k )
$Y_{baraii}$	: Bara admitans matrisi
$Y_{TOP}$	: Toplam admitans
$Y_{SYMbara}$	: $Y_{bara}$ admitans matrisi ( simetrikli bileşenler )
$[ Y_{-bara} ]$	: Negatif sequence bara admitans matrisi

$[ Y_{+bara} ]$	: Pozitif sequence bara admitans matrisi
$Z$	: Empedans
$Z_n$	: Bağlantı noktasındaki şebekenin harmonik empedansı
$Z_{kk}$	: Kaynak noktasındaki kısa devre empedansı
$Z_{tr}$	: Transformator empedansı
$Z_f$	: Filtre empedansı
$x (f_n)$	: $f_n = nf$ 'in bir frekansındaki harmoniğe karşılık gelen bir serinin n. bileşeni
$[ x (f_k) ]$	: Frekans domenindeki fonksiyonun N bileşenlerini gösteren vektör matrisi
$[ x (t_n) ]$	: Zaman domenindeki fonksiyonun N örneklerini gösteren vektör matrisi
$X (f_0)$	: Frekans spektrumunun dc bileşeni
$X_c$	: Komütasyon devresi reaktansı
$X_{tr}$	: Transformator reaktansı
$X_{kap}$	: Kapasitif reaktans
$X_m$	: Motor reaktansı
$X_{eik_n}$	: n harmonik derecesindeki seri reaktans elemanlar ( i , k )
$X_{pik_n}$	: n harmonik derecesindeki paralel reaktans elemanlar ( i , k )
$X_{hat}$	: Hat reaktansı
$\alpha_1$	: Herhangi bir katsayı
$\alpha$	: Gecikme açısı
$\phi$	: Faz kaydırma açısı
$\phi (f)$	: Faz spektrumunu
$\phi_n$	: Harmonik faz açısı
$\phi_p$	: Bileşke motor faz hava aralığı akı fazörü
$\phi_{p(1)}$	: Temel bileşen hava aralığı akı fazörü
$\mu$	: Çakışma açısı
$\theta$	: Herhangi bir açı
$\theta_n$	: Harmonik faz açısı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kare dalga fonksiyonu.....	18
Şekil 2.2.	Tek fonksiyonlu kare dalganın sabit terimi.....	19
Şekil 2.3.	Bir kare dalganın hat spekturum gösterilişi.....	20
Şekil 2.4.	Örneklenmiş zaman domeni fonksiyonu.....	24
Şekil 2.5.	Ayrık zaman domeni fonksiyonu için frekans spekturumu.....	24
Şekil 2.6.	Ayrık zaman ve frekans domeni fonksiyonları.....	25
Şekil 2.7.	Hızlı Fourier dönüşümü için akış diyagramı.....	31
Şekil 2.8.	Pozitif ve negatif açıların karşılığı.....	33
Şekil 2.9.	"Girişim etkisi " .....	35
Şekil 2.10.	$f_c$ kesim frekanslı ideal bir alçak geçiren filtrenin frekans domeni karakteristiği.....	36
Şekil 3.1.	THD ve harmonik bileşen arasındaki ilişki..	39
Şekil 3.2.	Alternatif bozulma tanımı ve harmonik bileşen arasındaki ilişki.....	41
Şekil 3.3.	AS2279 için hata seviyesine karşı dönüştürücü boyutu.....	46
Şekil 4.1.	$p$ fazlı tek yöllü bir dönüştürücü.....	61
Şekil 4.2.	Pozitif ve negatif darbelerin sırası.....	62
Şekil 4.3.	$p$ fazlı çift yöllü dönüştürücü.....	63
Şekil 4.4.	Bir kare dalganın temel bileşeni.....	65
Şekil 4.5.	Bir kare dalgaya üçüncü harmonik bileşeninin eklenmesi sonucu elde edilen şekil .....	66
Şekil 4.6.	Bir kare dalgaya 3., 5. , 7. , 9. ve 11. harmonik bileşenlerinin eklenmesi sonucu elde edilen şekil.....	67
Şekil 4.7.	Altı darbe köprü dalga şekilleri.....	68
Şekil 4.8.	Üçgen-yıldız bağlı bir altı darbe dalga şeklinin zaman domenindeki gösterilişi.....	69
Şekil 4.9.	12 darbeleri dönüştürücü şekli.....	70

Şekil 4.10.	Oniki darbeleri dönüştürücüye ait bağlantı şekilleri	
	(a) Köprü seri bağlı.....	71
Şekil 4.10.	Oniki darbeleri dönüştürücüye ait bağlantı şekilleri	
	(b) Köprü paralel bağlı.....	72
Şekil 4.11.	(a) Oniki darbe faz akımının zaman domenindeki gösterilişi.....	73
Şekil 4.11.	(b) Oniki darbe işletiminin frekans domenindeki gösterilişi.....	73
Şekil 4.12.	Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 5. harmonik akım değişimleri.....	75
Şekil 4.13.	Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 13. harmonik akım değişimleri.....	76
Şekil 4.14.	Altı - darbe dönüştürücü dc gerilim dalga şekilleri.....	78
Şekil 4.15.	Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 6. harmonik gerilim değişimi.....	79
Şekil 4.16.	Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 12. harmonik gerilim değişimi.....	80
Şekil 4.17.	DC motor eşdeğer devresi.....	81
Şekil 4.18.	Süreksiz dalga şekilleri.....	82
Şekil 4.19.	Üç fazlı yarı kontrollü dönüştürücü şekli..	85
Şekil 4.20.	$\alpha = 60^\circ$ için , yarı kontrollü dönüştürücüye ait teorik dalga şekilleri.....	85
Şekil 4.21.	Tipik bir lokomotif güç devresi.....	86
Şekil 4.22.	Teker teker kontrol edilmiş bir çift köprü dönüştürücünün akım ve gerilim dalga şekilleri.....	88
Şekil 4.23.	Kapalı anahtar sırasını gösteren dengelenmiş bir motor yükü ve temel üç faz evirici devresi.....	89
Şekil 4.24.	Temel 6 adım dalga şekilleri.....	91
Şekil 4.25.	Darbe genişlik modülasyonu yönteminin temel ilkesi.....	96
Şekil 4.26.	Tek biçimli örnekleme sistemi.....	97
Şekil 4.27.	Harmonik yoketme metodu için kullanılan gerilim dalga şekli.....	98

Şekil 4.28.	5. ve 7. harmonikleri yok etmek için temel bileşen çıkış gerilimine bağlı açılar.....	101
Şekil 4.29.	Basamaklı bir çıkış dalga şekli.....	103
Şekil 5.1.	Üç faz fırçasız senkron motora bağlanmış , altı darbe sistemine sahip 2.3 MW 'lık ayarlanabilir tahrik sistemi için , basitleştirilmiş tek hat diyagramı.....	112
Şekil 5.2.	Toplam transformatör kayıp bileşenleri....	117
Şekil 5.3.	Ortak bağlantı noktasındaki paralel rezonans.....	119
Şekil 5.4.	Seri rezonans devresi.....	120
Şekil 5.5.	Dalgalılık kontrol sinyali için ayarlanmış durdurucu devre.....	122
Şekil 5.6.	Bir tıkama devresi içinde ölçülmüş harmonik akımlar.....	122
Şekil 5.7.	%135 'lik sınır değeri aşılmadan , çeşitli harmonik derecelerinde akımın gerilime bağlı olarak değişimi.....	125
Şekil 5.8.	Kondansatör akımının %130 'luk sınır değerini aşmadan , çeşitli harmonik derecelerinde kondansatör gücünün gerilime bağlı değişimi.....	127
Şekil 6.1.	Taşıma hatları için eşdeğer devre modeli..	139
Şekil 6.2.	Baralar ile olan paralel bağlantılar için eşdeğer devre modelleri.....	139
Şekil 6.3.	Tek - faz harmonik modelleme yapı diyagramı.....	144
Şekil 6.4.	Üç - faz harmonik modelleme yapı diyagramı.....	145
Şekil 6.5.	Üç - faz modelleme veri akış diyagramı....	147
Şekil 6.6.	Etkileşimli (interactive) ac - dc modelin yapı diyagramı.....	148
Şekil 6.7.	Üç - faz harmonik yayılma programının yapı diyagramı.....	149
Şekil 7.1.	Düzgün kaskad algoritması.....	159

Şekil 7.2.	Katener sistemi boyunca harmonik gerilimler.....	166
Şekil 7.3.	Lokomotif giriş akım dalga şekli.....	167
Şekil 7.4.	Pantograf gerilim dalga şekli.....	168
Şekil 7.5.	Callemondah 'daki katener sistem gerilim dalga şekli.....	169
Şekil 7.6.	220/55 kV besleme şekilleri.....	174
Şekil 7.7.	Test kısmı için besleme düzenlemeleri.....	183
Şekil 7.8.	Lokomotif çer akım harmonikleri.....	184
Şekil 7.9.	Lokomotif psfometrik akımı .....	185
Şekil 7.10.	Lokomotif güç faktörü.....	186
Şekil 8.1.	Akım değerlerinin zamana göre değişimi.....	201
Şekil 8.2.	Gerilim değerlerinin zamana göre değişimi..	202
Şekil 8.2.	FFT akım sonuçlarının frekansa bağlı değişimi.....	203

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Elektrik sistemi üzerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri.....	11
Tablo 1.2.	Şebekedeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar.....	12
Tablo 1.3.	Bozucu etkileri azaltma çareleri.....	13
Tablo 3.1.	THD ve harmonik bileşenler arasındaki ilişki.....	40
Tablo 3.2.	Harmonik gerilim bozulma sınırları.....	42
Tablo 3.3.	Altı ve oniki darbeli dönüştürücüler için $I_k / I_{nom}$ değerleri.....	44
Tablo 3.4.	% THD ' ye bağlı olarak sistem gerilimi....	44
Tablo 3.5.	Darbe sayısına bağlı olarak % sistem kısa devre nominal değeri.....	44
Tablo 3.6.	% olarak THD sınırları.....	45
Tablo 3.7.	İkinci durum için THD sınırları.....	47
Tablo 3.8.	Ortak bağlantı noktasında izin verilen harmonik seviyeler ve THD gerilimi.....	48
Tablo 3.9.	Ortak bağlantı noktasına herhangi bir tüketici bağlandığı zaman izin verilen harmonik seviye ve THD akımı.....	48
Tablo 3.10.	66 kV ve üstündeki gerilimler için harmonik sınırlamalar.....	49
Tablo 3.11.	Akım harmonik sınırları.....	50
Tablo 3.12.	Birinci aşama sınırları altında ac regülatör donanımlarının ve dönüştürücünün maksimum boyutları.....	51
Tablo 3.13.	İkinci aşama sınırları altında ortak bağlantı noktasındaki herhangi bir tüketici için izin verilen harmonik akımlar.....	51
Tablo 3.14.	Sistemdeki herhangi bir noktada harmonik gerilim bozulma sınırları.....	52
Tablo 3.15.	Harmonik akım sınırlarına karşılık gelen tek dönüştürücülü bir donanımın maksimum yükü..	53
Tablo 3.16.	Çeşitli ülkeleri kapsayan harmonik standartlar.....	55

Tablo 3.17.	Kabul edilebilir gerilim harmonik sınırları.....	56
Tablo 3.18.	Ortak bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşenin yüzde olarak maksimum harmonik akım sınırları.....	57
Tablo 4.1.	Motor faz harmoniklerinin bağlı genlikleri.....	93
Tablo 4.2.	% 93 ' den % 100 ' e $V_1$ gerilimi için $\alpha$ açısı tablosu.....	102
Tablo 5.1.	Üç faz sargılı stator MMK bileşenlerinin devir yönleri ve hızı.....	110
Tablo 5.2.	Altı faz sargılı stator MMK bileşenlerinin devir yönleri ve hızı.....	110
Tablo 5.3.	Yekpare ve konsantrik bükülmüş yuvarlak iletkenler için deri olayı direnci.....	116
Tablo 5.4.	Test durumundaki harmonikler.....	131
Tablo 5.5.	Simülasyon çalışması sonuçları.....	131
Tablo 6.1.	Frekansa bağlı bileşen modelleri.....	137
Tablo 6.2.	Parametrelerin frekans modelinde gösterilişi.....	138
Tablo 7.1.	Sınıf 30 elektrik lokomotifinin tepe harmonik akımları.....	176
Tablo 7.2.	Normal çalışma çevrim testi sırasında pantografda ölçülmüş olan harmonik gerilimler.....	179
Tablo 7.3.	55 kV gerilim seviyesinde ölçülmüş olan gerilim harmonik bozulması.....	180
Tablo 7.4.	55 kV gerilim seviyesinde ölçülmüş olan harmonik akımlar.....	181
Tablo 8.1.	Mevcut olan akım trafolarının çevirme oranları ve ayarlı bulunduğu değerler.....	188
Tablo 8.2.	Mevcut olan aşırı akım röle tipleri ve ayarlı bulunduğu değerler.....	189

## KISALTMALAR DİZİNİ

AT	: Autotransformer (Ototransformatör)
AS 2279	: Avustralya Standardı
ÇYG	: Çok Yüksek Gerilim
DFT	: Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
DIN 57160 (VDE 0160 / 11.81)	: Alman Standardı
DGM	: Darbe Genlik Modülasyonu
emk	: Elektro motor kuvveti
Engineering Recommendation G5/3	: İngiltere Standardı
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
HVDC	: High Voltage DC Current (Yüksek Doğru Gerilim ile Enerji Nakli)
LVT	: LOCO Voltage Transducer (Lokomotif Gerilim Transdüser)
LCT	: LOCO Current Transducer (Lokomotif Akım Transdüser)
NZRC	: New Zealand Railway Corporation (Yeni Zelanda Demiryolu Şirketi)
NIMT	: North Island Main Trunk (North Island Ana Hattı)
OG	: Orta Gerilim
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genlik Modülasyonu)
rms	: root - mean -square (Effektif değer)
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon (Bozulma)
TS 804	: Türk Standardı
YG	: Yüksek Gerilim

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1 Genel Tanımlamalar

Elektrik enerjisi üreten , taşıyan ve dağıtan tüm kuruluşlardan istenilen daima tüketiciyi memnun edecek şekilde kesintisiz , düzgün bir enerji sağlamak ve bunu en ekonomik şekilde gerçekleştirmektir . Bu nedenle sistemler tasarlanırken veya mevcutları modernize edilirken ; üretim kaynakları ve iletim hatları ile tüketicilere ait veri ve parametrelere göre ekonomik analizleri yapılmalıdır.

Genelde hesaplamalar yapılırken , şebekede üretilen gerilimin sinüs biçiminde olduğu kabul edilir. Fakat gerçekte şebekedeki bazı yükler ve bağlantı elemanları, doğrusal olmayan karakteristikleri sebebiyle şebekeden sinüs şeklinde olmayan akımlar çekerler. Gerilim ve akım dalga şekli bozulmasının en önemli nedeni , uç gerilimi ile akımı arasındaki bağıntısı lineer olmayan yüklerdir. Bu tip donanımlar , sistemin girişinde , taşıma hattında veya çıkışında yer alabilirler. Doğrusal V - I karakteristiğine sahip olmayan bu donanımları " lineer olmayan devre elemanları " olarak adlandırıyoruz. Bu sistemler , giriş gücünü sinüs şeklinde bir elektrik şebekesinden almalarına karşın , daha sonra kendi ürettikleri harmonik akım ve gerilimleri elektrik sistemine katarlar.

Görüldüğü gibi elektrik şebekesinden enerji alan ,



her türden alıcı , kendi gücüyle bağlandığı noktanın kısa devre gücü arasındaki oranla ilişkili olarak bozucu etkiler meydana getirir.

Bu konuyla ilgili olan genel ifadeleri , aşağıda açıklandığı gibi tanımlayabiliriz.

#### 1.1.1 Bozucu etki

Kaynak geriliminin genliğinde , frekansında , dalga şeklinde istenmeyen değişimlerin meydana gelmesine neden olan etkidir.

#### 1.1.2 Bozucunun büyüklüğü

Bozucu etkiyi meydana getiren elektriksel gücün büyüklüğüdür. Bu büyüklük bozucu etkiler için kabul edilebilir sınırlar içinde kalsa dahi , bozucu büyüklük olarak adlandırılır.

#### 1.1.3 Uygunluk seviyesi

Bir donanımın normal çalışması sırasında oluşturduğu elektromagnetik alan etkisinde kalan diğer cihazların etkilenmesine neden olmadan yayabileceği bozucu limitlerdir.

#### 1.1.4 Bağlantı noktası

Bozucu etkileri meydana getiren alıcıya , bağlı durumda veya bağlanacak olan diğer alıcılara en yakın olan şebeke noktasıdır.

#### 1.1.5 Bağlantı noktasının kısa devre gücü

Sistemin uzun süre minimum yük koşullarında ölçülen , bağlantı noktasının üç faz kısa devre gücüdür.

### 1.1.6 Gerilim dalgalanması

Ani veya seri halde , düzenli veya düzensiz olarak gerilimin etkin değerinde görülen dalgalanmalardır.

### 1.1.7 Fliker

Işık şiddetinde saniyede yaklaşık olarak ( 25 - 50 ) oranında periyodik dalgalanmalardan ileri gelen subjektif bir duydur.

### 1.1.8 Harmonik

Harmonik , temel bileşen frekansının bir integral katsayısı olan bir frekansa sahip , periyodik bir dalganın sinüs biçiminde olan bileşeni olarak tanımlanır. Sinüs şeklinde olmayan bir dalga şekli , genellikle bir kompleks dalga olarak ifade edilir .

Harmonik analizi , periyodik dalga şeklinin daha yüksek dereceli harmoniklerini , temel bileşen fazlarını ve genliklerini hesaplama işlemidir. Fourier serileri olarak bilinen seriler , verilen fonksiyonun zaman domeni ve frekans domeni arasındaki bağlantısını kurarlar. Fourier serileri , Fourier dönüşümünün özel bir durumunu temsil ederler ve bu nedenle periyodik bir sinyal için uygulanırlar. Harmonik analizi , Bölüm 2 ' de ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Genel olarak harmoniğin ne olduğunu ifade ettikten sonra, bu harmoniğe neden olan kaynakları kısaca inceleyelim.

## 1.2 Harmonik Kaynaklar

Güç sistemlerindeki harmonikler , çok uzun yıllardır bilinir. Günümüzde ise teknolojinin hızla ilerlemesi sonucu yeni tahrik sistemleri eski sistemlerin yerini almaya ve güç elektronik cihazları ucuz maliyetleri

nedeniyle daha çok tercih edilmeye başlanmıştır.

Oysa , bu sistemler anahtarlama prensibine göre çalıştıklarından şebekeye harmonik üretmekte ve önemli problemlere neden olmaktadır. Bu sebeple , ilk olarak harmonik üreten kaynaklar tanıtılmalı , daha sonra ne gibi önlenmelerin alınması gerektiği düşünülmelidir.

Üretilen harmonik frekanslı akımlar , devrelerini diğer şebeke ve alıcılar üzerinden tamamlayarak harmonik frekanslı gerilimleri oluştururlar. Söz konusu olan bu gerilimler , başlangıçta kabul edilen saf sinüs dalga şeklini bozarlar. Bozulma ; sistemin değişik noktalarındaki gerilim harmonikleri ile yükün meydana getirdiği harmonik akım değerlerine , etraftaki tüketicilere ve şebekenin parametrelerine doğrudan doğruya bağlıdır.

Harmoniklerin , şebekelerde ve donanımlarda birçok önemli etkileri olmaktadır. Daha önceleri harmonikler , senkron ile asenkron makinalarda ısınma ve titreşimlere , haberleşme hatlarında karışımlara ve güç kondansatörü arızalarına neden olmaktadır. Günümüzde güç elektroniği düzenekli bir çok donanımın kullanılması nedeniyle, harmoniklerin etkileri giderek artmıştır.

Harmoniklerin etkileri , Bölüm 5 ' de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

#### 1.2.1 Güç elektronik düzenekli donanımlar

Harmoniğe neden olan ve zamanla değişen lineer olmayan yükler , üç ayrı grupta toplanabilirler. Bunlar ; güç elektronik düzenekli donanımlar , ark prensibi ile çalışan donanımlar , B-H eğrilerinden doyma bölgelerini temsil eden magnetik donanımlar şeklinde sıralanabilirler.

Harmonik oluşturan güç elektronik düzenekli donanımlar,

aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

- Doğrultucular ,
- Eviriciler ,
- Direkt frekans dönüştürücüler ,
- Alternatif akım kıyıcıları .

Güç elektronik düzenekli donanımları , kullanım alanlarına göre şu şekilde sıralayabiliriz.

#### 1.2.1.1 Enerji tasarrufu amacı ile kullanılan donanımlar ve uygulanan yöntemler

Yük ve motor devrelerinde , verimin artırılması için kullanılan yarı iletkenli güç donanımları , mikro - işlemciler harmonik içeren düzensiz akım ve gerilim dalgalarının oluşmasına neden olurlar.

#### 1.2.1.2 Motor hız kontrol devreleri

Bu ifadeden , direkt frekans dönüştürücüsü veya alternatif akım kıyıcısı yardımıyla ayarlanan asenkron motorlar, statik kramer sistemi olarak bilinen , bilezikli asenkron motorlarda hız kontrolünü sağlayan sistemler , senkron motor hız düzenleri ve kontrollü doğrultucular ile beslenen doğru akım hız kontrol sistemleri anlaşılmaktadır. Elektrikli ulaşım araçları , bu bölümün önemli bir harmonik kaynağını meydana getirir.

#### 1.2.1.3 Yüksek doğru gerilim ile enerji nakli (HVDC)

Bu teknikte , ac / dc - dc / ac dönüştürücüleri kullanılır. Enerji naklinde kullanılan büyük güçteki dönüştürücüler , önemli ölçüde harmonik üretmektedirler.

#### 1.2.1.4 Yeni enerji kaynakları kullanarak elektrik enerjisi üreten donanımların şebekeye bağlanması

Güç kaynağı olarak kullanılan rüzgar , fotoelektrik malzeme , güneş enerjisi , gelişmiş akümülatörler gibi yeni enerji kaynaklarını ve ayrıca magneto-hidrokinamik karakterli sistemleri önemli harmonik kaynakları olarak sayabiliriz.

#### 1.2.1.5 Statik Var sistemleri

Bu sistemde , bir ac kıyıcısı ile tetikleme darbeleri gönderilerek , transformator üzerinden baraya bağlı olan reaktörün endüktif akımı kontrol edilir. Her faz ayrı ayrı kompanze edilir ve dengesizlik önlenir . Çoğunlukla ark fırınlarının kompanzasyonunda , flikerin azaltılmasında ve simetrimede olumlu etkisi olan bu elemanlar, şebekeye harmonik üretirler. Direkt frekans dönüştürücülerini ile kullanıldığı zamanda bile harmonik üretmeye devam ederler.

#### 1.2.1.6 Kesintisiz güç kaynakları

Bir kesintisiz güç kaynağı doğrultucu , evirici , direkt geçiş devresi ve akümülatörden oluşur. Doğrultucu , üç fazlı şebeke gerilimini doğru gerilime çevirir , evirici ise bu doğru gerilimden genliği ve frekansı değişmeyen dalgalı bir gerilim üretir. Giriş enerjisi kesildiği zaman doğru gerilim devresine paralel bağlı olan akümülatör grubu , eviricide gerekli olan enerjiyi sağlamaya devam eder ve çıkışta hiç kesilmeyen bir enerji sağlamış olur.

Kesintisiz güç kaynakları , güç istasyonları kontrol sistemlerinde , demiryolu ve haberleşme sistemlerinde, askeri uygulama alanlarında , kumanda ve kontrol cihazlarının güvenlik sistemlerinde , havaalanlarında v.s gibi yerlerde kullanılırlar. Bu sistemlerde sözü edilen statik

dönüştürücüler, doğrultucu ve eviriciler güç elektronikli cihazlardan meydana geldiği için şebekeye harmonik üretirler.

#### 1.2.1.7 Direkt frekans dönüştürücüsüyle beslenen momentini büyük , hızı küçük motorlar

Ayrıca ele alınmasının nedeni, direkt frekans dönüştürücü uygulamalarının büyük ölçüde artmasıdır. Bu grupta ; lineer motorları , çimento ve maden endüstrisinde kullanılan motorları sayabiliriz.

#### 1.2.1.8 Endüstriyel ısıtma sağlayan fırınlarda tam periyod (Integral Cycle) kontrol tekniğinin kullanılması

Bu yöntem , 2 MW gücündeki ocak , fırın ve nokta kaynaklarının kontrolünde kullanılmakta ve şebekeye olumsuz etkiler yapmaktadır.

#### 1.2.1.9 Elektrikli otomobillerin kullanılması

Bu otomobillerde kullanılacak olan akü gruplarının yüklenmesi için güç doğrultucuları ve devreleri bulunur. Bu sistemlerde , güç elektronikli düzenlerden meydana geldiği için mutlaka harmonik üretecektirler.

### 1.2.2 Elektromagnetik aygıtlar

#### 1.2.2.1 Generatörler

En eski harmonik kaynaklardan biri olan generatörler, temel frekanslı gerilimleri üretirken , ister istemez harmonik frekanslı gerilimleri de meydana getirirler. Endüksiyon yasasına göre stator sargılarında endüklenen emk ,  $\phi$  endüksiyon akısı ile orantılıdır. Bu durumda emk ' nin sinüs şeklinde olması ,  $\phi$  ' nin de sinüs şeklinde olmasına bağlıdır. Halbuki çıkık kutuplu ve

kutup başlığı boyunca hava aralığı sabit kutuplu makinalarda , trapez şeklindedir. Bunun gibi sinüs biçiminde olmayan eğriler , tek sayılı sinüslü terimlerin toplamına eşit olduğu için , endüklenen emk ' da aynı dereceden harmonikleri içerir.

Generatör sargılarının yıldız - üçgen bağlanmasına , direkt veya bir direnç (reaktans) üzerinden topraklanma durumuna göre , harmoniklerin oluşumu değişir. Üçgen bağlantıda çoğunlukla daha çok harmonik akım üretildiğinden bu bağlantıdan kaçınılır. Yıldız bağlantı veya yıldız noktası yalıtılmış bağlantı tercih edilir. Çıkık kutuplu senkron makinalarda kutuplara uygun şekil verilir ve hava aralığı belirli bir şekilde düzenlenir . Oluklar yarı meyilli yapılır ise , gerilim eğrisinin tam sinüs biçimine yakın olması sağlanır.

#### 1.2.2.2 Transformatörler

Bilinen en eski harmonik kaynaklardan biri olan transformatörler de , bobinler v.s gibi demir çekirdeği bulunan sargılardır. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin lineer olmayışına bağlıdır. Şebekeden sinüs biçiminde bir gerilim alındığında , bir mıknatıslama akımı çekilir. Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği lineer olmadığından, bu mıknatıslama akımı artık sinüs şeklinde değildir. Doyma artıkça harmoniklerin genlikleri de artacaktır.

Harmonik akımlar , transformatörün primer reaktansı , hattın ve generatörün reaktansı üzerinden devresini tamamladığı için , bu elemanlar üzerinde harmonik gerilim düşümü meydana getirirler. Mıknatıslama akımındaki harmoniklerin şebekeye ulaşması , transformatör sargılarının bağlantı şekline , primer taraftaki yıldız bağlantılı sargılarda yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına , transformatördeki mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına göre değişir. Şebekedeki

mıknatıslama akımını düşürmek için alınacak önlem , magnetik endüksiyonun düşük tutulmasıdır. Modern transformatorlerde , kristalleri yönlendirilmiş ve soğuk haddelenmiş demir saç kullanılmakta ve diğerine göre 1/5 oranında harmonikleri azaltmaktadır.

#### 1.2.2.3 Elektrik Makinaları

Kolektörlü alternatif akım makinalarında , senkron makinalarda alan bozulması ve mekanik titreşimler , olukların ve kolektörün titreşmesi , hava aralığı ve relük - tans değişiminin oluşması gibi özellikler harmoniklere neden olmaktadır.

#### 1.2.3 Ark prensibi ile çalışan aygıtlar

##### 1.2.3.1 Ark fırını

Ark ocakları ve kaynak makinaları gibi normal çalışmalarını ark ile sürdüren cihazlar , şebekelerde önemli harmonikler oluştururlar. Ark , akım ile gerilim arasında lineer olmayan bir bağıntısının bulunduğu fiziksel bir olaydır. Ark ocaklarının ve kaynak makinalarının ürettikleri akımların harmonikleri tek veya çift her türlü dereceden olabilir. Bu harmoniklerin değerleri zamana bağlı olarak her an değişebilir. Harmonikler, ayrıca ark fırınının gücüne bağlı olarak değişir ve özellikle ergitme periyodunun ilk 15 dakikası esnasında çok büyük değerler alırlar.

##### 1.2.3.2 Civa ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri

Bu cihazlarda , ark prensibine göre çalışırlar. Tek olarak önemsiz sayılabilirler , fakat hepsi bir arada düşünüldüğü zaman önemli bir harmonik kaynağını oluştururlar.

Harmoniklere neden olan kaynakları , bu şekilde



özetleyebiliriz. Bu kaynaklar , tezin içindeki diğer bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Eğer herhangi bir tesiste harmonik üreten kaynaklar, % 20 veya daha fazla ise bir harmonik çalışması yapılmalıdır. Linear olmayan yüklerin etkilerini önceden tahmin etmek için, ilk olarak bu yükün simülasyonu gereklidir. Bundan sonra elde edilmiş olan harmonikler , harmonik güç şebekesi modelinde kullanılır. Güç şebekesi çözümü ile linear olmayan yüklerin neden olduğu gerilim karışıklıkları hesaplanabilir. Modelleme ve simülasyon konusu Bölüm 6 ' da incelenmiştir. Bölüm 7 'de ise elektrikli cer sistemlerine ait modelleme ve simülasyon örnekleri verilmiş , Bölüm 8 'de İdealtepe istasyonunda yapılan ölçümler sonucu alınan akım ve gerilim değerlerinin FFT sonuçları hesaplanmıştır.

Yukarıda yapılan açıklamalar ve verilen tanımlamalar doğrultusunda , elektrik sistemlerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri Tablo<sup>1</sup>( 1.1 ) ' de verilmiştir.

Tablo<sup>1</sup> ( 1.2 ) ' de ise şebekedeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar , Tablo<sup>1</sup>( 1.3 ) ' de bu etkileri azaltma çareleri gösterilmektedir.

---

<sup>1</sup> SARIOĞLU , K. vd ÖZKAYA , M. , ILICETO , F. , Haziran 1992. Müşterilerin Sebep Olduğu Bozucu Etkilerin Belirlenmesine İlişkin İncelemeler . TEK yayınları, ANKARA .

Tablo<sup>1</sup>1.1. Elektrik sistemi üzerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri

Bozulma Türü				N O	ALICI TÜRLERİ
GERİLİM DALGA - LANMASI	DENGE- SİZLİK (*)	HARMONİK	ARAHAR- MONİK		
+				1	ÖNEMLİ YÜKLER ( AÇMA-KAPAMA )
+				2	BÜYÜK MOTORLAR
+				3	IŞIK RAMPALARI (DİSKOTEKLER)
+	+	+	+	4	KAYNAK MAKİNALARI
	+			5	DİRENÇLİ DÖKÜM FIRINLARI
	+			6	İLETKENLİ ISITMA TESİSLERİ
	+			7	ARK ISITICILARI
	+			8	KÜL ERGİTME FIRINLARI
			+	9	PRESLER
	+			10	ELEKTROT İMALATINDA KULLANILAN REZİSTANSLI FIRINLAR
				11	LİNEER OLMAYAN AKIM GERİLİM ÖZELLİĞİ GÖSTEREN DONANIMLAR
+	+	+	+	a	- ARK OCAKLARI
	+	+		b	- ENDÜKSİYON OCAKLARI
		+		c	- DOYMUŞ TRAFOLAR
		+		d	- DOYMUŞ DEMİR ÇEKİRDEKLİ ENDÜKTANSLAR
				12	SİNÜS BİÇİMİNDE OLMAYAN AKIMLARI OLUŞTURAN GÜÇ ELEKTRONİK DÜZENEKLİ DONANIMLAR
		+		a	- STATİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER
		+	+	b	- FREKANS DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ
		+		c	- DİMMERLER
		+		d	- TELEVİZYONLAR

(\*) ORTA ve YÜKSEK GERİLİMDE GÖRÜLEN DENGESİZLİKLER İÇİNDİR.

Tablo<sup>1</sup> 1.2. Şebekedeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar

BOZULMA TURU			OLUMSUZLUKLAR
GERİLİM DALGA-LANMASI	DENGE-SİZLİK	HARMO-NİK	
+			-FLİKER
+		+	-CİHAZ VE TEÇHİZAT ZORLANMASI
	+		-TRAFO GEÇİŞ GÜCÜNÜN İZAFİ OLARAK AZALMASI
	+		-BESLEME SİSTEMİ KAYIPLARININ ARTMASI
	+	+	-ASENKRON VE SENKRON MAKİNALARDA KAYIPLARIN ARTMASINA BAĞLI OLARAK BELİRLİ VEYA KRİTİK İSINMALARIN MEYDANA GELMESİ
+	+		-KUMANDA VE REGÜLASYON SİSTEMLERİNİN ETKİLENMESİ
		+	-İSINMALAR SONUCUNDA MOTOR VE KONDANSATÖR ÖMRÜNÜN KISALMASI
		+	-KUMANDA SİSTEMLERİNDE BOZULMALAR
		+	-MERKEZİ VE UZAKTAN KUMANDA ALICILARININ HATALI ÇALIŞMASI
		+	-ŞEBEKEDEN BEKLENMEYEN VE ÖNCEDEN KESTİRİLEMİYEN REZONANSLARIN OLUŞMASI
		+	-TRAFOLARDA KAYIPLARIN ARTMASI VE İZALASYONUN ZORLANMASI
		+	-AKKOR FLEMANLI LAMBA ÖMÜRLERİNİN KISALMASI
		+	-KESİCİ KESME KAPASİTESİNİN ETKİLENMESİ
		+	-ÖLÇÜ SİSTEMLERİNİN VE SAYAÇLARININ HATALI ÇALIŞMASI

Tablo<sup>1</sup>.3. Bozucu etkileri azaltma çareleri

GERİLİM DALGALANMASI		DENGESİZLİK
- TESİS BAĞLANTISINI YETERLİ KISA DEVRE GÜCÜ OLAN NOKTADA YAPMAK VEYA NOKTANIN KISA DEVRE GÜCÜNÜ ARTIRMAK .		
- REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON TESİSİ KURMAK (GERİLİM DALGALANMASINI AZALTACAK DÜZEYDE).		- BİR FAZLI YÜKLERİN HER ÜÇ FAZ ÜZERİNDE DENGELİ DAĞILIMINI SAĞLAMAK.
O Z E L O N L E M L E R	MOTORLARDA	- KONDANSATÖR VE ENDÜKTANSLARLA DENGELİ TESİSATI KURMAK.(ÇOK BÜYÜK TESİSLER İÇİN BU TERTİBAT AYARLANABİLMELİDİR )
	-AKIM SINIRLAYICILARI KULLANMAK.	
	-YÜZY ETKİLİ ROTORLU MOTORLARI KULLANMAK.(ÇOK BÜYÜK REAKTANSLI)	
	-İŞLETME KOŞULLARINI İYİLEŞTİRMEK.	- STATİK DÖNÜŞTÜRÜCÜ ARASINDA ÇAPRAZ BAĞLANTI YAPMAK.( HARMONİKLER GÖZETİLMELİ )
	-YÜK DALGALANMASINI AZALTMAK.(VOLAN VE KÜTLE KULLANMA)	
	KAYNAK MAKİNALARINDA	
	-GERİLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN EŞ ZAMANLILIĞINI ÖNLEMELİ.	
	-DOĞRU AKIMLA ÇALIŞAN MAKİNA KULLANMAK.	
	ARK FIRINLARINDA	
	-DOĞRU AKIMLA ÇALIŞAN MAKİNA KULLANMAK.	
-ELEKTROT KUMANDALARINI DEĞİŞTİRMEK.		
NOT:SÖZÜ EDİLEN ÖNLEMLER FLİKER VE HARMONİK DENETİMİNİN OLUMLU BULUNMASI HALİNDE GEÇERLİDİR.		

Tablo<sup>1</sup> 1.3. (Devam) Bozucu etkileri azaltma çareleri

HARMONİK	ARA HARMONİK
- TESİS BAĞLANTISINI YETERLİ KISA DEVRE GÜCÜ OLAN NOKTADA YAPMAK VEYA NOKTANIN KISA DEVRE GÜCÜNÜ ARTIRMAK.	
- Rezonans yaratan kompanzasyon donanımlarını azaltmak.	- Mekanik kaynaklılar için , karşıt ağırlık veya volanlar yardımıyla genliklerin azaltılması.
- Harmonik filtreleri kullanmak.	- Dönüştürücülerde filtre kullanarak stasyonær araharmoniklerin azaltılması.
- Dönüştürücü sıralarını artırmak.	
- Değişik bağlantılı trafolar kullanmak. ( Örneğin 6 sıralı 2 dönüştürücü için 30 derecelik faz kaydırması yapmak )	- Motor rejiminin yavaş değişimini sağlamak. ( Anma akımının sınırlandırılması ile )
- Bazı durumlarda darbeli kumanda yerine darbe dizili bir kumanda kullanmak.	
- Şebeke işletme şemasını değiştirerek rezonans koşulu dışına çıkarmak.	

## BÖLÜM 2

### HARMONİK ANALİZİ

#### 2.1 Giriş

Harmonikleri temel frekansın integral katsayısı olan bir frekansa sahip bir periyodik dalganın , sinüs şeklindeki bileşeni olarak tanımlamıştık. Fourier analiz teorisine göre , sabit genlikteki sinüs biçimindeki bir dalga şeklinden ayrılan herhangi bir periyodik dalga şekli , temel frekansın integral katsayılarındaki harmonikleri içerir. Bozulmuş periyodik bir dalga şeklinin harmoniği , bir Fourier serisi ile açıklanabilir. Bu bölümde tüm yöntemler , sıra ile verilmiştir.

#### 2.2 Fourier Analizi

##### 2.2.1 Fourier analizi ve katsayıları

Periyodik bir  $x(t)$  fonksiyonunun Fourier Serileri, aşağıdaki ifade ile verilir.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cdot \cos \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) + b_n \cdot \sin \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) \right]$$

(2.1)

Bu ifade , periyodik bir fonksiyonun frekans domänenindeki

gösterilişini verir.

Burada  $a_0$ ,  $x(t)$  fonksiyonunun ortalama değeridir.  $a_n$  ve  $b_n$  serinin katsayıları iken,  $n$ . harmoniğin bileşenleri dikdörtgendir.  $n$ . harmonik vektörüne karşılık gelen,

$$A_n \underline{\phi}_n = a_n + j b_n \quad (2.2)$$

Genlik  $A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)}$  ile,

Faz açısı ise

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \quad \text{ile verilir.}$$

Verilen bir  $x(t)$  fonksiyonu için,  $a_0$  sabit katsayısı (bir  $T$  periyodu üzerinde)  $-T/2$ ' den  $T/2$ 'ye kadar (2.1) denkleminin her iki yanının integrale edilmesiyle elde edilir. Sağ taraftaki ifadeler integral sonucunda sıfıra eşit olduğundan, Fourier serisinin sabit terimi  $a_0$ , aşağıdaki denklem ile (Bk. Denklem 2.3) verilir.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) . dt \quad (2.3)$$

Bu dalga şeklinin  $T$  periyodları ile bölünmüş,  $-T/2$ ' den  $T/2$ ' ye kadar olan  $x(t)$  eğrisinin altındaki alandır.

$a_n$  katsayısı,  $\cos \left( \frac{2\pi m t}{T} \right)$  ifadesi ile (2.1) denkleminin çarpılması sonucu elde edilir. Burada,  $m$  herhangi bir sabit pozitif tamsayıyı gösterir. Bu ifade, integral işlemleri yapıldıktan sonra,  $n = 1 \rightarrow \infty$  için aşağıdaki hale dönüşür.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos\left(\frac{z\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.4)$$

Benzer şekilde  $b_n$  katsayısını bulmak için de , (2.1) denklemi ile  $\sin(z\pi nt/T)$  ifadesi çarpılır.  $n = 1 \rightarrow \infty$  için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \sin\left(\frac{z\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.5)$$

(2.3), (2.4) ve (2.5) denklemleri açısal frekansa göre aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.6)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.7)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.8)$$

### 2.2.2 Tek simetri

$x(t) = -x(-t)$  olursa , dalga şekli tek simetriye sahiptir. Bu durumda ,

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \cdot \sin\left(\frac{z\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.9)$$



olduğunda ,  $a_n$  terimleri tüm  $n$  değerleri için sifıra eşit olur. Bir tek fonksiyon için Fourier serileri, sadece sinüslü terimleri içerirler.

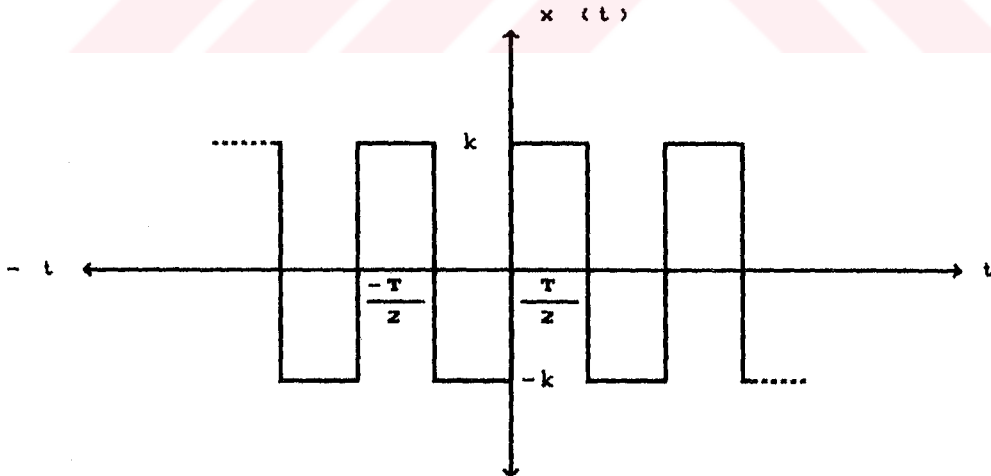
### 2.2.3 Çift simetri

$x(t) = x(-t)$  olursa , dalga şekli çift simetriye sahiptir. Bu durumda tüm  $n$  değerleri için  $b_n = 0$  ve

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (2.10)$$

olur. Bir çift fonksiyon için Fourier serileri sadece cosinüslü terimleri içerirler.

Belirli dalga şekilleri , seçilen zaman referans alınarak tek veya çift olabilir. Örneğin Şekil 2.1 kare dalgası , bir tek fonksiyon olarak çizilmiş ve  $T/2$  ile (dikey eksen ) orijin yer değiştirilerek basit bir çift fonksiyona dönüştürülmüştür.



Şekil 2.1. Kare dalga fonksiyonu

Düşey eksen , Fourier serilerinin gösterilimini basitleştirmek için de seçilebilir. Örneğin Şekil 2.2 dalga şeklinin düşey eksenini , bir tek simetri kare dalga

sabit terimini vermek için  $x(t) = k$  noktasında yeniden yerleştirilebilir.

#### 2.2.4 Yarı dalga simetrisi

$x(t) = -x(t + T/2)$  'ye eşit olursa, bir  $x(t)$  fonksiyonu yarı dalga simetrisine sahiptir.

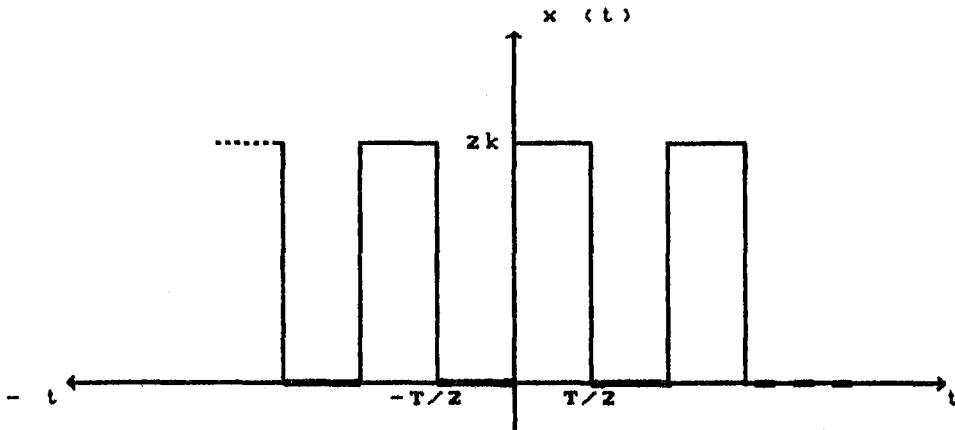
Örneğin,  $t + T/2$  'den  $t + T$  'ye kadar olan bir periyod üzerindeki dalga şeklinin durumu,  $t$  'den  $t + T/2$  'ye kadar olan periyod üzerindeki dalga şeklinin negatiftir. Bundan dolayı Şekil 2.1 'in kare dalga fonksiyonu  $t = -T/2$  ile yarı dalga simetrisine sahiptir.

Denklem (2.4) kullanılarak ve  $(-T/2, 0)$  aralığında  $x(t)$  ile  $x(t + T/2)$  yer değiştirerek ve  $x(t) = -x(t + T/2)$  tanımından yararlanılarak,  $a_n$  ifadesi aşağıdaki şekilde bulunur.

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \cdot dt \quad (2.11)$$

$n$  bir tek tamsayı ise,

denkleme eşit olur.



Şekil 2.2. Tek fonksiyonlu kare dalganın sabit terimi

Bununla beraber ,  $n$  bir çift tamsayı ise , bu durumda  $a_n = 0$  olur.

Benzer şekilde ,

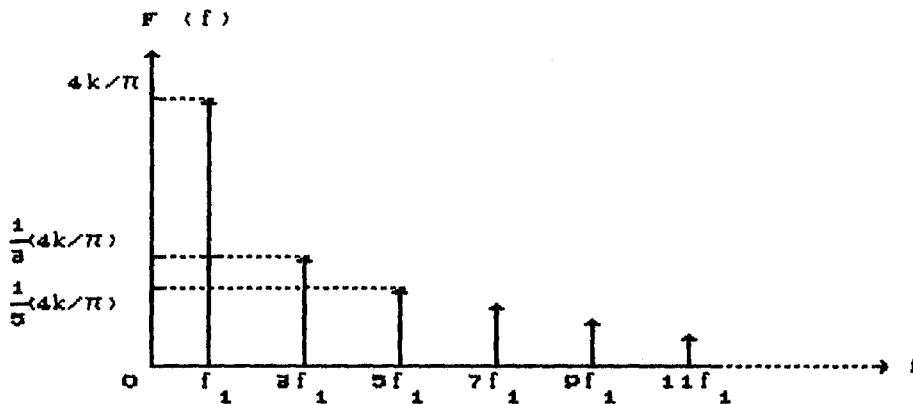
$$b_n = \begin{cases} n \text{ tek için , } \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \cdot \sin \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) \cdot dt \\ n \text{ çift için , } 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

olmaktadır.

Böylece yarı dalga simetrisine sahip olan dalga şekilleri , sadece tek sıralı harmonikleri içerirler. Şekil 2.1 'deki kare dalga şekli , yarı dalga simetrik bir tek fonksiyondur. Bu koşullar gözönüne alınarak , katsayılar için ifade ,

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} x(t) \cdot \sin \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) \cdot dt \quad (2.13)$$

şeklinde olur. Şekil 2.3 'de görüldüğü gibi , hat spektrum büyüklükleri harmonik derecesi ile ters orantılıdır.



Şekil 2.3. Bir kare dalganın hat spektrum gösterilişi

### 2.3 Fourier Dönüşümü ( Transform )

Fourier analizi , zaman domenindeki periyodik bir sinyal, sürekli olarak uygulandığı zaman , frekans domenindeki ayırık frekans bileşenlerinin bir serisini verir.

Fourier serisinin kompleks şekli denklem ( 2.14 ) ile tanımlanır. Bu denklemdeki  $X ( f_n )$  fonksiyonu , denklem (2.15) 'de olduğu gibi frekansın sürekli ve sonsuz bir fonksiyonu olur.

$$X ( f_n ) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x ( t ) . e^{-j2\pi f_n t} . dt \quad (2.14)$$

$$X ( f ) = \int_{-\infty}^{\infty} x ( t ) . e^{-j2\pi f t} . dt \quad (2.15)$$

$X ( f )$  'e göre , daima sürekli ve sonsuz olan  $x ( t )$  zaman fonksiyonu için , ifade aşağıdaki hale dönüşür.  $X ( f )$  ,  $x ( t )$  'nin spektral yoğunluk fonksiyonu olarak tanımlanır.

$$x ( t ) = \int_{-\infty}^{\infty} X ( f ) . e^{j2\pi f t} . df \quad (2.16)$$

Denklem ( 2.15 ) ve ( 2.16 ) , Fourier dönüşüm çiftlerini oluştururlar. Denklem (2.15) , " ilerlemiş Dönüşüm " , Denklem (2.16) " ters " veya " Ters Dönüşüm " olarak bilinir.

Genelde  $X ( f )$  kompleksdir ve

$$X ( f ) = \text{Re } X ( f ) + j \text{Im } X ( f ) \quad (2.17)$$

olarak yazılabilir.  $X ( f )$  ' in gerçek kısmı ,

$$\begin{aligned} \text{Re } X(f) &= \frac{1}{2} ( X(f) + X(-f) ) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \text{Cos } 2\pi ft \cdot dt \end{aligned} \quad (2.18)$$

Benzer şekilde ,  $X(f)$  ' in imajiner kısmı için de aşağıdaki ifadeden yararlanılır.

$$\begin{aligned} \text{Im } X(f) &= \frac{1}{2} j ( X(f) - X(-f) ) \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \text{Sin } 2\pi ft \cdot dt \end{aligned} \quad (2.19)$$

Frekans sinyalinin genlik spektrumu ,

$$| X(f) | = \left[ ( \text{Re } X(f) )^2 + ( \text{Im } X(f) )^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

ve yukarıdaki denklemden elde edilen faz spektrumu ,

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im } X(f)}{\text{Re } X(f)} \right] \quad (2.21)$$

olur. Denklem ( 2.17 ) ve ( 2.21 ) kullanılarak , ters Fourier dönüşümü , faz spektra bileşenleri ve genliğe göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} | X(f) | \cdot \text{Cos} [ 2\pi ft - \phi(f) ] \cdot df \quad (2.22)$$

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} | x(t) |^2 \cdot dt < \infty \quad (2.23)$$

olursa ,  $x(t)$  sinyalinin  $W$  enerjide sonsuz olabilir diği söylenir. Bu , sinyalin Fourier Dönüşümünün var olması için gerekli bir koşuldur.

Zamandaki sonsuzluğu uzatmak için , hesaba katılan

periyodik sinyaller , teorik olarak sonsuz enerjiye sahiptirler. Fakat , bir Fourier serisinin varlığı , sinyalin güç içinde sonsuz olmasını gerektirdiği zaman , P aşağıdaki koşulu karşılamak zorundadır.

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.24)$$

Bu durumda , periyodik sinyaller için Fourier dönüşümünün değişikliği denklem (2.25) ile tanımlanmış bir güç spektrumunu ile sonuçlanır.

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \quad (2.25)$$

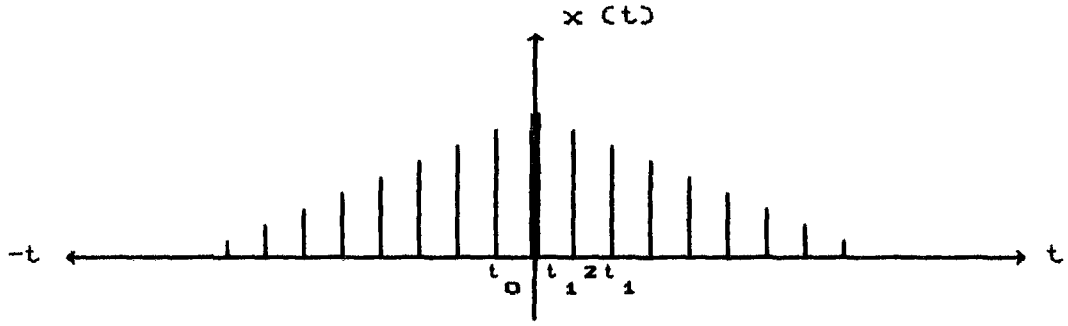
#### 2.4 Örneklenmiş Zaman Fonksiyonları

Bugün fonksiyonlar , zaman domenindeki örnekler ile kaydedilir ve Şekil 2.4 ' de olduğu gibi gösterilir. Burada  $f_s = 1 / t_1$  , örnekleme frekansını verir. Bu durumda sinyalin Fourier dönüşümü , her örneği  $e^{-j2\pi f n t_1}$  ile çarpılmış olan ayrı sinyallerin toplamı olarak ifade edilir.

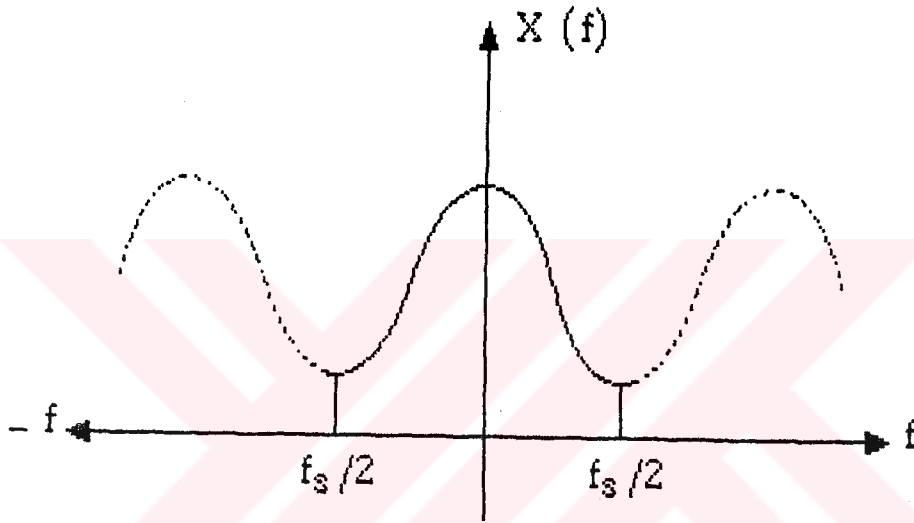
$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n t_1) \cdot e^{-j2\pi f n t_1} \quad (2.26)$$

Şekil 2.5 'de görülen frekans domeni spektrumunu periyodiktir ve süreklidir. Bundan dolayı , Ters Fourier dönüşümü , denklem ( 2.27) ile verilir.

$$x(t) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} X(f) \cdot e^{j2\pi f n t_1} df \quad (2.27)$$



Şekil 2.4. Örneklenmiş zaman domeni fonksiyonu



Şekil 2.5. Ayrık zaman domeni fonksiyonu için frekans spektrumu

## 2.5 Ayrık Fourier Dönüşümü ( Transform )

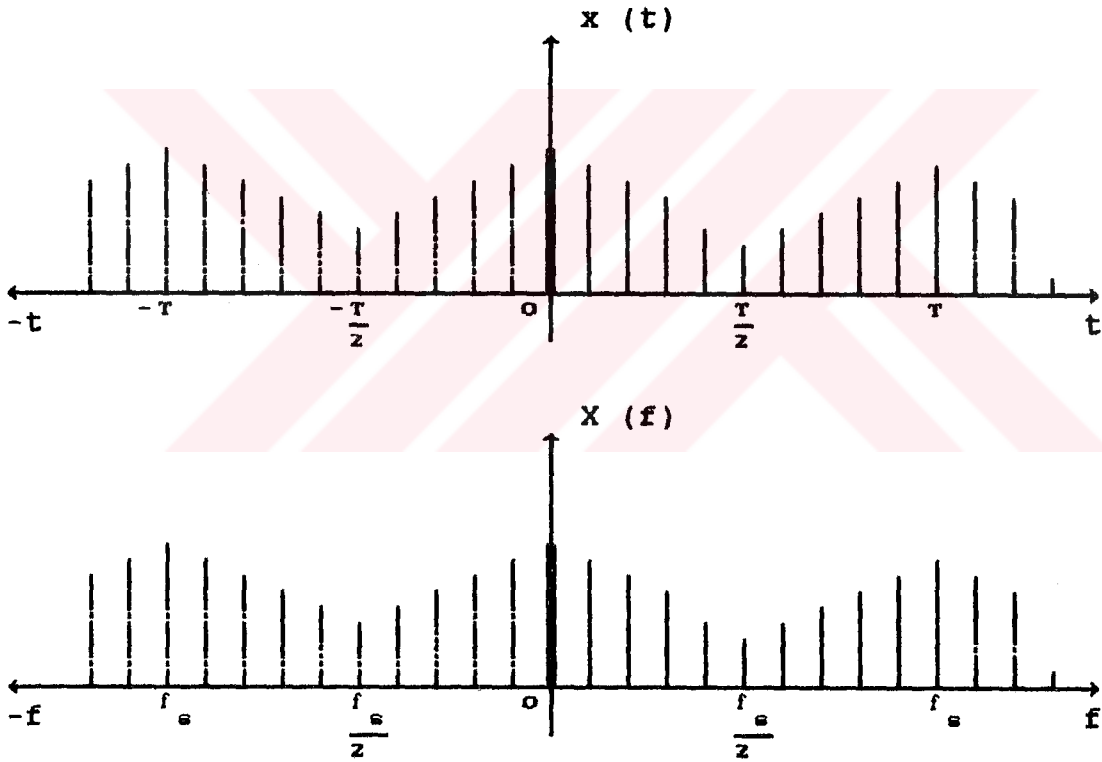
Bu bölümde göreceğimiz gibi , ayrık Fourier dönüşümü DFT sonlu uzunluktaki dizilerin Fourier gösterimidir. Ayrıca kendisi de sürekli bir fonksiyon değil , bir dizidir ve işaretin Fourier dönüşümünün frekans ekseninde eşit aralıklı örneklerine karşılık gelir.

Frekans domeni spektrumu da , zaman domeni fonksiyonları kadar iyi örneklenmiş bir fonksiyondur. Ayrık bileşenlerin toplamından bir Fourier dönüşüm çifti elde edilebilir.

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.28)$$

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) \cdot e^{j2\pi kn/N} \quad (2.29)$$

Hem zaman domeni fonksiyonu hem de frekans domeni spektrumu, periyod başına  $N$  örneklerinin bir toplamı ile Şekil 2.6 'daki gibi periyodik kabul edilir. Bu ayrık formda olan Fourier dönüşümü, sayısal hesaplama ile nümerik değerlendirmeye en uygun olanıdır.



Şekil 2.6. Ayrık zaman ve frekans domeni fonksiyonları

$W = e^{-j2\pi/N}$  ifadesi denklem (2.28) 'de yerleştirilerek yeniden yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \cdot W^{kn} \quad (2.30)$$



(2.30) denklemi , matrisel formda aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\left[ X (f_k) \right] = \frac{1}{N} \left[ W^{kn} \right] \cdot \left[ x (t_n) \right] \quad (2.31)$$

N örneklerini gösteren bir vektör iken ,  $\left[ X (f_k) \right]$  frekans domeninde fonksiyonların N bileşenlerini gösteren bir vektördür.

N zaman örneklerinden , N frekans bileşenlerinin hesaplanması , matris şeklini oluşturmak için  $N^2$  kompleks çarpımlarının bir toplamını gerektirir.  $\left[ W^{kn} \right]$  matrisindeki her eleman , ardışık bileşenler arasında tanımlanmış , saat ibresi yönünde  $2\pi p/N$  (  $p = 0,1,2, \dots (N - 1)$  ) devirli bir birim vektörünü gösterir.

Örneğin  $N = 8$  ise,

$$W = e^{-2\pi/8} = \cos \frac{\pi}{4} - j \sin \frac{\pi}{4} \quad \text{olur.}$$

Sonuç olarak ;

$$W^0 = - W^4 = 1$$

$$W^1 = - W^3 = ( 1/\sqrt{2} - j 1/\sqrt{2} )$$

$$W^2 = - W^6 = -j$$

$$W^3 = - W^5 = - ( 1/\sqrt{2} + j 1/\sqrt{2} )$$

Bunlar , sırasıyla  $\mp 0^\circ$ ,  $\mp 45^\circ$ ,  $\mp 90^\circ$  ve  $\mp 135^\circ$  içinde devredilmiş birim vektörler olarak düşünülebilir. Ayrıca  $W^8$  tam bir devirdir ve bu yüzden 1'e eşittir.

Örneğin,  $k = 5$  ,  $n = 6$  ise  $kn = 30$  ve

$W^{30} = W^{3*8+6} = W^6 = -j$  olur. Böylece  $W^{kn}$  değerlerinin sadece dört tek salt değeri vardır.

$N = 8$  durumu için ,  $[ W^{kn} ]$  matrisi şu şekilde gösterilir :

1	1	1	1	1	1	1	1
1	$W$	$-j$	$W^3$	$-1$	$-W$	$j$	$-W^3$
1	$-j$	$-1$	$j$	$1$	$-j$	$-1$	$j$
1	$W^3$	$j$	$W$	$-1$	$-W^3$	$-j$	$-W$
1	$-1$	$1$	$-1$	$1$	$-1$	$1$	$-1$
1	$-W$	$-j$	$-W^3$	$-1$	$W$	$j$	$W^3$
1	$j$	$-1$	$-j$	$1$	$j$	$-1$	$-j$
1	$-W^3$	$j$	$-W$	$-1$	$W^3$	$-j$	$W$

Frekans spektrumunun dc bileşeni  $X(f_0)$  , örnekleme sayıları ile bölünmüş olan , tüm zaman domeni örneklerinin cebirsel toplamı ile elde edilmiştir ve tüm örneklerin ortalama değeridir.

Daha sonraki satırlar , satır numarasına bağımlı bir devirle yüklenmiş olan her bir zaman örneğini gösterir. Böylece her ardışıl zaman örneği  $X(f_1)$  için ,  $1/N$  ' lik bir devirle döndürülür.  $X(f_2)$  için her bir örnek ,  $2/N$  ' lik devir ile döndürülür ve böylece devam eder.

## 2.6 Hızlı Fourier Dönüşümü ( Transform )

Büyük  $N$  değerleri için , hesaplama süresi ve ayrık Fourier dönüşümünün  $N^2$  kompleks çarpımlarının uygulama değeri oldukça yüksektir.  $[ W^{kn} ]$  matrisindeki elemanların bir çoğunun benzerlik avantajını kullanan , hızlı Fourier dönüşümü (FFT) olarak bilinen hesaplama yöntemi , denklem (2.31)'de  $\log_2 N$  çarpımlarını kullanarak aynı frekans bileşenlerini elde eder.  $N = 1024 = 2^{10}$  durumu için , 200 'ün üzerinde bir faktör ile hesaplama zamanından tasarruf yapılır.

(  $N/2$  )  $\log_2 N$  için , istenilen çarpımların sayısının -  
daki indirgeme ,

$$W^{N/2} = -W^0$$

$$W^{(N+2)/2} = -W^1 \text{ gibi tanımlarak elde edilir.}$$

Faktör matrislerini elde etmek için , ilk olarak tüm matris satırlarının yeniden düzenlenmesi gerekir. Satırlar binary temsili ile gösterilirse , bu durumda yeniden düzenleme bit tersi ile olur.

Örneğin satır 5 ,  $N = 8$  binary kodunda 100 olarak gösterilir. ( satır 1 ise 000 olur ) Bu durumda satır 2, binary kodunda 001 olacaktır. Böylece satır 2 ve 5 değiştirilir. Benzer şekilde , sırasıyla 011 ve 110 olarak gösterilen satır 4 ve 5 ' de değiştirilir. Bunun karşılığı olarak ifade edilen matris aşağıdaki şekilde elde edilir.

1	1	1	1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	-j	-1	j	1	-j	-1	j
1	j	-1	-j	1	j	-1	-j
1	W	-j	W <sup>a</sup>	-1	-W	j	-W <sup>a</sup>
1	-W	-j	-W <sup>a</sup>	-1	W	j	W <sup>a</sup>
1	W <sup>a</sup>	j	W	-1	-W <sup>a</sup>	-j	-W
1	-W <sup>a</sup>	j	-W	-1	W <sup>a</sup>	-j	W

Bu yeni matris ,  $\log_2 8 ( =3 )$  faktör matrisleri içinde bölünebilir. Her faktör matrisi , yalnızca her satırda 0 olmayan iki elemana sahiptir. Birinci satırda 1 'e eşittir.

1	1						
1	-1						
		1	-j				
		1	j				
				1	w		
				1	-w		
						1	w <sup>3</sup>
						1	-w <sup>3</sup>

1		1					
	1		1				
1		-1					
	1		-1				
				1		-j	
					1		-j
						1	j
						1	j

1				1			
	1				1		
		1				1	
			1				1
1				-1			
	1				-1		
		1				-1	
			1				-1

$N = 2^m$  eşitliğini kullanarak ,  $m$  bit binary sayıları ile  $k$  ve  $n$  ' i göstermek mümkündür. Aşağıdaki ifadelerde olduğu gibi ;

$$n = n_{m-1} 2^{m-1} + n_{m-2} 2^{m-2} + \dots + 4n_2 + 2n_1 + n_0 \quad (2.32)$$

$$k = k_{m-1} 2^{m-1} + k_{m-2} 2^{m-2} + \dots + 4k_2 + 2k_1 + k_0 \quad (2.33)$$

Burada  $n_i = 0.1$  ve  $k_i = 0.1$  olarak verilmiştir.

$N = 8$  için  $n = 4n_2 + 2n_1 + n_0$  ve  $k = 4k_2 + 2k_1 + k_0$  olur.

Burada  $n_2, n_1, n_0$  ve  $k_2, k_1, k_0$  binary bitleridir.

Bu durumda , denklem (2.30) , aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$X(k_2, k_1, k_0) = \sum_{n_2=0}^1 \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_0=0}^1 \frac{1}{N} x(n_2, n_1, n_0) \cdot W^{kn} \quad (2.34)$$

Bu yolla  $n$  ve  $k$ 'nin tanımlanması (2.30) denklemi - nin hesaplanmasını üç bağımsız aşamada gerçekleştirir.

$$A_1(k_0, n_1, n_0) = \sum_{n_2=0}^1 \frac{1}{N} x(n_2, n_1, n_0) \cdot W^{4k_0 n_2} \quad (2.35)$$

$$A_2(k_0, k_1, n_0) = \sum_{n_1=0}^1 A_1(k_0, n_1, n_0) \cdot W^{2(k_0 + 2k_1)n_1} \quad (2.36)$$

$$A_3(k_0, k_1, k_2) = \sum_{n_0=0}^1 A_2(k_0, k_1, n_0) \cdot W^{(k_0 + 2k_1 + 4k_2)n_0} \quad (2.37)$$

Bu algoritmanın oluşumunda kullanılan işlemlerin sırası Şekil 2.7 'de verilir. Her işlem bir kelebek gibi gösterilir. Şekil 2.7 ve denklem (2.37) 'den görüldüğü gibi  $A_3$  katsayıları, istenen  $x(k)$  katsayılarını içerirler, fakat ters binary derecesindedirler.

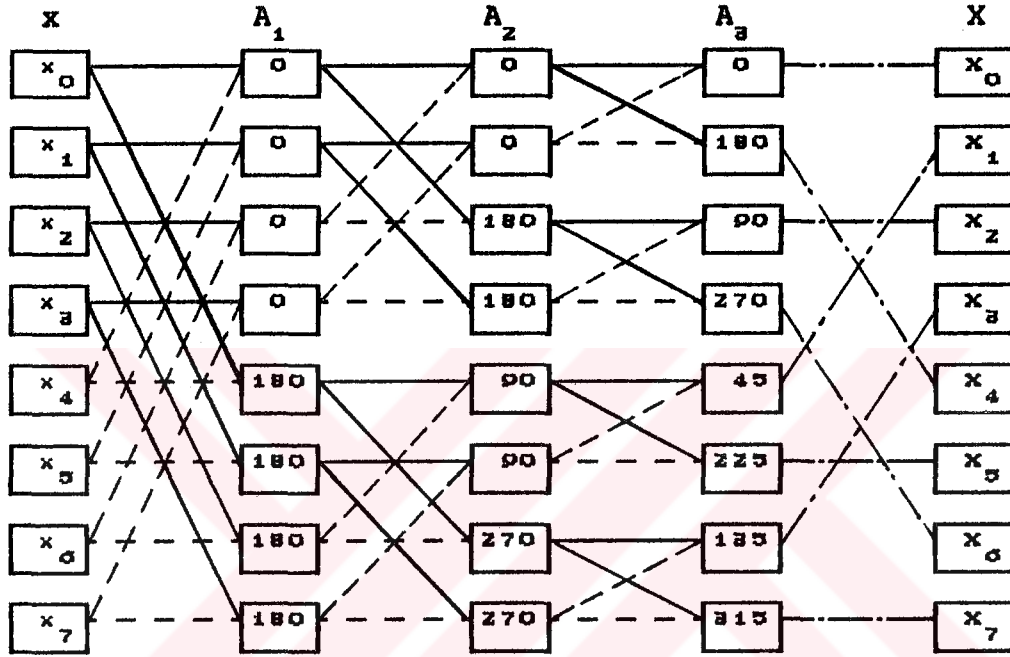
Binary şeklinde  $A_3$  derecesi,  $k_0 k_1 k_2$  'dir.

Binary şeklinde  $X(k)$  derecesi ise  $k_2 k_1 k_0$  olur. Bundan dolayı, binary karşılığı aşağıdaki şekilde verilir.

Binary Durumu	Karşıt Durumu
$A_3(3) = A_3(011) = X(110) = X(6)$	
$A_3(4) = A_3(100) = X(001) = X(1)$	
$A_3(5) = A_3(101) = X(101) = X(5)$	

Sınırlanmış bir band sinyalinin hızlı Fourier dönüşümü yüksek seviyeli bir programlama dili kullanılarak bir bilgisayarda bağlantısız bir sinyal haline (off-line)

getirilebilir. Burada sinyal , bilgisayardan uzak kayıt cihazında dijital olarak depolanmış ve örneklenmiştir. Alternatif olarak , Şekil 2.7 'de gösterilen " kelebekler " gibi hazırlanmış donanımın kullanılmasıyla , FFT algoritmasını gerçekleştirebilecek olan spektrum analizörlerinin kullanımı artmıştır.



Şekil 2.7. Hızlı Fourier dönüşümü için akış diyagramı  
( — yalnızca ekle ; - - , belirtilen açıda döndür ve ekle )

## 2.7 Hızlı Fourier Dönüşümü (Transform) Kullanımındaki Zorluklar

Harmoniklerin oluşumundan , ortaya çıkan problemlerin şiddeti , mevcut donanımın hassasiyetine ve dalga şekli bozulmasının genliğine bağlıdır. Bu problemler , sürekli problem ile arasıra olan hatalar arasında değişir. Örneğin kWh ölçümündeki hatalar ve ayrıca büyük arızalara yol açabilecek asıl hasarlara neden olabilirler.

Sadece aşırı harmonik bozulma kabul edilemez değildir , ama toleransa müsaade edilmez. Çok iyi bilinen harmoniklere ait problemler , harmonik filtrelerin yeniden yerleştirilmesine ve yeniden şekil alan basit sistemlere göre düzeltililebilir. Bununla beraber harmonik bozulmalar ve onların kaynakları doğruluğu kanıtlanabilir bir çözüm yerine getirilmeden önce tam olarak tanıtılmalıdır. Kapasitör grupları , harmonik kaynakları ve sistem içinde meydana gelen problemlerin yerinin bir harmonik ölçüm için önceden bilinmesi gerekir.

Bu gerçeklerin bilinmesi ölçümün nerede yapılması gerektiğini , hangi tip ölçümün alınacağını ve ne tip bir sonucun bekleneceğini hesaplamaya yardım eder.

Bu tip ölçümler , analizler ve hesaplamalar bilgisayar donanımları ile yapılır. Harmonik ölçümlerini bilgisayarla gerçekleştirmek için , Fourier veya hızlı Fourier dönüşümü kullanılmaktadır. Bir bilgisayarda FFT , sürekli Fourier dönüşümüne yaklaşan , ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ' nin hesaplanması için verimli bir metottür. Aşağıda sözü edilen problemler , hesaplamalar yapılırken göz önüne alınmalıdır.

### 2.7.1 Nyquist frekansı ve girişim ( Aliasing)

Daha önceki kısımlardaki Fourier dönüşümlerinde sözedildiği gibi ,  $k = N/2$  üzerindeki frekans bileşenleri , birim vektör ardışıl bileşenleri arasında  $\pi$  ' den daha büyük artışlarda devrediyorken , negatif frekanslar olarak tanımlanabilir.

$N = 8$  örneğinde , satır 3 ' ün elemanları  $-\pi/2$  için ardışıl olarak devrederler. Satır 7 elemanları , benzer şekilde  $-3\pi/2$  veya negatif frekans şeklinde  $\pi/2$  için devrederler.

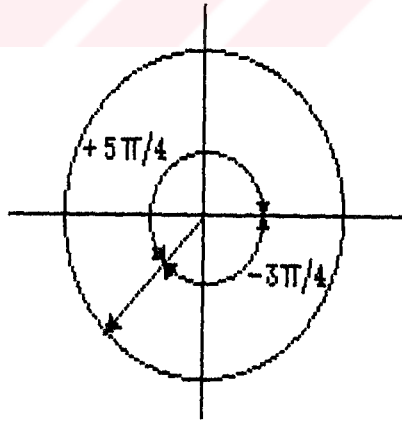
Genelde daha çok ,  $N$  çift ile ,  $p = (1,2,3,\dots,(N/2-1))$

için  $2\pi (N/2 + p) / N$  radyanları içindeki devir ,  $-2\pi (N/2 - p) / N$  radyanlarının bir negatif devrine karşılık gelir.

Şekil 2.8 'de görüldüğü gibi ,  $-X(k)$  ,  $k = 1$  ile  $N/2$  için  $X(N-k)$  'ya karşılık gelir.

Bu , örnekleme teoreminin bir yorumudur. Örnekleme frekansı , örneklenmiş sisteme doğru bir bilgi geçişi için , orijinal sinyalde elde edilmiş olan en yüksek frekansın en az iki katı olmak zorundadır. Yarı örnek - leme frekansındaki frekans bileşenleri , Nyquist fre - kansı olarak gösterilir.

Negatif frekanslar olarak , Nyquist frekansı üzerindeki frekansların gösterilimi , örnekleme oranının örneklenmiş dalga şeklinde mevcut olan en yüksek frekansın iki katından daha küçük olması gerektiğini ifade eder. Bundan dolayı , bu daha yüksek frekans bileşenleri , analiz içine hataları dahil ederek , Nyquist frekansı altında taklit bileşenler oluştururlar.



Şekil 2.8 Pozitif ve negatif açıların karşılığı

Örnekleme arasındaki birçok dönüşleri tamamlamak , yüksek frekans bileşenleri için mümkündür. Buna rağmen, yalnızca zaman içindeki ayık noktalarda örneklendiril - diklerinde , bu bilgi kaybolmaktadır.



Daha düşük frekansların oluşumunda , Nyquist frekansı üzerindeki frekansların bu yanlış yorumu " GİRİŞİM " veya " ALIASING " olarak adlandırılır. Şekil 2.9' da gösterilir.

Girişim olayını engellemek için , Şekil 2.10 ' da ideal karakteristiği görülen , sınırlanmış bir alçak geçiş filtre bandı içinden analog zaman domeni sinyalinin geçirmek gerekir.  $f_c$  kesim frekansı , Nyquist frekansına eşit olmak zorundadır. Uygulamada , bu pratik bir filtrenin lineer olmayan karakteristiklerinden dolayı , Nyquist frekansının yaklaşık % 80 ' i ile sınırlanır.

Böylece , örnek filtre edilmiş sinyalde kabul edilir. Ayırık Fourier dönüşümü uygulandığında , frekans spektrumu girişim etkisine sahip değildir ve orijinal sinyalde olan frekansların tam bir gösterimidir. Bu frekanslar , Nyquist frekansının altındadırlar. Fakat Nyquist frekansı üzerinde olan bu frekanslardaki bilgi , filtreleme işleminden dolayı kayıptır.

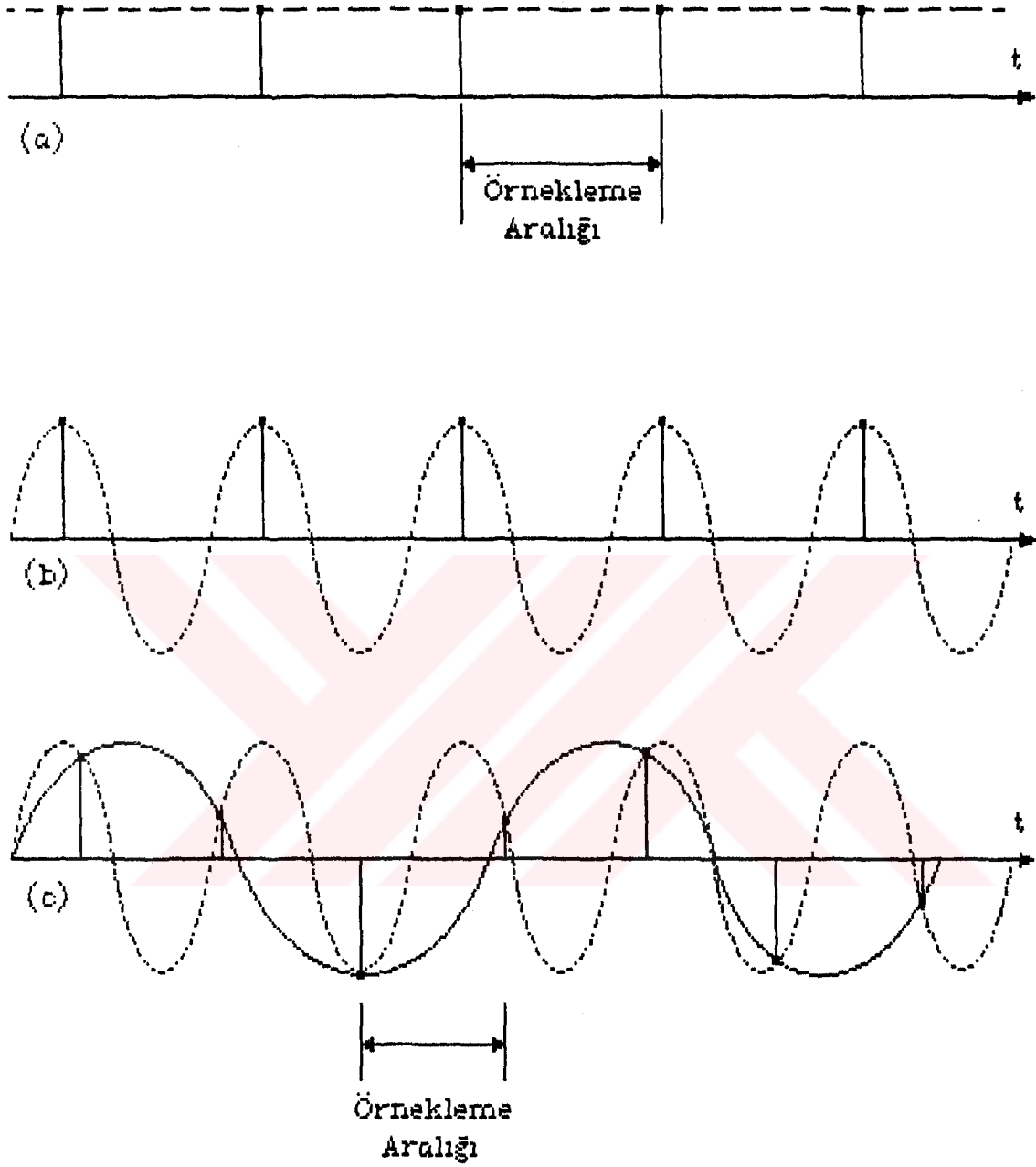
## 2.7.2 Sızıntı ( Spektral kaçak )

### 2.7.2.1 Pencere fonksiyonları

Bir zaman domeni sinyalinin herhangi bir pratik ölçümünde elde edilen sinyali , üzerindeki zaman boyunca sınırlamak normaldir. Bu işlem " pencereleme " olarak bilinir ve özellikle sabit olmayan sinyallerin ölçümü için kullanışlıdır.

Dalga şekillerinin dijital analizinde , sadece sinyal örneklerinin sonlu bir miktarı , yapılan bir spektral analizde kaydedilir. Böylece çift sabit sinyaller , sınırlanmış zaman verilerinden incelenir ve bu , sinyalin frekans spektrumunda hatalar oluşturabilir.

Pencereleme etkisi , sonsuz zaman sınırları içinde devam



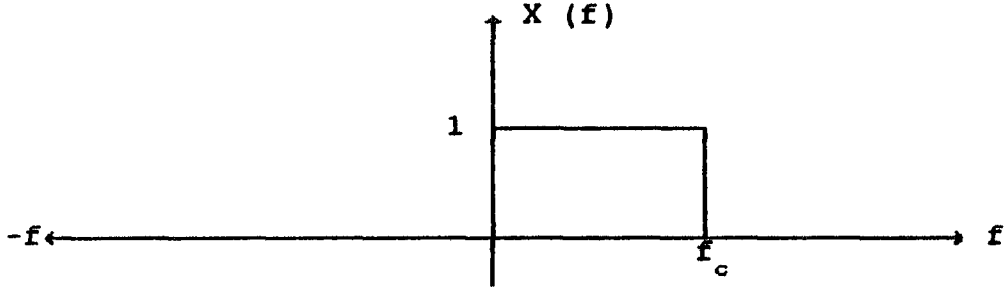
Şekil 2.9. " Girişim " etkisi

(a)  $x(t) = k$  ;

(b)  $x(t) = k \cdot \cos(2\pi f_n t)$  . (a) ve (b) için her sinyal dc olarak yorumlanır

(c) örneğinde , Nyquist veya örnekleme oranı altında ve üstündeki frekanslar ile iki ayrı sinyal olarak gösterilebilir.

eden bir zaman domeni fonksiyonunun tanımlanması ile en iyi şekilde görülebilir. Bunların dışında fonksiyon sıfırdır. En basit pencere fonksiyonları , dikdörtgen şeklindeki penceredir. Bir dikdörtgen şeklindeki pencere içinde sinyal sadece kendisidir. En çok bilinen pencereleme fonksiyonu , Hanning penceresidir. ( Arasına cosinus penceresi diye adlandırılır.)



Şekil 2.10.  $f_c$  kesim frekanslı ideal bir alçak geçiren filtrenin frekans domen karakteristiği

Fourier analizi , sınırlardaki sürekliliği ve fonksiyonların periyodikliğini kabul ettiği için , mevcut periyodik tanımındaki belirsizliği oluşturan pencerenin başlangıcındaki ve bitişindeki fonksiyon arasında sıçramalar meydana gelecektir. Sonuç hatası " Spektral Kaçak " olarak bilinir ve mevcut periyodik spektral bileşenlerin herbirine katılan , periyodik olmayan gürültüdür. Spektral kaçak etkisi , pencere fonksiyonunun şeklinin değiştirilmesi ile azaltılabilir.

### 2.7.3 Çit etkisi ( Picket fence )

Üçüncü bir problem , ara sıra " çit etkisi " olarak ifade edilir. Bu , her harmonik genliğinin doğruluğunu etkiler. FFT ayırık bölümlerden meydana geldiği için , sadece ayırık noktalara düşen frekanslar gerçek değerleriyle belirlenebilir. Sonuç olarak , frekans spektrumunu sanki bir parmaklıktan izleniyormuş gibi gerçekleştirir. Tepe değerleri ise parmaklığın dolu kısımlarının arkasında kaldığı için gözlenememiştir.

## BÖLÜM 3

### GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİNİN KONTROLÜ VE SINIRLAMASI İÇİN STANDARTLAR

#### 3.1 Giriş

Herhangi bir güç sisteminde harmoniklerin etkisini ince-  
lerken , uygun sınırları oluşturmak için kullanılan fak-  
törler vardır. Bu faktörleri , ana hatlarıyla aşağıdaki  
şekilde verebiliriz.

a ) İlgili harmonik akım ve gerilimlerin , genlikleri  
dikkate alınarak sistem harmoniklerinin tanıtımı.

b ) Bir rms değeri veya toplam harmonik bozulmadan (THD)  
etkilenen akım veya gerilimin toplam harmonik içeriği .  
Bu konuda ayrıntılı bilgi , ileriki kısımda ( Bk. 3.2 )  
verilmiştir .

c ) Gerekli olduğu takdirde taşıma ve dağıtım sistemleri-  
ni ayırt etmek için , sistem geriliminde ölçüm yapılır.

d ) Hem kaynağa hem de harmoniklere karşı sistemin bazı  
ölçümleri yapabilme özelliği olmalıdır. Sistem harmonik  
empedansları ile ilgili yeterli bilgi mevcut değilse,  
" Harmonik Kapasite " çoğunlukla genel bağlantı nok-  
tasındaki kısa devre seviyesi ile ifade edilir.

e ) Harmonik seviyelerinin sınırlanması ile ilgili tanım-  
lar seçilir. Bunlar , tepe değeri veya bir rms değerine  
bağlı olabilir ya da sıra ile bir ani seviyede , belli  
bir zaman periyodunda devam eden bir seviyede veya

tanımlı bir aralıkta birkaç anda ortaya çıkabilir.

f ) Ölçüm metodu kullanılır ve veriler elde edilir.

g ) Dağılmış yük tipi.

h ) Haberleşme ve ara donanımlardaki olası etkiler ve psöfometrik ( gürültü ) ağırlık faktörlerinin kullanımı.

ı ) Güç sistemindeki dalgalılık kontrolunun hesaba katılmasına duyulan ihtiyaç gibi herhangi bir özel kriterin sağlanması.

Pratikte, her standart yukarıdaki faktörlerin bir karışımını verir.

### 3.2 Bozulmanın Tanımı

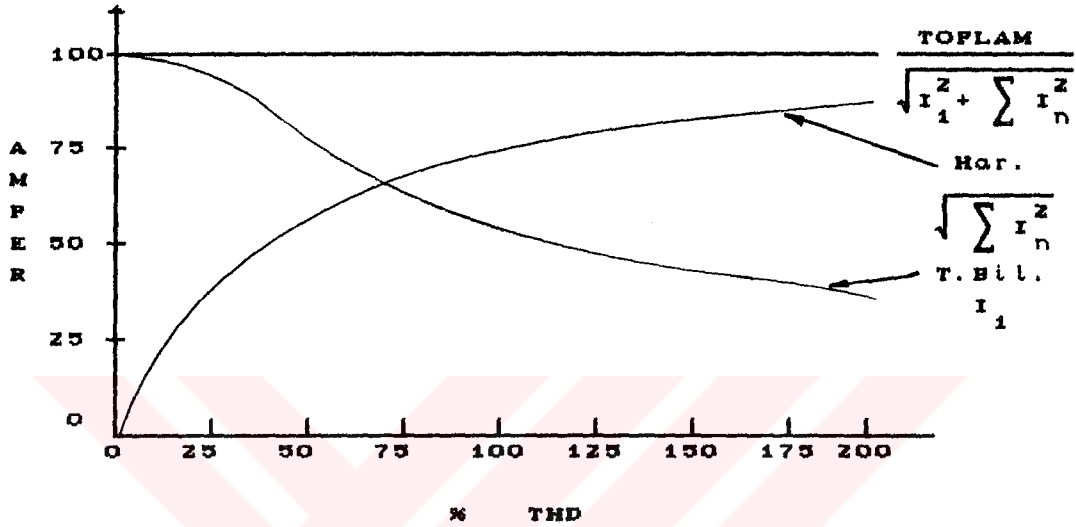
Toplam harmonik bozulmayı , gerilim ve akıma göre aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz.

$$\text{THD}_V = \frac{100. \left( \sum_{n=2}^n U_n^2 \right)^{1/2}}{U_1} \quad (3.1)$$

Burada  $U_1$  , sinyalinin temel bileşenidir ve  $U_2$  ' den  $U_n$  ' e kadar olan değerler ise , harmonik bileşenlerdir. THD ' yi bir başka şekilde akım cinsinden de ifade edebiliriz.

$$\text{THD}_I = \frac{100. \left( \sum_{n=2}^n I_n^2 \right)^{1/2}}{I_1} \quad (3.2)$$

Benzer şekilde , burada  $I_n$  harmonik bileşeni , n harmonik sayısını ,  $I_1$  temel bileşeni gösterir. Tablo 3.1 ve Şekil 3.1 ' de harmonik bileşenlerin genliği ile % THD arasındaki ilişki verilmektedir. % THD ile harmonik bileşenlerin genliği arasında lineer olmayan bir ilişki vardır ve bu yüzden % 100 'den daha büyük THD mümkündür.



Şekil 3.1. THD ve harmonik bileşen arasındaki ilişki

Bir diğer alternatif olarak , toplam harmonik bozulmayı tüm dalga şeklinin rms değerine bağlı olarak , şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\% \text{ Bozulma} = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{\sqrt{I_1^2 + \sum I_n^2}} \quad (3.3)$$

Bu tanımda , toplam harmonik bozulmanın yüzdesi % 100 'ü aşmamalıdır. ( Bk. Şekil 3.2 ve Tablo 3.1 ) Bu iki tanım arasında çok küçük bir farklılık vardır.(% 0.05 'den daha az bir farklılık ) Bununla beraber THD ' nin daha yüksek seviyeleri için ( lineer olmayan yüklerin akım bozulmaları gibi ) çok önemli farklılıklar olabilir. Örneğin , % 140 THD ' ya kadar harmonik bozulmaları , şahsi bilgisayarlar için , % 750 üzerindeki nötr akım bozulma-

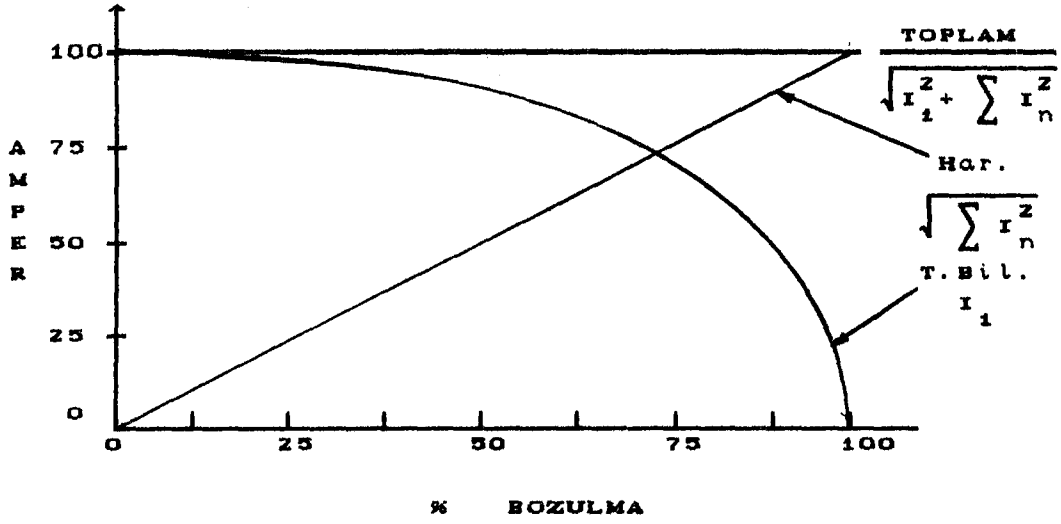
ları ise üç faz güç sistemleri için ölçülmüştür.

Tablo<sup>2</sup> 3.1. THD ve harmonik bileşenler arasındaki ilişki

TEMEL BİLEŞEN	HARMONİK BİLEŞENLER	TOPLAM RMS	% THD	ALTERNATİF BOZULMA TANIMI (%)
100.00	0.50	100.00	0.50	0.50
99.99	1.00	100.00	1.00	1.00
99.98	2.00	100.00	2.00	2.00
99.95	3.00	100.00	3.00	3.00
99.92	4.00	100.00	4.00	4.00
99.87	5.00	100.00	5.01	5.00
99.82	6.00	100.00	6.01	6.00
99.75	7.00	100.00	7.02	7.00
99.68	8.00	100.00	8.03	8.00
99.59	9.00	100.00	9.04	9.00
99.50	10.00	100.00	10.05	10.00
98.87	15.00	100.00	15.17	15.00
97.98	20.00	100.00	20.41	20.00
96.82	25.00	100.00	25.82	25.00
95.39	30.00	100.00	31.45	30.00
91.65	40.00	100.00	43.64	40.00
86.60	50.00	100.00	57.74	50.00
80.00	60.00	100.00	75.00	60.00
71.41	70.00	100.00	98.02	70.00
60.00	80.00	100.00	133.33	80.00
48.59	90.00	100.00	206.47	90.00

Harmonik bozulma faktörü , bara geriliminin temel bileşeninde var olan toplam etkisini ölçmek için hızlı bir yoldur. IEEE Standart 519 (1) , harmonik gerilim bozulma faktörü sınırlamasına göre kurallara kesinlikle uyar.

<sup>2</sup> GRUZZ , T. M. , July / August 1991. Uncertainties in Compliance with Harmonic Current Distortion Limits in Electric Power Systems . IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 27 , no. 4 , p. 680-685.



Şekil 3.2. Alternatif bozulma tanımı ve harmonik bileşen arasındaki ilişki

Harmonik bozulma standartları , aşağıda sıralanmış olan nedenlerden dolayı gereklidir.

i ) Kullanıcıların uygun bir besleme gerilim dalga şekline sahip olmalarını sağlamak ,

ii ) Sistemdeki mevcut elemanların toleransları ölçüsünde bozulmaları sınırlamak ,

iii) Güç sisteminin diğer sistemlerin çalışması ile girişimine engel olmak .

IEEE Standart 519-1981 , harmonik gerilim bozulma faktörü sınırlamasına ait değerleri belirtir. Bu değerler Tablo 3.2 ' de verilir.

Bu konu ile ilgili olarak çeşitli standartlar ileriki kısımlarda ayrıntılı olarak ele alınır.

Bir güç sisteminde , tolerans tanınabilen gerilim bozulma miktarı , sinüs şeklinde olmayan dalga şekillerine duyarlı olan ve onunla bağlantılı olan donanımla ilgilidir.



Tablo 3.2. Harmonik gerilim bozulma sınırları<sup>3</sup>

Güç Sistemi Gerilim Seviyesi	Sistem <sup>4</sup> Dönüştürücüsü (%)	Genel Güç Sistemleri (%)
460 V	10	5
2.4 - 6.9 kV	8	5
115 kV ve üzeri	1.5	1.5

Gerilim bozulması verilen sınırlar içinde tutulabilirse, diğer elemanlar normal olarak çalışabilirler.

### 3.3 Ulusal Harmonik Standartlar

Çeşitli ulusal harmonik standartlar arasındaki farklılıkları tanımlamak için , birçok standart özetlenmiştir.

Düşünülen tüm standartlar , toplam harmonik bozulmalar-  
daki sınırları oluştururlar. Harmonik bir bileşenin izin verilen seviyesi , genelde sistem gerilimiyle bağlantılıdır , iletim ve dağıtım sistemleri arasında bazen daha büyük bir fark görülebilir. Bir güç sistemindeki akım veya gerilim harmoniklerinin seviyesini gözlemek için, ölçümler yapılmalıdır. Çoğunlukla ölçüm yöntemleri ile ilgili bilgiler standartlarda belirtilmezler.

Çeşitli ülkelere ait harmonik standartlar diğer kısımlarda özet olarak verilmiştir.

<sup>3</sup> Bu değerler IEEE 519-1981 standartlarından alınmıştır.

<sup>4</sup> Gerilim bozulmasından etkilenmemiş yük ve dönüştürücü -  
leri besleyen sistemdir.

### 3.3.1 Fransa

Fransa güç sistem otoriteleri , ortak bağlantı noktasında tek başına etkili olan her tüketiciye göre sınırları tespit eder. Bu sınırlar , çift harmonikler için temel bileşenin % 5 'sı , tek harmonikler için % 1 'i , toplam harmonik bozulma için % 1.5 ' sı olarak verilir. Tüm tüketiciler bağlı olduğu zaman , bu sınırlar ortak bağlantı noktasındaki toplam harmoniklerin % 5 'i aşmamasını sağlayacak şekilde seçilmişlerdir.

Dönüştürücü boyutlarının hesabı , aşağıdaki denklemlerden türetilen ( ARRILLIAGA 1985 ) bir harmonik empedans değerine bağlıdır.

$$Z_n = \alpha_1 \cdot n \cdot Z_{kk} \quad (3.4)$$

Burada ,

$Z_n$  : bağlantı noktasındaki şebekenin harmonik empedansını ,

$$Z_{kk} = U_1 / I_k \quad (3.5)$$

formülünde ise ,

$Z_{kk}$  : kaynak noktasındaki kısa devre empedansını ,

$U_1$  : temel bileşen gerilim genliğini ,

$I_k$  : amper olarak üç faz kısa devre akımını ,

$n$  : harmonik derecesini ,

$\alpha_1$  : herhangi bir katsayıyı temsil eder.

Bu katsayı , yüksek gerilim sistemlerinde 2 , orta gerilim sistemlerinde 3 , düşük gerilim sistemlerinde 1 olarak alınır.

6 ve 12 darbeli dönüştürücüler için ,  $I_k / I_{nom}$  değerleri aşağıda tablo (Bk.Tablo 3.3) halinde verilmiştir. Burada  $I_{nom}$  dönüştürücü nominal akım değeridir.

Tablo<sup>5</sup> 3.3. Altı ve Oniki darbeli dönüştürücüler için  $I_k / I_{nom}$  değerleri

Sistem Gerilimi	6 darbe dönüş.	12 darbe dönüş.
YÜKSEK GERİLİM	240	150
ORTA GERİLİM	300	225
ALÇAK GERİLİM	120	75

### 3.3.2 İsveç

İsveç 'deki güç sistem yetkilileri tarafından 24 kV ' a kadar olan sistem gerilimlerindeki dönüştürücü nominal değerleri sınırlandırılmış olup , bu sistem gerilimine karşı izin verilen toplam harmonik bozulma ( THD ) sınırları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo<sup>5</sup> 3.4. % THD 'ye bağlı olarak sistem gerilimi

Sistem Gerilimi	% THD
400 / 230 V.	4.0
3.3 kV ile 24 kV	3.0
64 kV ' a kadar	1.0

Tablo<sup>5</sup> 3.5. Darbe sayısına bağlı olarak % sistem kısa devre nominal değeri

% sistem kısa devre nominal değeri	Darbe Sayısı
0.5	< 6
1.0	6
2.0	12
3.0	>12

<sup>5</sup>ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P.S. , 1985. Power System Harmonics . John Wiley and Sons.

### 3.3.3 Amerika

The IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Convertors , sadece yüzde olarak toplam harmonik bozulma sınırlarını belirtir. Yüzde olarak , THD sınırları aşağıdaki tabloda ( Bk Tablo 3.6) verilmiştir.

Tablo<sup>5</sup> 3.6. % olarak THD sınırları

Sistem Gerilimi	Genel Güç Sistemi ( % )	Ayrılmış Olan Güç Sistemi( % )
2.4 - 69 kV	5.0	8.0
115 kV ve üzeri	1.5	1.5

Burada ayrılmış olan sistemden kastedilen , gerilim bozulması tarafından etkilenmemiş yükleri ve yalnızca dönüştürücüleri servise almak için kullanılan sistemlerdir.

### 3.3.4 Almanya

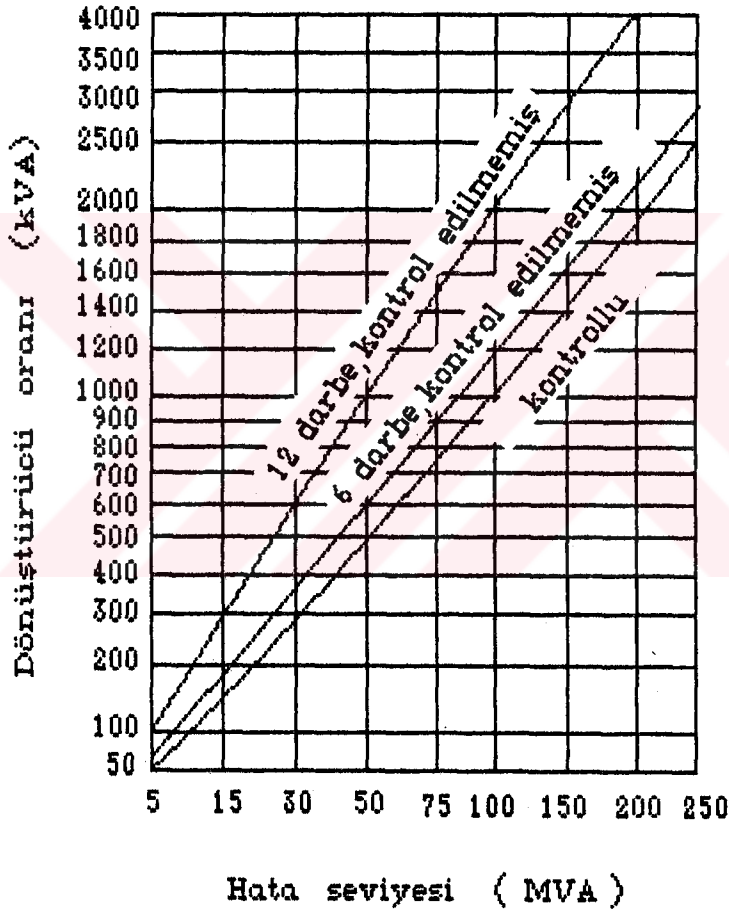
DIN 57160 ( VDE 0160 / 11.81 ) standardı , sistem hata seviyesi % 1 ' den daha büyük olmayan harmonikleri üreten donanımlar için bir oran verir. İlgili harmonik seviyeleri 15. harmoniğe kadar , temel bileşen geriliminin % 5 ' ine getirilir. 100. harmonikte seviye % 1 ' e iner. Toplam harmonik gerilimi , % 10 ' u aşmaz.

### 3.3.5 Avustralya

Avustralya standardı AS2279 - 1979 , iki ayrı kısımdan oluşur. Bunlardan birincisi dahili donanımla , ikincisi güç sistemi ile ilgilidir. Standartın ikinci kısmı üç ayrı durum altında çalışmaktadır. 1. durumda donanım , 75 kVA ' lık bir maksimuma ( 415 V ile 33 kV üzerinde bir primer dağıtım sistemi için 500 kVA ) ve kaynak

noktasının kısa devre seviyesinin % 3 ' üne kadar çıkar. Tek faz donanımı , aynı zamanda 415 V , 7.5 kVA veya 240 V , 5 kVA ' yı aşmayacak şekilde bağlanır.

2. duruma göre bağlantı , Şekil 3.3 ' e göre yapılır ve izin verilen sınırların % 75 ' in içindeki bozulma seviyesinde olması sağlanır. 2. duruma göre THD sınırları Tablo 3.7 'de gösterilir.



Şekil<sup>3</sup> 3.3. AS2279 için hata seviyesine karşı dönüştürücü boyutu ( Herhangi bir tek harmonik için % 1 gerilim bozulması esas alınmıştır )

<sup>3</sup>ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P.S. , 1985. Power System Harmonics . John Wiley and Sons.

Tablo<sup>5</sup> 3.7. İkinci durum için THD sınırları

	SİSTEM GERİLİMİ	THD (%)	TEK (%) HARMONİK	ÇİFT (%) HARMONİK
PRİMER ve SEKONDER DAĞITIM	33 kV 'a kadar	5	4	2
TAŞIMA	22.33 ve 66 kV	3	2	1
ALT TAŞIMA	110 kV ve üzeri	1.5	1	0.5

3. durum ise , yukarıda belirtilen koşulları sağlamayan tüm yükler için uygulanır. Bundan dolayı standartlarda belirtilen prosedüre uygun olarak sistem ve yükün detaylı olarak analiz edilmesi gerekir.

### 3.3.6 Finlandiya

Finlandiya 'daki güç sistem yetkilileri tarafından , ortak bağlantı noktasındaki izin verilen harmonik seviyeler ile toplam harmonik bozulma sınırları tesbit edilmiş olup , bu sınırlamalar Tablo 3.8 ' de verilmiştir.

Ayrıca ortak bağlantı noktasına herhangi bir tüketici bağlandığı zaman oluşabilen akım harmonik seviyeleri içinde , bazı sınırlamalar getirilmiştir. Söz konusu bu sınırlamalar , mutlak değer akım seviyesi olarak ifade edilmezler , buna karşın tüketici referansının bir yüzdesi olarak tanımlanabilirler.

Bu akım , ( ARRILLIAGA 1985 ) tüketicinin saat başına ortalama gücünden (  $P_t$  ) ve nominal sistem geriliminden (  $U_{nom}$  ) hesaplanır.

$$I_{ref} = P_t / ( \sqrt{3} U_{nom} ) \quad (3.6)$$

Bu durumdaki sınırlar , aşağıdaki tabloda (Bk. Tablo 3.9)

verilen standart içinde listelenir.

Tablo<sup>3</sup> 3.8. Ortak bağlantı noktasında izin verilen harmonik seviyeler ve THD gerilimi

Sistem Gerilimi	(%) Gerilim THD 'si	Tek olarak verilen Harmonik Seviye (%)
1 kV	5	4
3-20 kV	4	3
30-45 kV	3	2
110 kV	1.5	1

Tablo<sup>3</sup> 3.9. Ortak bağlantı noktasına herhangi bir tüketici bağlandığı zaman izin verilen harmonik seviye ve THD akımı

Sistem Gerilimi	(%) THD Akımı	Tek olarak verilen Harmonik Akım (%)
3-20 kV	10	8
30-45 kV	7	6
110 kV	5	4

### 3.3.7 Yeni Zelanda

Yeni Zelanda ' da bulunan otoriteler , 66 kV üzerindeki gerilimler için taşıma sistemlerindeki akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlarını belirtirler. Bu değerler, sırasıyla Tablo (3.10) ve (3.11) 'de verilmiştir.

Tüketicilerin maksimum taleplerine göre, ortak bağlantı noktasında , harmonik kapasite paylaşılır. Her bir tüketici için , müsaade edilen " harmonik tolerans " aşağıdaki gibi ifade edilir. ( ARRILLIAGA 1985 )

$$\text{Harmonik Tolerans} = S_t / S \quad (3.7)$$

Burada ,  $S_t$  tüketicinin kVA olarak maksimum güç istediğini

ve S ise kVA olarak , ortak bağlantı noktasındaki kaynak kapasitesini verir. Dağıtım sisteminde , 66 kV ' un altındaki gerilimler için , toplam gerilim harmonik bozulmasına % 5 ' lik bir sınır uygulanır.

Sınırlar , % 4 ' lük tek harmonik gerilim bileşenleri ve % 2 ' lik çift harmonik gerilim bileşenleri için belirtilir.

Tablo<sup>5</sup> 3.10. 66 kV ve üstündeki gerilimler için harmonik sınırlamalar

Harmonik Derecesi n	Gerilim Sınırı ( Faz-toprak harmonik gerilimi nominal faz- toprak sistem geriliminin bir yüzdesi olarak ifade edilir. )
3	2.3
5	1.4
7	1.0
9	0.8
11	0.7
13	0.6
15	0.5
17-21	0.4
23-49	0.3
2	1.2
4	0.6
6	0.4
8 ve 10	0.3
12-50	0.2



Tablo<sup>5</sup> 3.11. Akım harmonik sınırları

Harmonik Derecesi n	Harmonik Akım Sınırı ( Nominal sistem geriliminde amper olarak ifade ifade edilir.)		
	220 kV	110 kV	66 kV
	3	5.7	2.9
5	3.4	1.7	1.1
7	2.5	1.3	0.8
9	1.9	1.0	0.6
11	1.6	0.8	0.5
13	1.4	0.7	0.4
15	1.2	0.6	0.4
17	1.0	0.5	0.3
19 ve 21	0.9	0.5	0.3
23	0.8	0.4	0.3
25-49	0.7	0.4	0.3
2	2.9	1.5	0.9
4	1.5	0.8	0.5
6	1.0	0.5	0.3
8	0.8	0.4	0.3
10	0.6	0.3	0.2
12 ve 14	0.5	0.3	0.2
16 ve 18	0.4	0.2	0.2
20-50	0.3	0.2	0.2

### 3.3.8 İngiltere

İngiltere 'de , Engineering Recommendation G5 / 3 , dönüştürücü boyutlarının değerlendirilmesi için, üç aşamalı bir yaklaşım sunar. Birinci aşama , harmonik seviyeleri detaylı bir şekilde düşünülmeden bağlanmış olan farklı tipde harmonik üreten donanımın maksimum boyutlarını belirtir. Bunlar tablo ( Bk . Tablo 3.12) halinde verilmiştir. İkinci aşamada , sınırlar sistemdeki hem harmonik akım hem de harmonik gerilim bozulma sınırlarını kontrol eder. ( Bk. Tablo 3.13 ve 3.14 )

Tablo<sup>5</sup> 3.12. Birinci aşama sınırları altında ac regülatör donanımlarının ve dönüştürücünün maksimum boyutları

ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ KAYNAK SİSTEM GERİLİMİ (kV)	ÜÇ FAZ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ			ÜÇ FAZ AC REGÜLATÖRLERİ	
	3 Darbe (kVA)	6 Darbe (kVA)	12 Darbe (kVA)	6 TRİSTÖR (kVA)	ÜÇ TRİSTÖR ÜÇ DİYOT (kVA)
0.415	8	12	-	14	10
0.6 ve 11	85	130	250 <sub>6</sub>	150	100

Tablo<sup>5</sup> 3.13. İkinci aşama sınırları<sup>7</sup> altında ortak bağlantı noktasındaki herhangi bir tüketici için izin verilen harmonik akımlar

Kaynak Sistem Gerilimi (kV)	Harmonik Sayısı ve Akımı (A r.m.s)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	10	5	5	5	6	4	6	
0.6 ve 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

<sup>5</sup>ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P.S. , 1985. Power System Harmonics . John Wiley and Sons.

<sup>6</sup> Bu limit, 12 darbeleri cihazlara ve aynı zamanda 12 darbe cihazlar gibi çalışan 6 darbe cihaz kombinasyonlarına uygulanır.

<sup>7</sup> 0.5 A veya + % 10 'luk bir toleransa 2 harmonikten daha fazlası uygulanmadığı takdirde müsaade edilir.

Tablo<sup>5</sup> 3.14. Sistemdeki herhangi bir noktada harmonik gerilim bozulma sınırları

ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ KAYNAK SİSTEM GERİLİMİ (kV)	TOPLAM HARMONİK GERİLİM BOZULMASI , THD <sub>V</sub> (%)	HARMONİK GERİLİM BOZULMASI (%)	
		TEK	ÇİFT
0.415	5	4	2
6.6 ve 11	4	3	1.75
33 ve 66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

Tablo 3.15 ' de ise , harmonik akım sınırlarına karşılık gelen tek dönüştürücülü bir donanımın maksimum yükü gösterilmiştir.

Güç sistemlerindeki gerilim değerlerine göre oluşan harmonik bozulmaları içeren sınırlamalar , Türkiye 'de dahil olmak üzere çeşitli ülkeler için Tablo 3.16 'da gösterilmiştir.

Tüketici yükü ve cihazların yanında iletim ve dağıtım sistemlerindeki donanımların harmoniklere karşı korunması için , gerilim bozulmalarına getirilen sınırlamalar, yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Gerilim bozulmasının doğal bir sonucu olarak sinüs şeklinde olmayan akımlar , kısa devre gücünün yüksek ( empedansın küçük ) olduğu noktalarda yüksek genlikli harmonik akımlar üretirler. Bu durumlarda gerilim harmoniklerinin etkisiz olmasına karşın , akım harmonikleri haberleşme devrelerinde önemli problemler oluşturabilir.

Bu nedenle , elektromagnetik girişimi ve sistemde yer alan donanımlardaki kayıpları verilen sınırlamalar içinde tutabilmek için , akım harmoniklerinin de sınırlandırılması gereklidir.

Tablo 3.15. Harmonik akım sınırlarına karşılık gelen tek dönüştürücülü bir donanımın maksimum yükü

ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ KAYNAK SİSTEM GERİLİMİ (kv)	DÖNÜŞTÜRÜCÜ TİPİ	MÜSAADE EDİLEN kVA KAPASİTESİ VE ÜÇ FAZLI DONANIMLARIN EFEK-TİF DARBE SAYISI KARŞILIĞI		
		8 Darbe	6 Darbe	12 Darbe
0.415	KONTROLSUZ	-	150 B	300
	YARI-KONTROLLU	-	65	-
	KONTROLLU	-	100	150
6.6 ve 11	KONTROLSUZ	400	1000 B	3000
	YARI-KONTROLLU	-	500 B	-
	KONTROLLU	-	800	1500
33	KONTROLSUZ	1200	3000 B	7600
	YARI-KONTROLLU	-	1200 B	-
	KONTROLLU	-	2400	3800
132	KONTROLSUZ	1800	5200 B	300
	YARI-KONTROLLU	-	2200 B	-
	KONTROLLU	-	4700	7500

8

Bu ifade ile gösterilenler, üç tristörlü üç diyotlu yarı - kontrollu köprüleri belirtirler.

Buna göre gerilim ve akım harmonikleri sınırlandırma değerleri , sırasıyla Tablo 3.17 ve 3.18 ' de gösterilmiştir.

Bu tablolarda , ani harmonik akım ve geriliminin yanında toplam bozulma faktörü de sınırlandırma kriteri olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler , Türkiye Elektrik Kurumu ' ndan temin edilmiş olup , üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bundan dolayı bu verileri son değerler olarak belirtmek mümkün olmamaktadır.



Tablo 3.16. Çeşitli ülkeleri kapsayan harmonik standartlar

ÜLKELER	GERİLİM (kV)	YÜZDE OLARAK ( % )				
		THD <sub>V</sub>	THD <sub>I</sub>	$V_n/V_1$ TEK	$V_n/V_1$ ÇİFT	$I_n/I_1$
AVUSTRALYA	DAĞ. 33	5.0		4.0	2.0	
	TAŞ. 33-66	3.0		2.0	1.0	
	>110	1.5		1.0	0.5	
KANADA	12	7.0	12.0	3.0	1.0	8.0
	12-44	6.0	10.0	1.5	1.0	6.0
	155	4.0	8.0	1.0	1.0	4.0
FİNLANDIYA	1	5.0		4.0	4.0	
	3-20	4.0	10.0	3.0	3.0	8.0
	30-45	3.0	7.0	2.0	2.0	6.0
	110	1.5	5.0	1.0	1.0	4.0
İNGİLTERE	.415	5.0		4.0	2.0	
	6.6-11	4.0		3.0	1.75	
	33-66	3.0		2.0	1.0	
	132	1.5		1.0	0.5	
AMERİKA (b)	2.4-66	8.0				
	> 115	1.5				
(c)	2.4-69	5.0				
	> 115	1.5				
FRANSA	(a)	1.6		1.0	0.6	
İSVİÇRE	(a)	3.0				
TÜRKİYE	(a)	1.6		1.0	0.6	
Y. ZELANDA	<66	5.0		4.0	2.0	
İSVEÇ	30-72	3.0		2.5	2.5	
ALMANYA	(d)	3.0			5.0	

- (a) Tüm gerilimler ,  
(b) Ayrılmış olan sistem ,  
(c) Genel sistem gerilimi ,  
(d) Harmonik derecesi <15.

Tablo 3.17. Kabul edilebilir gerilim harmonik sınırları

HARMONİK SIRASI		GERİLİM DEĞERLERİ (kV)			
Grup	No	AG(*) Unom < 1	OG(*) 1 ≤ Unom ≤ 34.5	YG(*) 34.5 < Unom ≤ 154	ÇYG(*) Unom > 154
ÜÇÜN KATI OLMA- YAN TEK SAYILI HARMO- NİKLER	5	5	5	2	1
	7	4	4	2	1
	11	3	2.5	1.5	0.8
	13	2.1	2	1.5	0.8
	17	1.2	1	0.75	0.5
	19	0.95	0.8	0.75	0.5
	23	0.64	0.5	0.5	0.3
	25	0.54	0.5	0.5	0.3
	> 25	$\llcorner (0.2 + 12.5/n)$	$\llcorner (0.2 (1 + 25/n))$	$\llcorner (0.1 (1 + 25/n))$	$\llcorner (0.1 + 2.5/n)$
ÜÇÜN KATI HARMO- NİKLER	3	4	1.5	1.5	0.8
	9	0.8	0.8	0.75	0.5
	15	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.3	0.1
	21	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	> 21	< 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.1
ÇİFT SAYILI HARMO- NİKLER	2	1.5	1.25	1.0	1
	4	0.75	0.75	0.7	0.7
	6	0.51	0.35	0.35	0.2
	8	0.39	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	10	0.325	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	12	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	> 12	< 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
TOPLAM BOZ. FAKTÖRÜ ( 3 sn. SÜRELİ)		7	5	3	1.5
(*) BÜYÜKLÜKLER , FAZLAR ARASI GERİLİM DEĞERLERİDİR.					

Tablo 3.18 Ortak bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşeninin yüzdesi olarak maksimum harmonik akım sınırları

HARMONİK SIRASI		00 $1 \leq U_{nom} \leq 34.5$ kV					Y0 $34.5 < U_{nom} \leq 154$ kV				
GRUP	NO	$I_k / I_Y$					$I_k / I_Y$				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K	3	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	5	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	7	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	9	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
H A R M O N İ K L E R	11	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	13	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	15	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	17	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	19	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	21	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	23	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
	25	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
	27	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
	29	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
E R	31	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
	33	0.8	1	1.5	2	2.5	0.8	0.8	0.75	1	1.25
	$h \geq 35$	0.8	0.8	0.7	1	1.4	0.15	0.25	0.35	0.50	0.7
1) ÇİFT HARMONİKLER KENDİNDEN SONRAKİ TEK HARMONİKLERİN % 25 'İ İLE SINIRLIDIR.											
TOPLAM AKIM BOZULMASI		5	8	12	15	20	2.5	4	6	7.5	10
BU DEĞERLER 3 sn. SÜRELİ ORTALAMA DEĞERLERDİR.											
$I_k$ = ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ MAKSİMUM SİSTEM KISA DEVRE AKIMI											
$I_Y$ = ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ MAKSİMUM YÜK AKIMININ TEMEL BİLEŞENİ											



Tablo 3.18 (Devam) Ortak bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşeninin yüzdesi olarak maksimum harmonik akım sınırları

HARMONİK SIRASI		DG $1 \leq U_{nom} \leq 24.5 \text{ kV}$					ÇYG $U_{nom} > 154 \text{ kV}$				
GRUP	NO	$I_k / I_Y$					$I_k / I_Y$				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K	3	4	7	10	12	15	1	1.8	2.5	3	3.8
	5	4	7	10	12	15	1	1.8	2.5	3	3.8
	7	4	7	10	12	15	1	1.8	2.5	3	3.8
	9	4	7	10	12	15	1	1.8	2.5	3	3.8
H A R M O N İ K L E R	11	2	3.5	4.5	5.5	7	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	13	2	3.5	4.5	5.5	7	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	15	2	3.5	4.5	5.5	7	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	17	1.5	2.5	4	5	6	0.4	0.6	1	1.25	1.5
L E R	19	1.5	2.5	4	5	6	0.4	0.6	1	1.25	1.5
	21	1.5	2.5	4	5	6	0.4	0.6	1	1.25	1.5
	23	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	25	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
E R	27	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	29	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	31	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	33	0.6	1	1.5	2	2.5	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	h <sub>235</sub>	0.8	0.5	0.7	1	1.4	0.75	0.12	0.17	0.25	0.35
1) ÇİFT HARMONİKLER KENDİNDEN SONRAKİ TEK HARMONİKLERİN % 25 'İ İLE SINIRLIDIR.											
TOPLAM AKIM BOZULMASI		5	8	12	15	20	1.25	2	3	3.75	5
BU DEĞERLER 3 sn. SÜRELİ ORTALAMA DEĞERLERDİR.											
$I_k$ = ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ MAKSİMUM SİSTEM KISA DEVRE AKIMI											
$I_Y$ = ORTAK BAĞLANTI NOKTASINDAKİ MAKSİMUM YÜK AKIMININ TEMEL BİLEŞENİ											

## BÖLÜM 4

### HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

#### 4.1 Giriş

Daha önce giriş bölümünde belirtildiği gibi güç elektronik düzenekli donanımlar , önemli bir harmonik kaynağıdır. Bu sistemleri , genel anlamda doğrultucular, eviriciler , direkt frekans dönüştürücüler ve ac kıyıcılar olarak sıralayabiliriz. Bu cihazlar , elektronik anahtarlama prensibiyle çalıştıkları için , sisteme harmonik üretmektedirler. Bu bölümde harmonik üreten kaynaklar , daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Ac / dc dönüştürücüleri , birbiriyle bağlanmış olan güç sistemleri , çeşitli harmonikleri oluştururlar. Bu harmoniklerin seviyeleri güç sistemi ve dönüştürücü parametrelerinden etkilenirler. Statik güç dönüştürücüleri tarafından üretilen harmoniklerin incelenmesi için, aşağıdaki parametrelerin dikkate alınması gereklidir :

- Dönüştürücü kontrol sisteminin gecikme açısı ,
- Dönüştürücü kontrol tipi ,
- Dc devre parametreleri ,
- Ac sistem empedansı ,
- Dönüştürücü uçlarındaki ac gerilim dalga şekli gibi.

Harmonik akımların ana kaynakları , faz açısı ile kontrol edilmiş olan doğrultucular ve eviricilerdir. Bunları , üç ana başlık altında toplayabiliriz.

a ) Büyük güç dönüştürücüleri ; bu tip dönüştürücülerin güçleri MW 'lar oranındadır. Dc kenarlarında , ac kenarlarından daha fazla endüktansa sahiptirler. Dönüştürücü ac tarafında bir harmonik akım kaynağı , dc tarafında ise harmonik gerilim kaynağı gibi davranır. Bu güçteki dönüştürücüler , daha çok yüksek doğru gerilim ile enerji nakli ve özel metal endüstrisinde kullanılırlar.

b ) Orta büyüklükteki dönüştürücüler ; bu tip dönüştürücülerin güçleri ise 10 ila 100 kW oranındadır. Bunlar da motor kontrolü için üretim endüstrisinde ve ayrıca demiryolu uygulamalarında kullanılırlar.

c ) Düşük güç dönüştürücüleri ; bu dönüştürücüler ise televizyon düzeneklerinde ve akü yüklerinde kullanılırlar.

#### 4.2 Büyük Güç Dönüştürücüleri

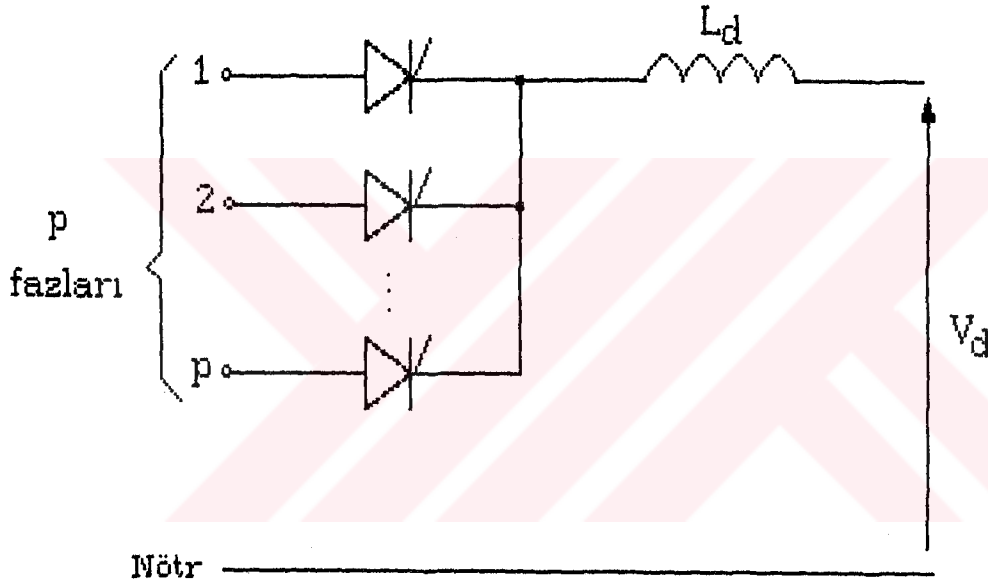
Şekil 4.1 ' de verilen , ideal  $p$  fazlı tek yönlü bir dönüştürücü , sıfır ac sistem empedansına ve sonsuz düzeltme endüktansına sahiptir. Faz akımları , besleme frekansında tekrar eden ,  $\omega = 2\pi/p$  genişliğinde periyodik pozitif dikdörtgen şeklindeki darbelerden meydana gelirler.

Şekil 4.2 ' deki dalga şekli analiz edilirse , orijin darbenin merkezinde alınır.  $F(\omega t)$  ' nin bir çift fonksiyondan meydana geldiği ve bu durumda , Fourier serilerinin sadece kosünüslü terimleri içerdiği görülebilir. 1 pu dc akıma göre , Fourier katsayıları denklem (4.1) ve (4.2) ile verilirler.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-v/z}^{v/z} d(\omega t) = \frac{w}{2\pi} = \frac{1}{p} \quad (4.1)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-v/z}^{v/z} \cos(n\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{z}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{z}$$

$$= \frac{z}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{p} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. p fazlı tek yönlü bir dönüştürücü

Şekilde  $L_d$  süzgeç bobinini,  $V_d$  ise dc gerilimi belirtir.

Pozitif ve negatif akım darbelerinden meydana gelen faz akımının Fourier serileri, aşağıdaki denklem ile ifade edilirler.

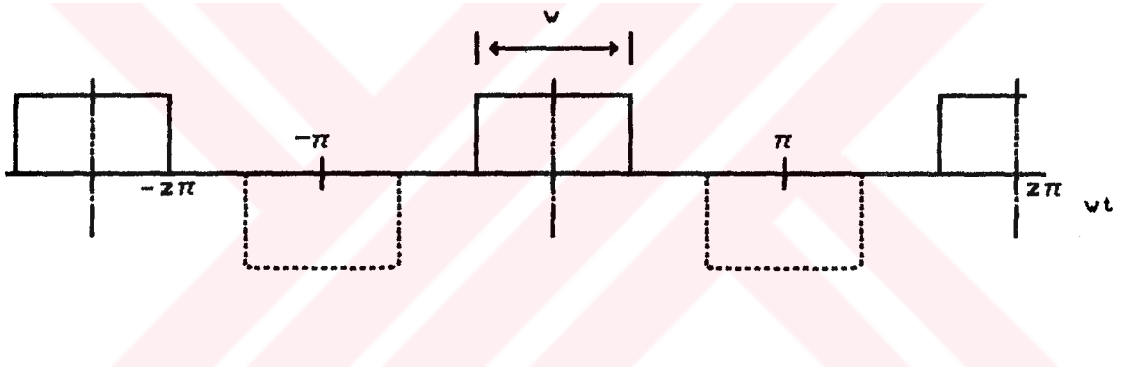
$$F = F_p + F_n = \frac{4}{\pi} \left[ \sin \frac{v}{z} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3v}{z} \cos 3\omega t + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{5} \sin \frac{5v}{z} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \sin \frac{7v}{z} \cos 7\omega t \dots \right] \quad (4.3)$$

Bu durumda , dc bileşen ve çift derecelendirilmiş harmonikler yok edilmiştir. (4.3) denkleminde ,  $\omega = \pi$  ifadesi yerine koyulduğunda , frekans domeninde dalga şekli için denklem , aşağıdaki hale dönüşür.

$$F(t) = \frac{4}{\pi} \left\{ \cos(\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \frac{1}{9} \cos(9\omega t) \dots \right\} \quad (4.4)$$

Bu denklemdaki ,  $n = 1,5,9,\dots$  gibi harmoniklerin derecesi pozitif sequence ,  $n = 3,7,11 \dots$  gibi dereceleri ise negatif sequence aittirler.



Şekil 4.2. Pozitif ve negatif darbelerin sırası

Pozitif ve negatif akım darbeleri üreten ,  $p$  fazlı iki yönlü ideal bir dönüştürücü ise , Şekil 4.3 ' de gösterilir.

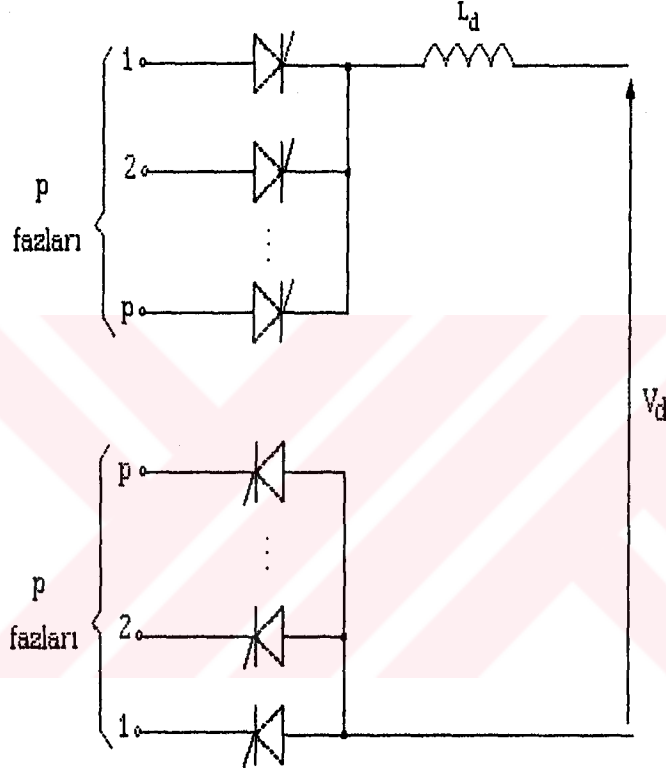
Teorik olarak , harmonik akımlar  $q$  darbe sayısına ve harmonik derecesine bağlıdır. Bir dönüştürücü sistemi için , temel bileşen harmonik katsayıları ,

$$n = qk \pm 1 \quad (4.5)$$

ifadesi ile verilir.

Burada  $n$  , harmonik derecesini ,  $q$  dönüştürücü sisteminin

darbe sayısını ,  $k$  ise herhangi bir tamsayıyı gösterir. İdeal olarak , bir dönüştürücü tarafından üretilen harmonik akımların pu genliği , harmonik derecesi ile ters orantılı olarak azalır. Aynı faz içinde bulunan 3. , 5. ve 7. darbe harmonik bileşenlerinin eklenmesiyle elde edilen dalga şekli harmoniklerinin dereceleri de , genlikleriyle ters orantılı olarak değişirler.



Şekil 4.3. p fazlı çift yönlü dönüştürücü

Şekil 4.4 'de ise bir kare dalga şeklinin temel bileşeni, Şekil 4.5 'de bu kare dalga şeklinin temel bileşenine 3. harmonik bileşenin eklenmesiyle elde edilen dalga şekli verilir. Son olarak da Şekil 4.6 'da 3. , 5. , 7. , 9. ve 11. harmonik bileşenlerin toplamı sonucu ortaya çıkan dalga şekli gösterilmektedir.

#### 4.2.1 Altı darbeleri bağlantıya ilişkin harmonikler

6 darbeleri doğrultma veya tersi üç fazlı iki yönlü

şekillerden elde edilir. Denklem (4.3)' de  $w = 2\pi/3$  ifadesi yerine koyularak ve  $I_d$  dc akımı ilave edilerek, a fazındaki ac akımın frekans domenindeki karşılığı, aşağıdaki denklem ile verilir.

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left\{ \cos vt - \frac{1}{9} \cos 5vt + \frac{1}{7} \cos 7vt - \frac{1}{11} \cos 11vt + \frac{1}{13} \cos 13vt - \frac{1}{17} \cos 17vt \dots \right\} \quad (4.6)$$

Bu denklemlerden , bir takım sonuçlar ortaya çıkarmak mümkündür. Bu sonuçları , aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- (i) Üçün katı şeklinde olan harmonikler yoktur.  
(ii) k 'nın tam değerleri için ,  $6k \mp 1$  dereceli harmonikler vardır.  
\*  $6k + 1$  dereceli harmonikler pozitif sequence ,  
\*  $6k - 1$  dereceli harmonikler ise negatif sequence aittir.

(iii) Temel bileşen frekansının rms genliği ,

$$I_1 = (1/\sqrt{2}) \cdot (2\sqrt{3}/\pi) \cdot I_d = (\sqrt{6}/\pi) \cdot I_d \quad (4.7)$$

şeklinde verilir.

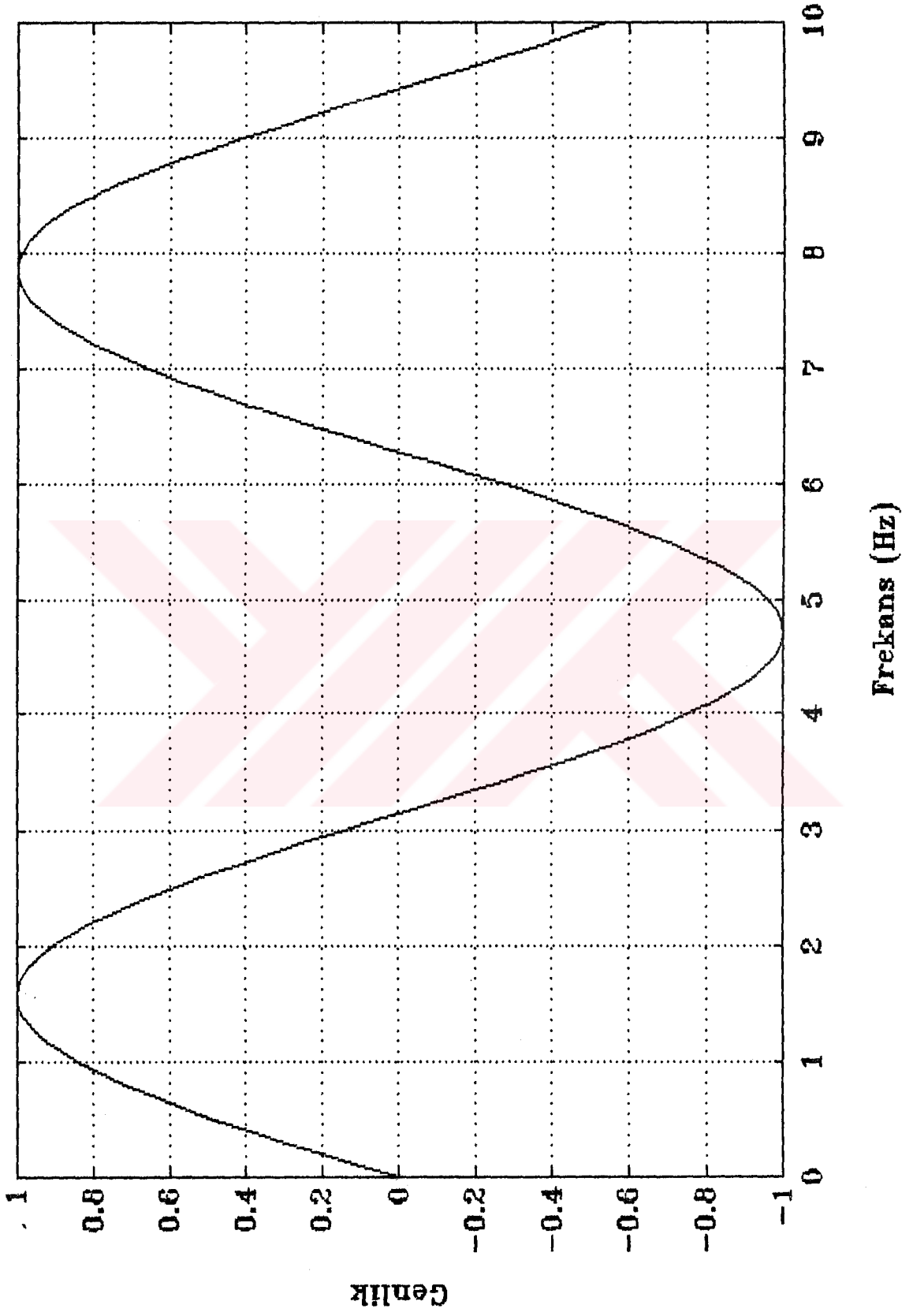
(iv) n. harmoniğin rms genliği de ,

$$I_n = I_1 / n , \quad (4.8)$$

olarak tanımlanır.

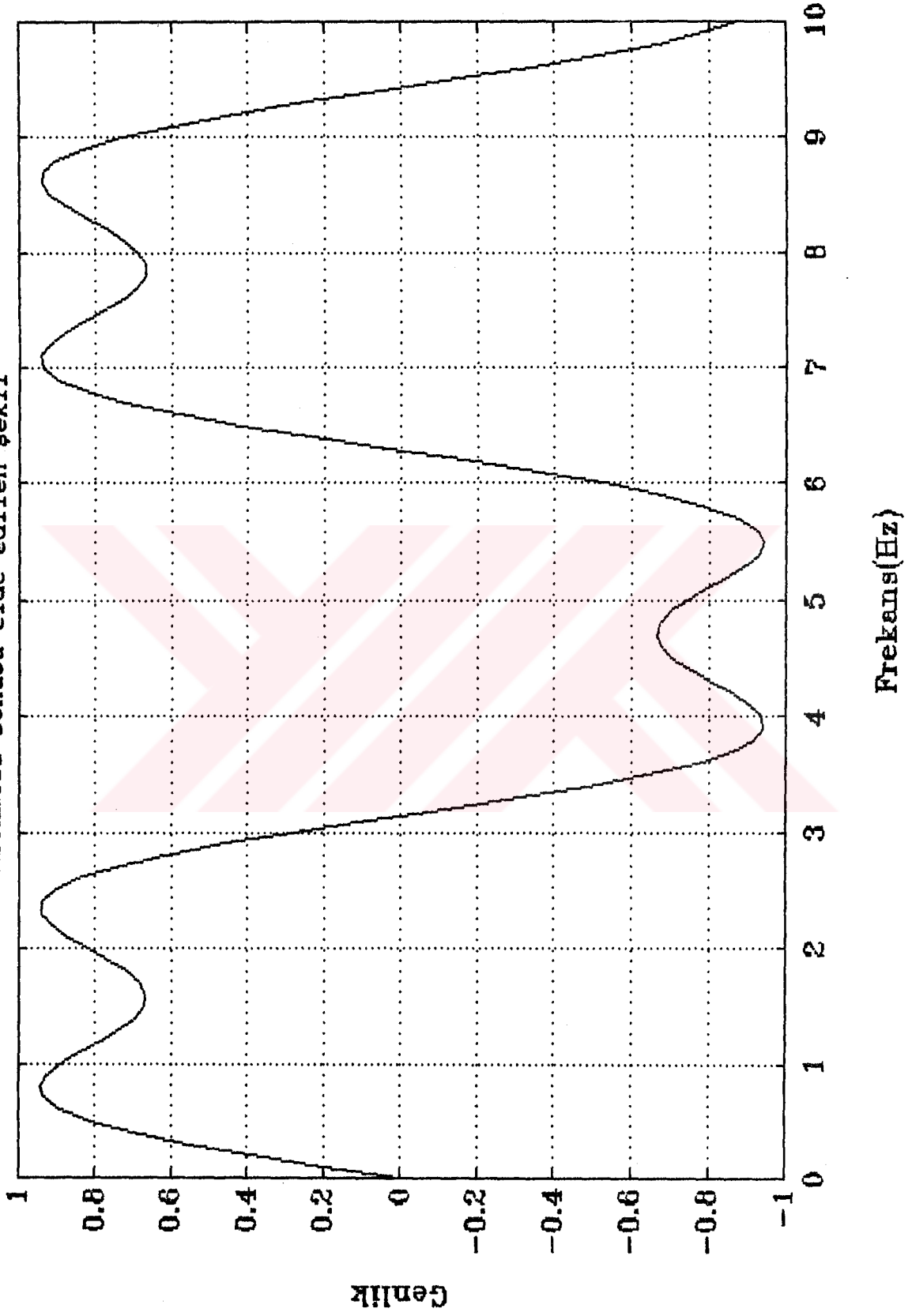
Şekil 4.7 'de altı - darbe köprü dalga şekilleri , (b), (c) ve (d) 'de üç faz akımları sırasıyla gösterilmektedir.

Şekil 4.4. Bir kare dalgenin temel bileşeni

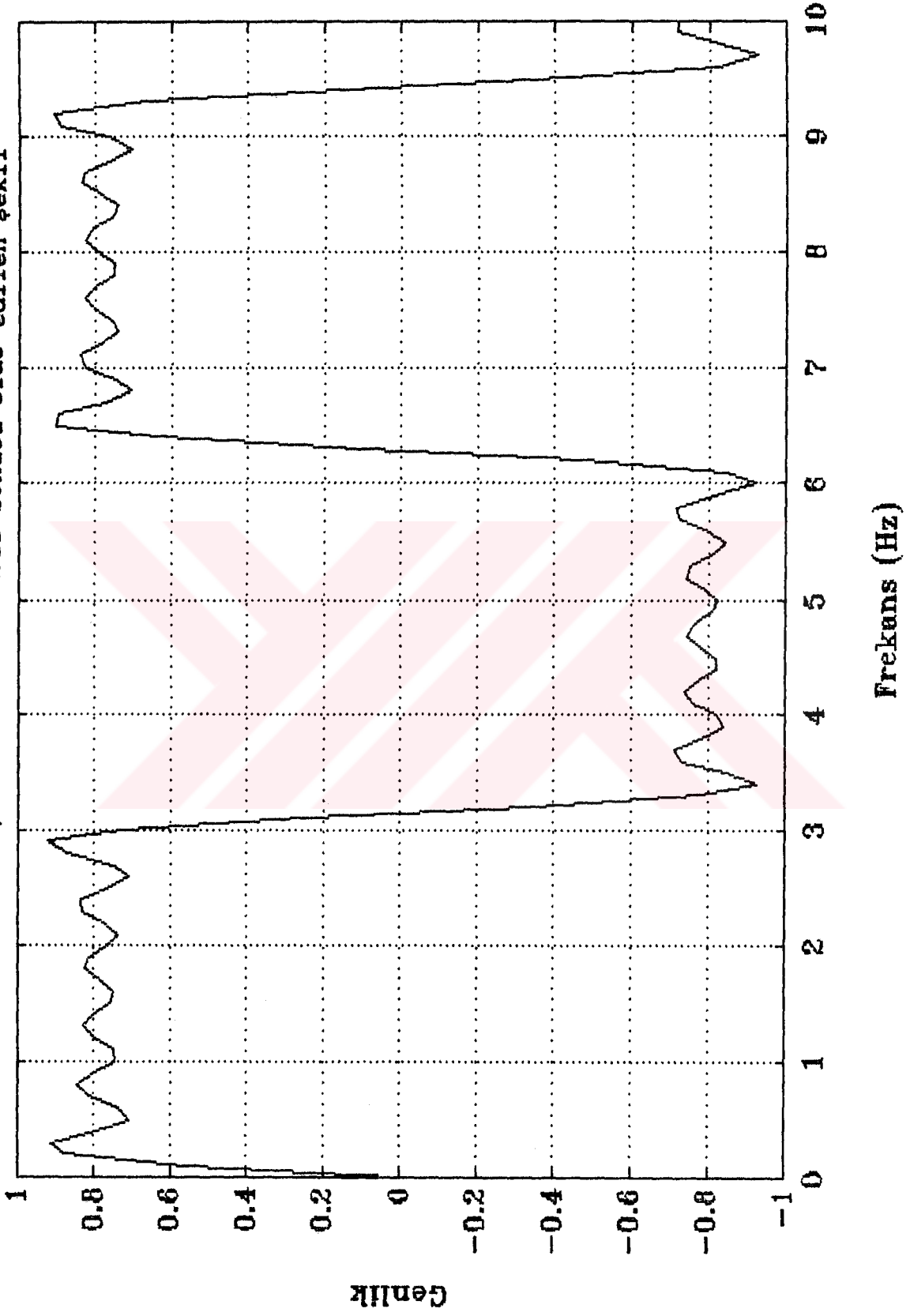


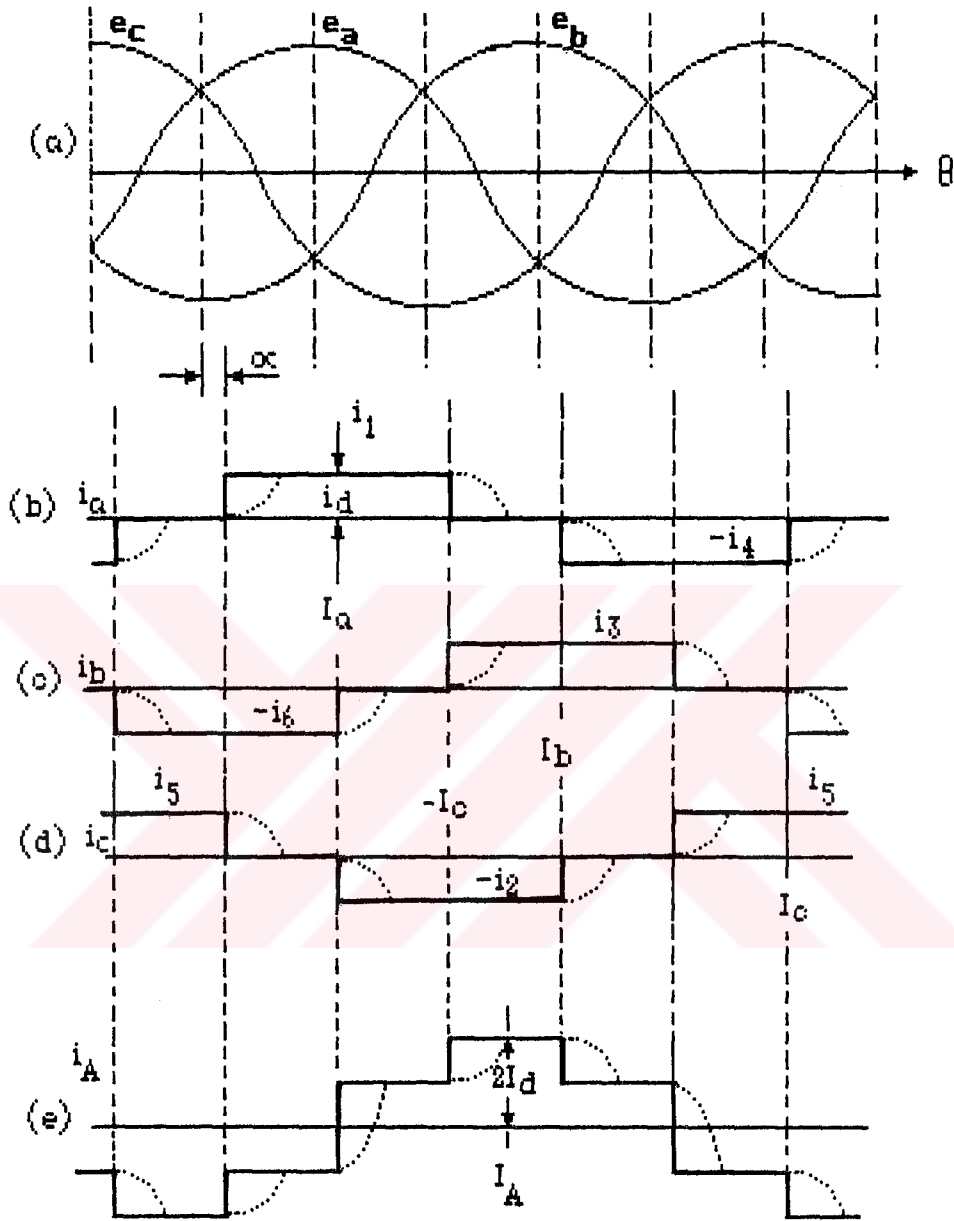


Şekil 4.5. Bir kare dalgaya üçüncü harmonik bileşeninin eklenmesi sonucu elde edilen şekil



Sekil 4.6. Bir kare dalgaya 3. , 5. , 7. , 9. ve 11. harmonik bileşenlerinin eklenmesi sonucu elde edilen şekil





Şekil 4.7. Altı - darbe köprü dalga şekilleri :

(a) Faz-nötr gerilimleri ;

(b)-(c)-(d) Dönüştürücü tarafındaki faz akımları ;

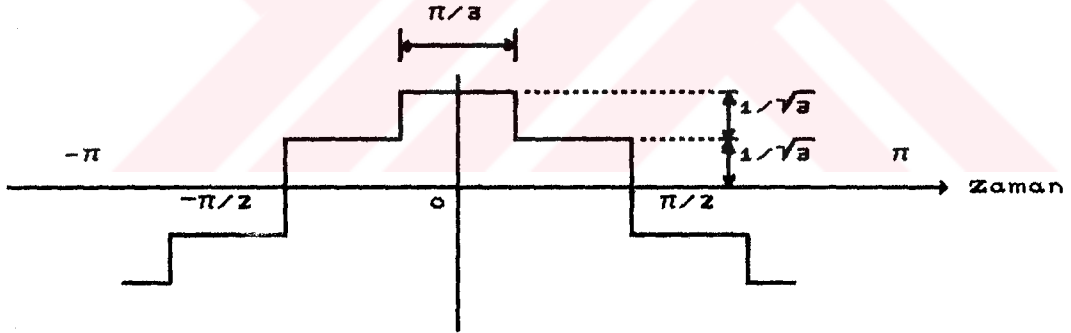
(e) Üçgen - yıldız bağlı bir transformatörlü sistemdeki faz akımları

Dönüştürücü transformatörünün , primer veya sekonder üç faz sargılarından biri üçgen bağlı ise , Şekil 4.7 (e) ' de görüldüğü gibi ac taraftaki akım dalga şekilleri ,  $120^\circ$  farklı dikdörtgen şeklindeki iki sekonder akım arasındaki ani farklılıklardan oluşurlar.

Yıldız-yıldız bağlantıda , aynı primer ve sekonder gerilimlerinde ,  $\sqrt{3}$  faktörü kullanılır ve bu durumdaki akım dalga şekli , Şekil 4.8 ' de gösterildiği gibi olur.

Primer tarafta a fazındaki akım için Fourier serileri , aşağıdaki denklem ile ifade edilirler.

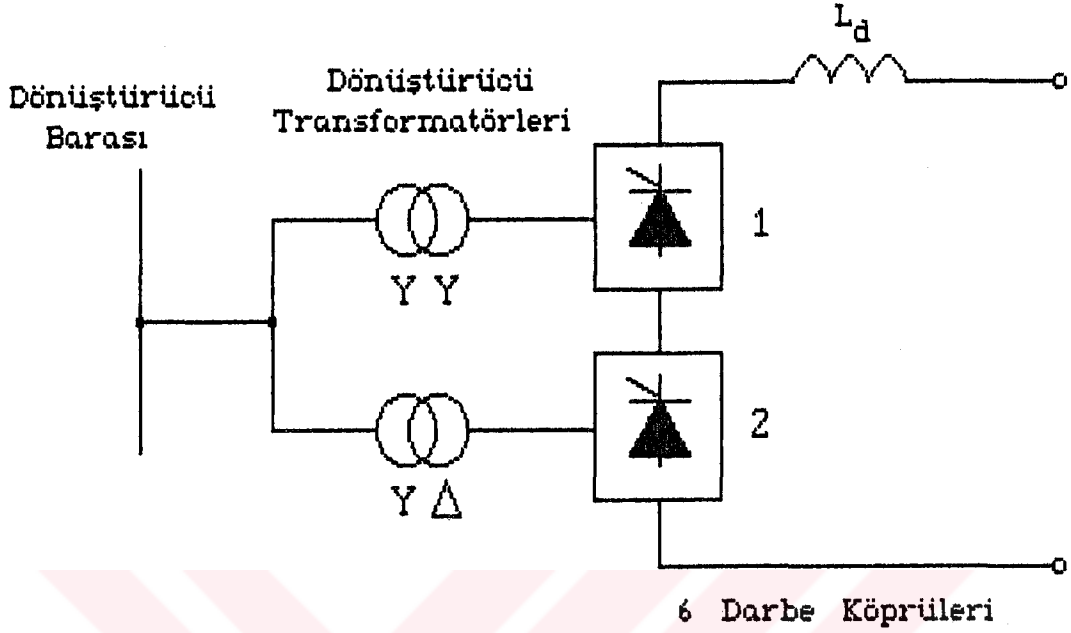
$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left\{ \cos vt + \frac{1}{5} \cos 5vt - \frac{1}{7} \cos 7vt - \frac{1}{11} \cos 11vt + \frac{1}{13} \cos 13vt + \frac{1}{17} \cos 17vt \dots \right\} \quad (4.9)$$



Şekil 4.8. Üçgen - yıldız bağlı bir altı darbe dalga şeklinin zaman domenindeki gösterilişi

#### 4.2.2 Oniki darbeleri bağlantıya ilişkin harmonikler

İki altı darbeleri gruptan meydana gelen 12 darbe şekli, temel bileşen gerilimleri eşit ve  $30^\circ$  faz farklı olan paralel bağlı iki üç fazlı transformatörden beslenir. Şekil 4.9 ' da 12 darbeleri dönüştürücü şekli , Şekil 4.10 'de bu dönüştürüye ait bağlantı şekilleri verilir.



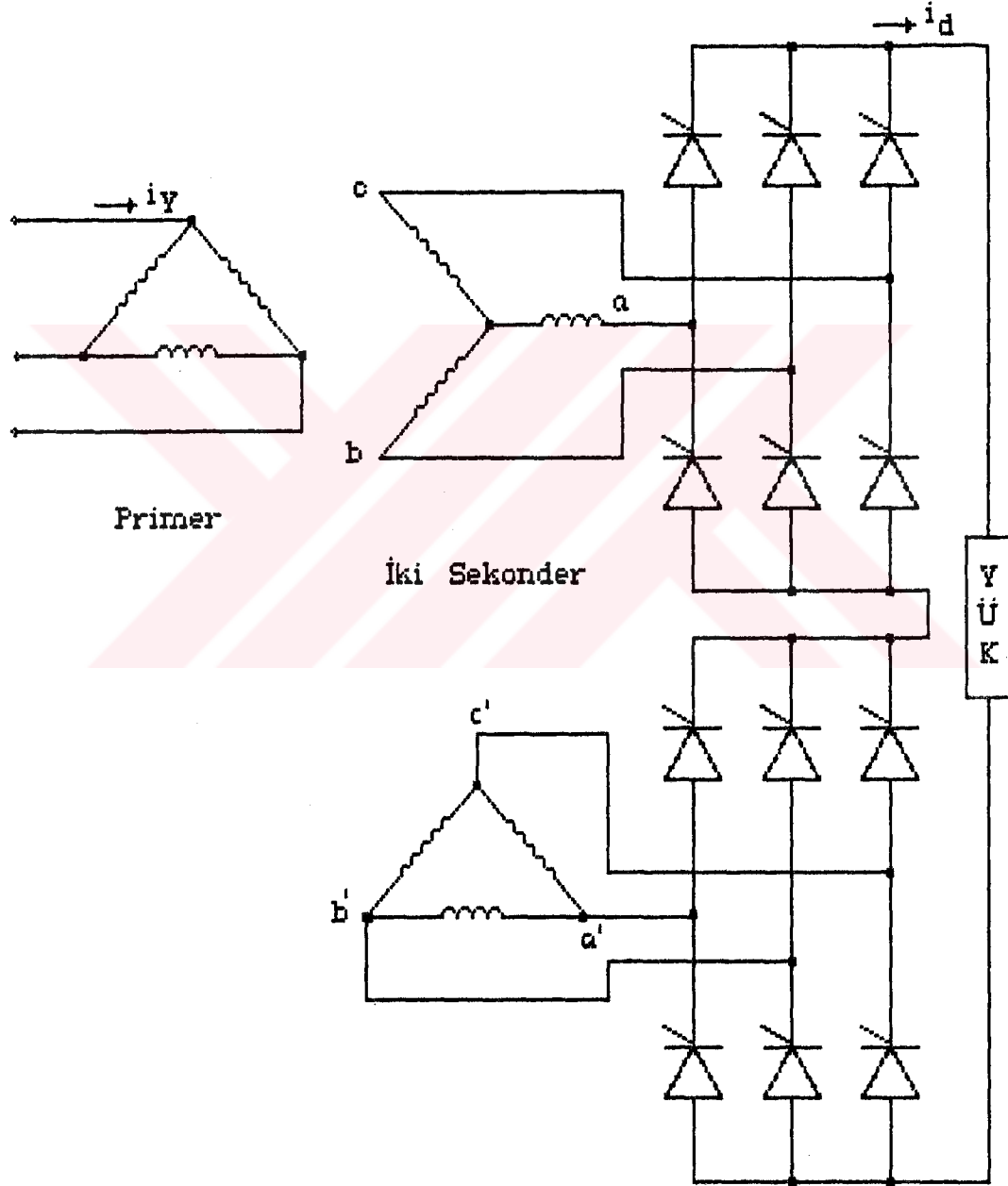
Şekil 4.9. 12 darbeleri dönüştürücü şekli

Bileşke ac akım , yıldız-yıldız (Denklem (4.6)) ve üçgen-yıldız bağlı (Denklem (4.9)) transformatörlerin ayrı ayrı Fourier serilerinin toplamı şeklinde verilir.

$$\begin{aligned}
 (i_a)_{12} = z \left[ \frac{z \sqrt{3}}{\pi} \right] \cdot \left[ \cos vt - \frac{1}{11} \cos 11vt + \frac{1}{13} \cos 13vt \right. \\
 \left. - \frac{1}{23} \cos 23vt + \frac{1}{25} \cos 25vt \dots \dots \dots \right] \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

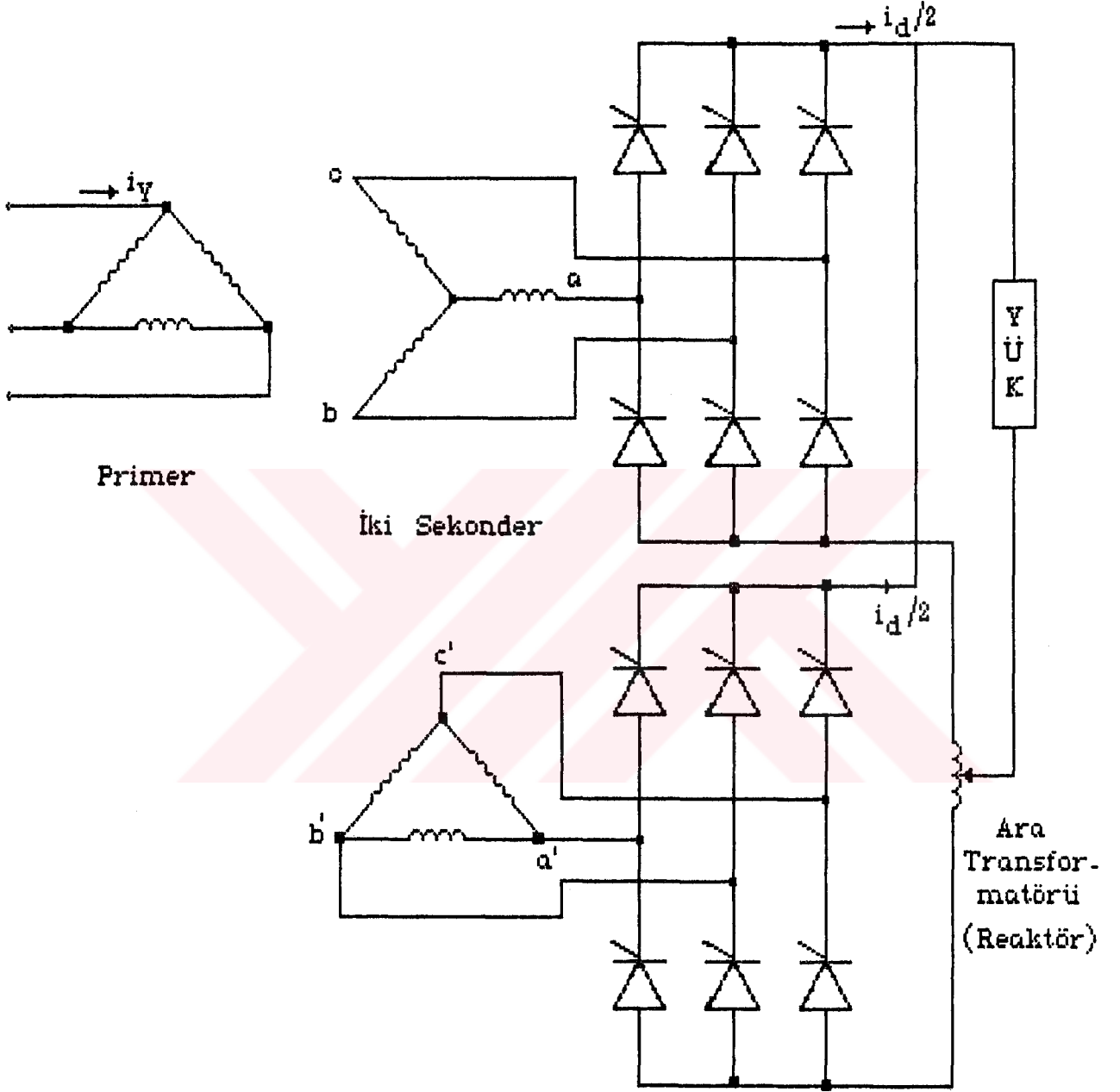
Bu seri sadece  $12k + 1$  dereceli harmonikleri içerir.  $k = 5, 7, 17, 19$  gibi  $6k + 1$  ( $k$  tek sayı) dereceli harmonik akımları, iki dönüştürücü transformatörü arasında dolaşırlar, fakat ac şebekeye girmezler. 12 darbeleri dalga şeklinin zaman domenindeki gösterilişi, Şekil 4.11 (a) 'da, Şekil 4.11 (b) 'de ise frekans domenindeki gösterilişi verilir.

12 darbe işletimini sağlamak için ,  $30^\circ$  ' lik faz farklı iki transformatör kullanılmıştır. 24 darbe işletimi için ise ,  $15^\circ$  ' lik faz farklı dört adet transformatör, yine benzer şekilde 48 darbe işletimi için ise  $7.5^\circ$  ' lik faz farklı sekiz adet transformatör gerektirir.

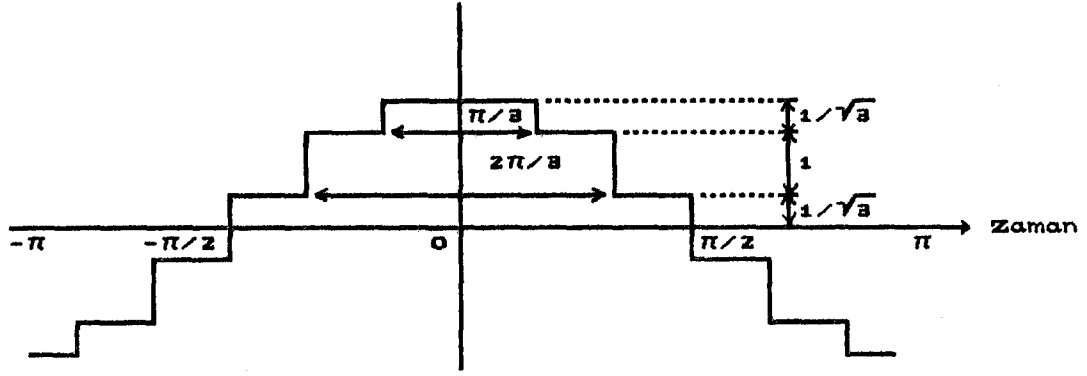


Şekil 4.10. Oniki darbeleri dönüştürücüye ait bağlantı şekilleri

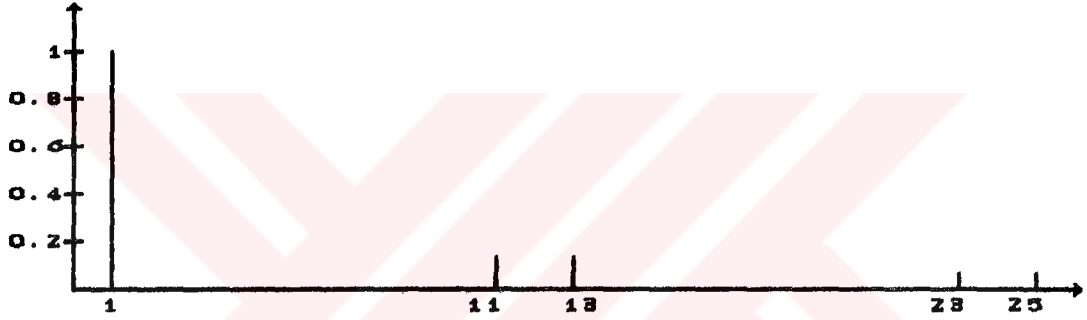
(a) Köprü seri bağlı



Şekil 4.10. ( Devam ) Oniki darbeleri dönüştürücüye ait bağlantı şekilleri  
(b) Köprü paralel bağlı



Şekil 4.11.(a) Oniki darbe faz akımının zaman domenindeki gösterilişi



Şekil 4.11.(b) Oniki darbe işletiminin frekans domenindeki gösterilişi

Bu şekildeki  $x$  eksenini , frekans ( \* temel bileşen frekansı ) ,  $y$  eksenini ise  $| \text{Genlik} | * \pi / 2\sqrt{3}$  olarak gösterilir.

#### 4.2.2.1 Yüksek darbe şekillerinde sistem empedansının ve transformatörünün etkisi

Yüksek darbe şekilleri üç darbe gruplarının karışımından meydana gelmektedir. Şekil 4.7 'de kesik çizgilerle belirtilenler , komütasyon çakışmalarıdır ve üç darbe grubuna aittir. Komütasyon akımı , denklem ( 4.11) ile verilmektedir.



$$i_C = \frac{E}{\sqrt{2} X_c} ( \cos \alpha - \cos \omega t ) \quad (4.11)$$

Burada  $X_c$ , komütasyon devresinin ( faz başına ) reaktansdır ve genellikle transformatörün kaçak reaktansı ile belirlenir. Komütasyon sonunda  $i_C = I_d$  ve  $\omega t = \mu$  olur ve denklem (4.11), aşağıdaki hale dönüşür.

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{2} X_c} [ \cos \alpha - \cos ( \alpha + \mu ) ] \quad (4.12)$$

Denklem (4.11) ile (4.12) ifadeleri birbirine oranlandığında, bu ifade  $\alpha < \omega t < \alpha + \mu$  aralığında aşağıdaki hale dönüşür.

$$i_C = I_d \left[ \frac{\cos \alpha - \cos \omega t}{\cos \alpha - \cos ( \alpha + \mu )} \right] \quad (4.13)$$

Pozitif akım darbelerinin kalan kısmı ise ,

$\alpha + \mu < \omega t < \alpha + \frac{2\pi}{3}$  aralığında ,

$$I = I_d \quad (4.14)$$

$\alpha + \frac{2\pi}{3} < \omega t < \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu$  aralığında ise ,

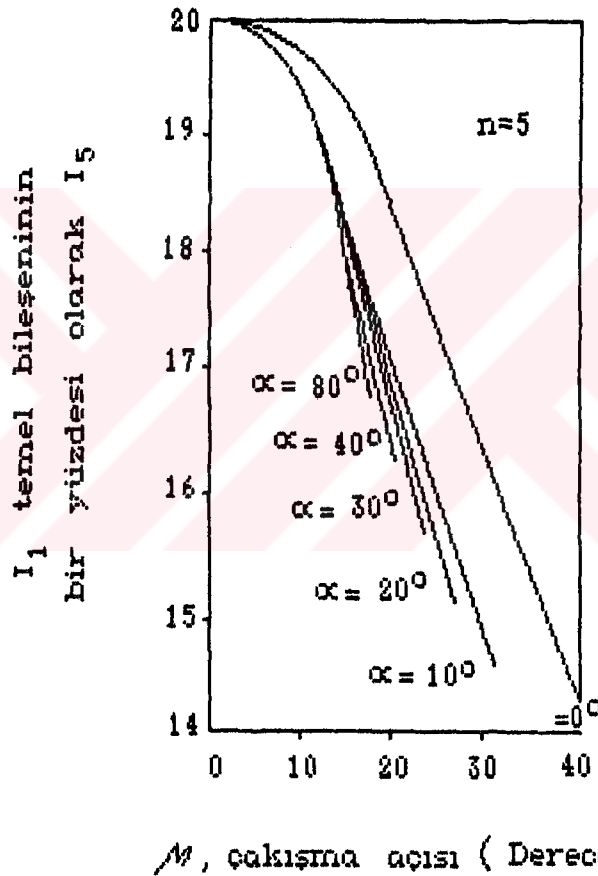
$$I = I_d - I_d \left[ \frac{\cos ( \alpha + 2\pi/3 ) - \cos \omega t}{\cos ( \alpha + 2\pi/3 ) - \cos ( \alpha + 2\pi/3 + \mu )} \right] \quad (4.15)$$

şeklinde verilmektedir.

Sistem empedansı mevcut ise , akım dalga şeklindeki harmonik içerik azalmaktadır , bu etki kontrol edilmiş doğrultucularda daha belirgin olmaktadır. Daha büyük ateşleme açısına sahip olan akım darbeleri , pratik

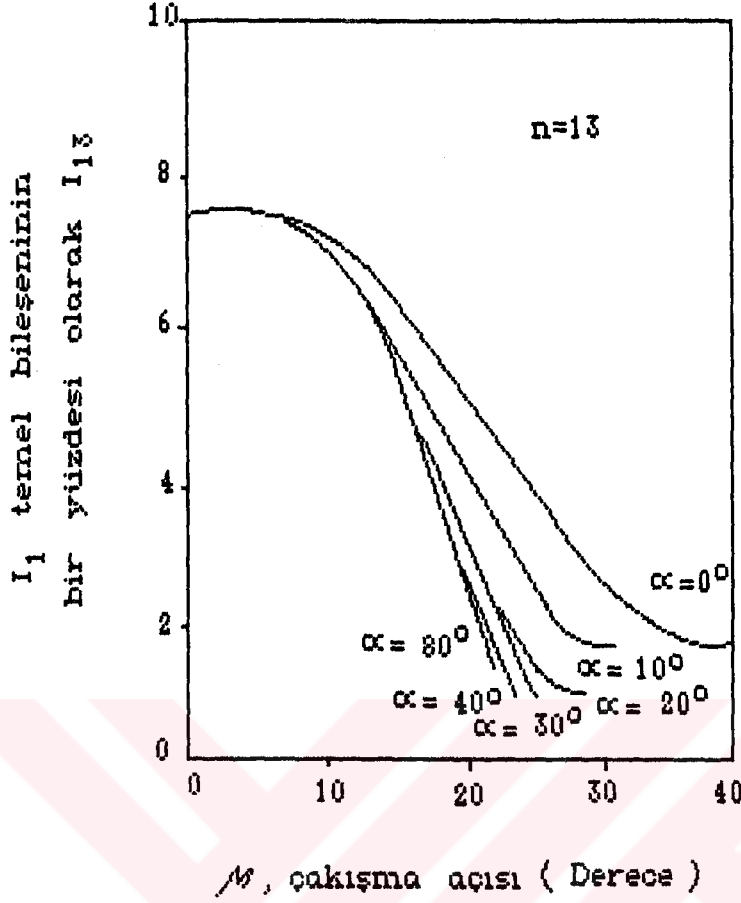
olarak ac sistem reaktansından etkilenmezler.

Şekil 4.12 ' de 5. harmonik akım , Şekil 4.13 ' de 13. harmonik akım gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak gösterilir.



Şekil 4.12. Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 5. harmonik akım değişimleri

<sup>P</sup>ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P. S. , 1985. Power System Harmonics . John Wiley and Sons.



Şekil 4.13. Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak 13. harmonik akım değişimleri

#### 4.2.2.2 Doğru gerilim harmonikleri

Üç faz köprü şekli için , harmonik gerilimlerin derecesi  $n = 6k$  şeklinde verilir. Gerilim geçişleri de üç farklı fonksiyon halinde gösterilmekte ve gerilim dalga şekli aralığı  $\pi/3$  olmaktadır. Şekil 4.14 ' de 6 darbe dönüştürücüye ait dc gerilim dalga şekilleri verilir.

$0 < \omega t < \alpha$  aralığı için ,

$$V_d = \sqrt{2} V_c \cos \left[ \omega t + \frac{\pi}{6} \right] \quad (4.16)$$

$\alpha < \omega t < \alpha + \mu$  aralığı için ,

$$\begin{aligned}
V_d &= \sqrt{2} V_c \cos \left[ \omega t + \frac{\pi}{6} \right] + \frac{1}{2} \sqrt{2} V_c \sin \omega t \\
&= \frac{\sqrt{6}}{2} V_c \cos \omega t
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$\alpha + \mu < \omega t < \frac{\pi}{3}$  aralığı için ise ,

$$V_d = \sqrt{2} V_c \cos \left[ \omega t - \frac{\pi}{6} \right] \tag{4.18}$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $V_c$  , rms faz faz C komütasyon ) gerilimidir.

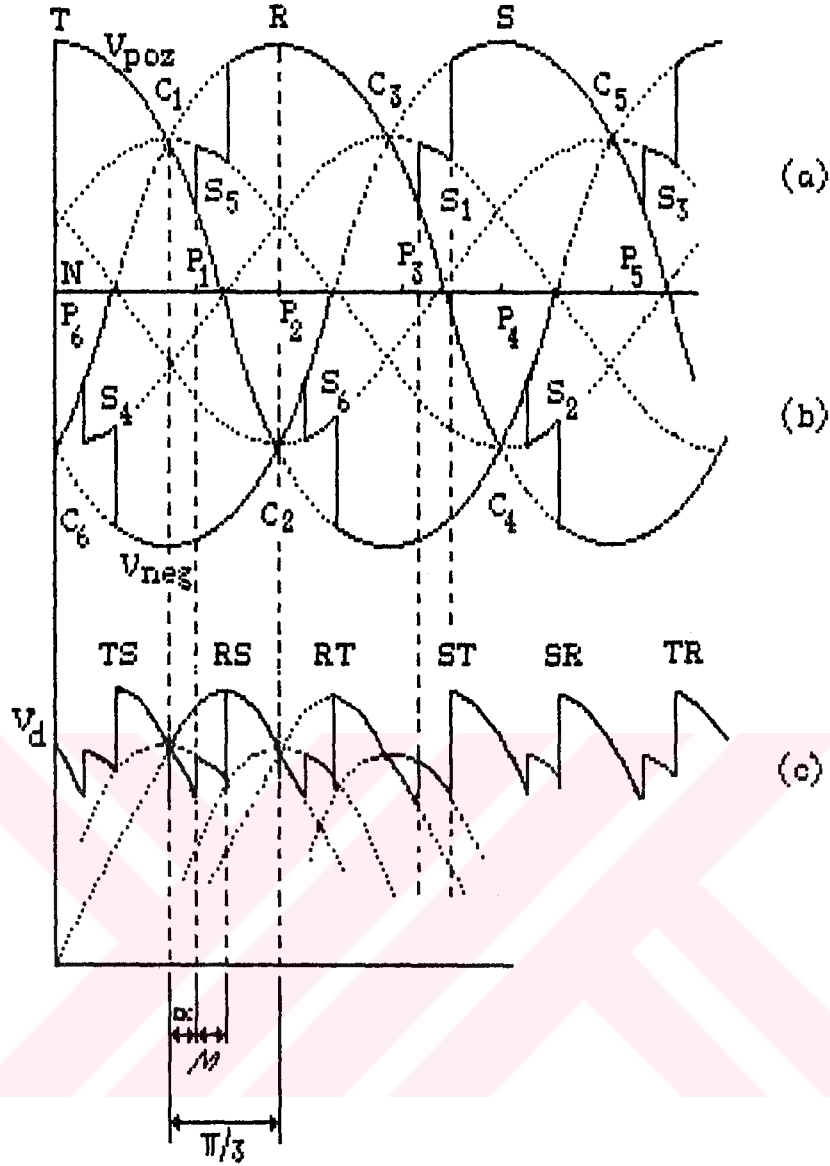
Dc gerilim dalga şekli harmonik gerilimlerin rms genliği, Denklem (4.16) , (4.17) ve (4.18) ' den yararlanılarak , aşağıdaki şekle dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
V_n &= \frac{V_{co}}{\sqrt{2} (n^2 - 1)} \left\{ (n-1)^2 \cdot \cos^2 \left[ (n+1) \frac{\mu}{2} \right] + \right. \\
&+ (n+1)^2 \cdot \cos^2 \left[ (n-1) \frac{\mu}{2} \right] - 2(n-1) \cdot (n+1) \cdot \cos \left[ (n+1) \frac{\mu}{2} \right] \\
&\left. \cdot \cos \left[ (n-1) \frac{\mu}{2} \right] \cos (2\alpha + \mu) \right\}^{1/2}
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Şekil 4.15 ve 4.16 , 6. ve 12. harmoniklerin değişimini,  $V_{co}$  'nın bir yüzdesi olarak gösterirler. 6 darbe köprü dönüştürücü için , maksimum ortalama doğrultulmuş gerilim  $3 (\sqrt{2}) V_c / \pi$  ifadesine eşittir.

İlk olarak , denklem (4.19) ' da  $\alpha = 0$  ve  $\mu = 0$  değerlerini yerine koyduğumuzda , aşağıdaki denklem elde edilir.

$$V_{no} = \sqrt{2} V_{co} / (n^2 - 1) \tag{4.20}$$



Şekil 4.14. Altı- Darbe dönüştürücü dc gerilim dalga şekilleri : (a) Pozitif uçta ; (b) Negatif uçta ; (c) Çıkış uçları arasında

$V_{no}$  ve  $V_{co}$  ifadelerini oranlandığında , denklem (4.21) bulunur.

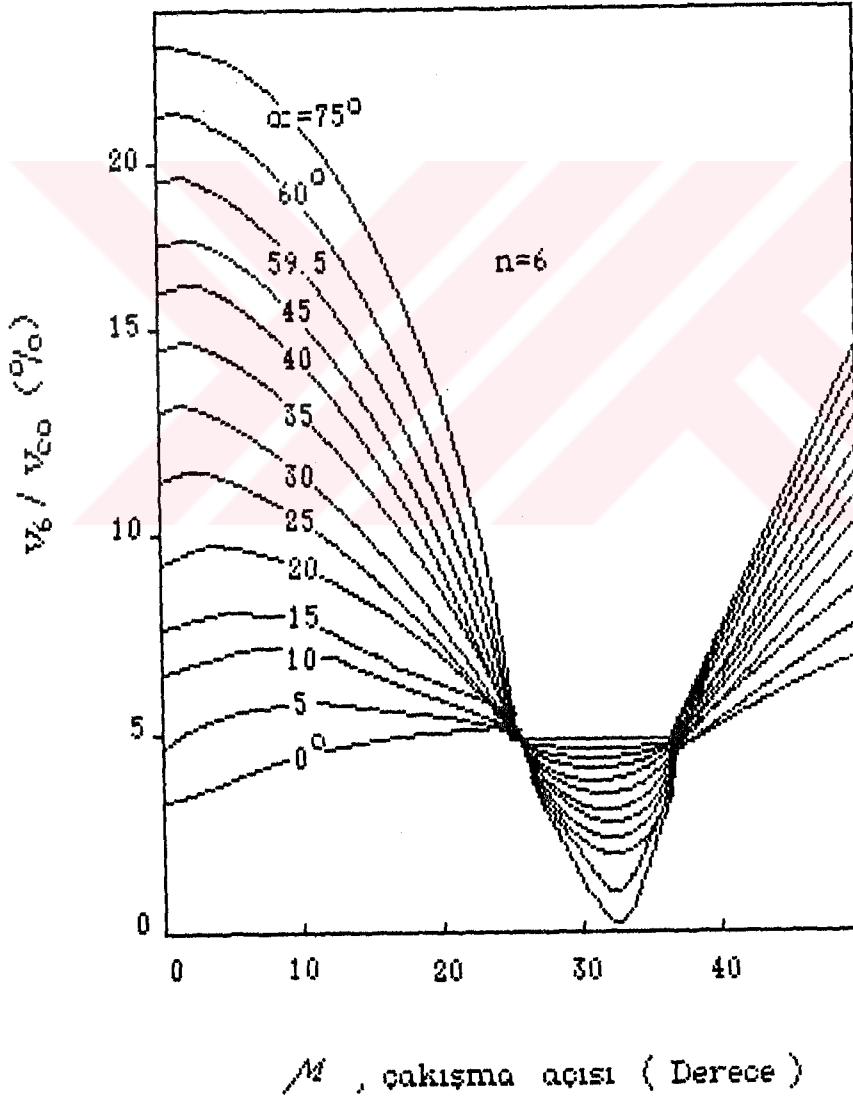
$$\frac{V_{no}}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \cong \frac{\sqrt{2}}{n^2} \quad (4.21)$$

Sırasıyla, 6. , 12. ve 18. harmonikler için % 4.04, 0.99 ve 0.44 ifadeleri yerine konularak indirgeme

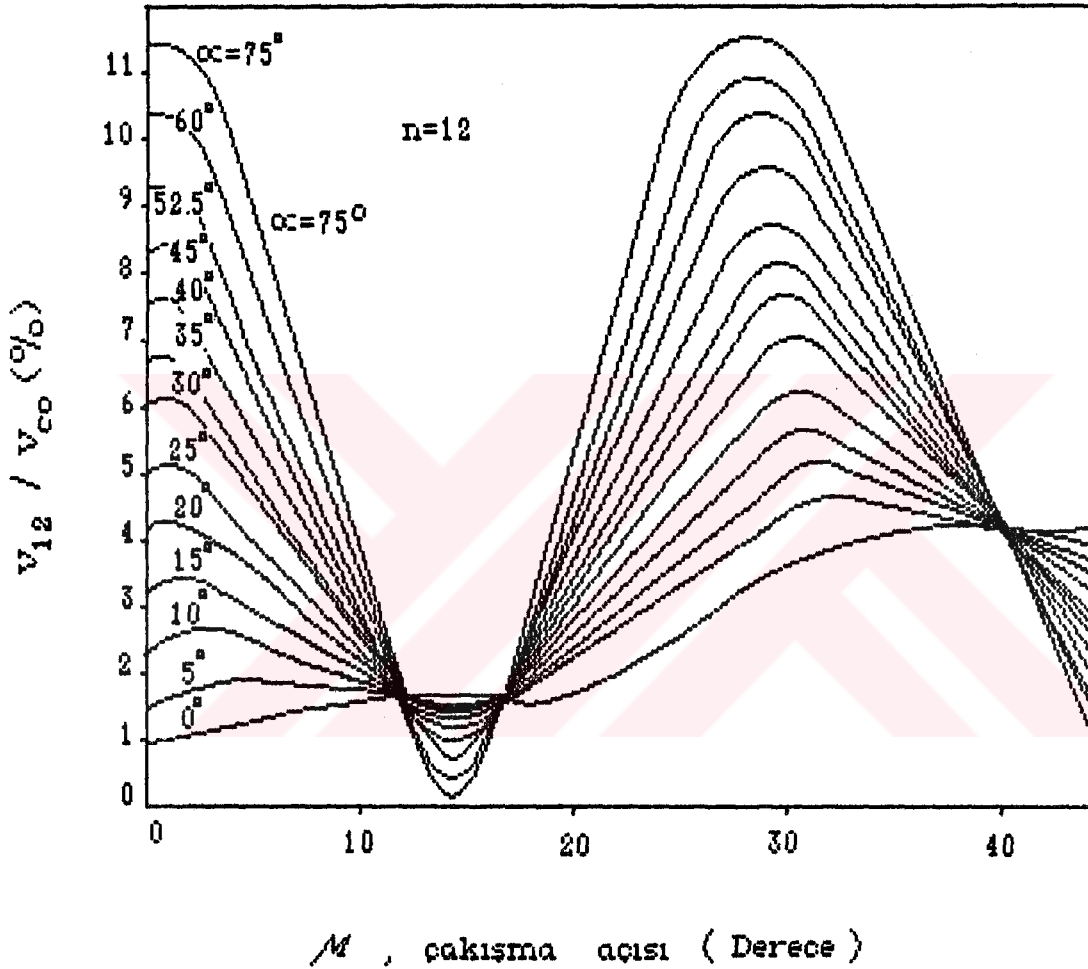
yapılabilir. Genellikle , harmonikler  $\alpha$  artışlarına bağlı olarak artarlar.  $\alpha = \pi/2$  ve  $\mu = 0$  için ,

$$\frac{V_n}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2} n}{(n^2 - 1)} \cong \frac{\sqrt{2}}{n} \quad (4.22)$$

denklemler (4.22) bulunur. Bu ifade , sistemdeki harmoniklerin maksimum oranını belirttiği için , oldukça önemlidir.



Şekil 4.15. Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak, 6. harmonik gerilim değişimi



<sup>D</sup>  
Şekil 4.16. Gecikme ve çakışma açısına bağlı olarak ,  
12. harmonik gerilim değışimi

<sup>D</sup>ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P. S. ,  
1985. Power System Harmonics . John Wiley and Sons.

### 4.3 Orta büyüklükteki dönüştürücüler

#### 4.3.1 Dönüştürücüden beslenen dc sürücüler

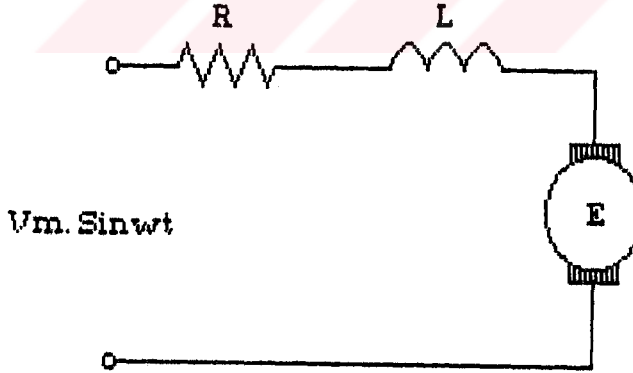
Bilindiği gibi , bir dc yükü en basit şekilde bir direnç , endüktans ve geri emk 'dan oluşan bir eşdeğer devre şeklinde gösterebiliriz. ( Bk . Şekil 4.17 ) Bu devreye sinüs şeklinde bir gerilim uyguladığımızda , bu gerilim aşağıdaki denklem ile verilir.

$$V_m \sin wt = Ri + L \left( \frac{di}{dt} \right) + E \quad (4.23)$$

Bu denklemde yararlanılarak yük akımı ,

$$i = K \cdot e^{-Rt/L} + \frac{V_m}{\sqrt{(R^2 + (\omega L)^2)} \sin (wt - \phi) - \frac{E}{R}} \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\phi = \tan^{-1}(\omega L / R)$  'ye eşittir. K sabiti ise , denklem çözülerek başlangıç koşullarından hesaplanır.

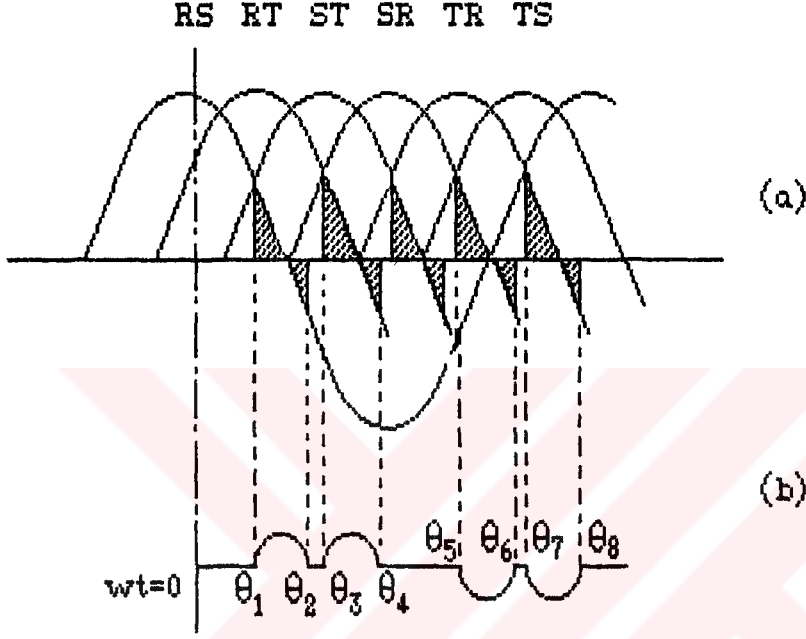


Şekil 4.17. Dc motor eşdeğer devresi

Nominal yük koşullarında ateşleme açısı düşük tutulur, fakat hafif yük koşulları veya motor başlangıç esnasında gecikme artar ve akım süresiz olabilir. Bu aşırı çalışma koşulu 8 darbe doğrultucu için , Şekil 4.18 'de verilir. İki pozitif ve iki negatif akım darbesinden meydana gelen her faz , ortak referans ile bağlantılı



uygun gerilim fazı kullanılmasıyla denklem (4.24) ' den hesaplanır. Şekil 4.18 'e göre  $V_{RS}$  maksimum olduğu zaman sabite göre R fazındaki akım, aşağıdaki bileşenlere sahiptir.



Şekil 4.18. Süreksiz dalga şekilleri  
 (a) Dc gerilim  
 (b) R fazındaki ac akım

(1)  $\theta_1 < wt < \theta_2$  aralığı üzerinde ,

$$i = \frac{V_m}{R} \left\{ \cos\phi \cdot \cos(wt - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[ \frac{E}{V_m} - \cos\phi \cdot \cos(\theta_1 - \phi) \right] \cdot e^{(-R/wL)(wt - \theta_1)} \right\} \quad (4.25)$$

(11)  $\theta_3 < wt < \theta_4$  olduğu zaman ,  $\theta_3 = (\theta_1 + \pi/s)$  olur.

$$i = \frac{V_m}{R} \left\{ \cos\phi \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3} - \phi\right) - \frac{E}{V_m} + \left[ \frac{E}{V_m} - \cos\phi \cdot \cos(\theta_1 - \phi) \right] \cdot e^{(-R/\omega L)(\omega t - \pi/3 - \theta_1)} \right\} \quad (4.26)$$

(iii)  $\theta_5 < \omega t < \theta_6$  olduğu zaman ,  $\theta_5 = (\theta_1 + \pi)$  olur.

$$i = -\frac{V_m}{R} \left\{ \cos\phi \cdot \cos(\omega t - \pi - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[ \frac{E}{V_m} - \cos\phi \cdot \cos(\theta_1 - \phi) \right] \cdot e^{(-R/\omega L)(\omega t - \pi - \theta_1)} \right\} \quad (4.27)$$

(iv)  $\theta_7 < \omega t < \theta_8$  olduğu zaman ,  $\theta_7 = (\theta_1 + 2\pi/3)$  olur.

$$i = -\frac{V_m}{R} \left\{ \cos\phi \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi\right) - \frac{E}{V_m} + \left[ \frac{E}{V_m} - \cos\phi \cdot \cos(\theta_1 - \phi) \right] \cdot e^{(-R/\omega L)(\omega t - 2\pi/3 - \theta_1)} \right\} \quad (4.28)$$

Bu akım darbelerine Fourier analizini uyguladığımız zaman , 5. harmoniğin aynı temel bileşenli dikdörtgen dalga şekillerinin üç katına ulaşabilen tepe değerlerine sahip olduğunu görebiliriz.

Dc motorlar , tristör dönüştürücüleri ile kullanım için özel olarak dizayn edilir. Bu motorların endüvi endük-tansı , süreksiz akımlardan kaçınmak için genellikle artırılır. Dobinson tarafından tanımlanmış bir yaklaşım metodu , dalgalılık oranına göre ac akımın harmonik bileşenlerini denklem (4.29) ile ortaya çıkarır.

$$r = \frac{I_r}{I_d} \quad (4.29)$$

Burada  $I_r$  , doğru akımın alternatif dalgalılığıdır ve  $I_d$  , belli bir hızda ve yükte motor endüvi devresinde akan ortalama doğru akımı gösterir.

#### 4.3.2 Yarı kontrollü doğrultma

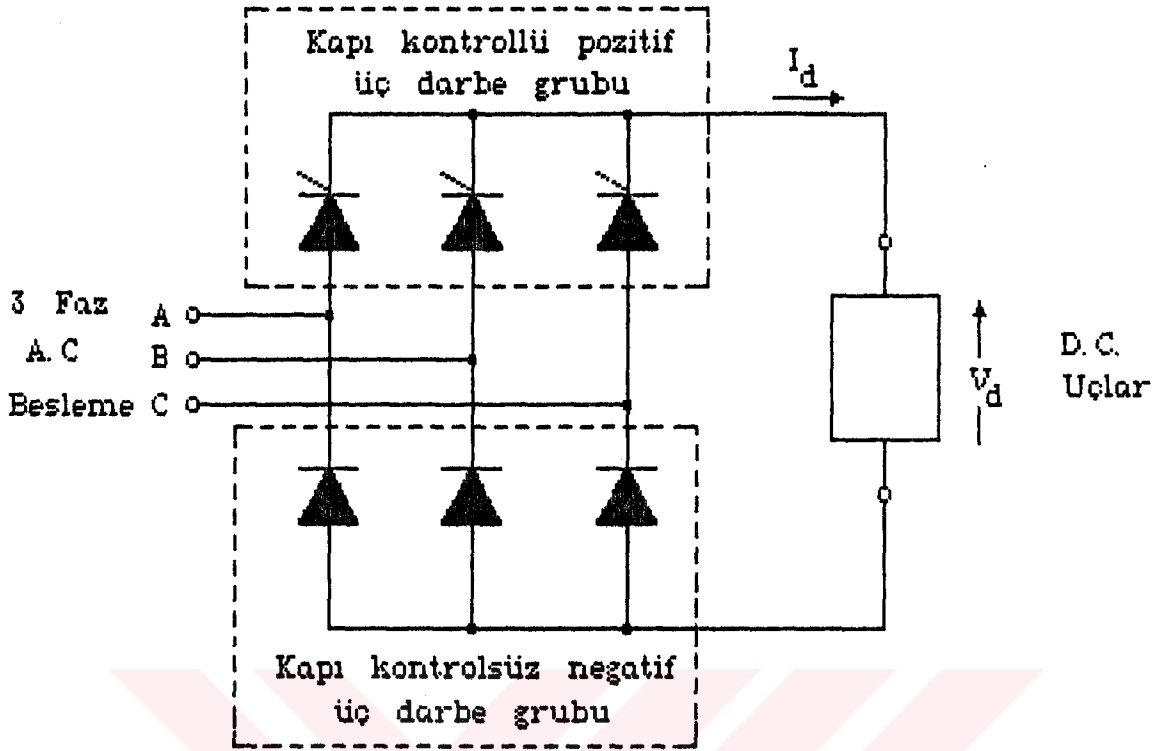
Değişken hızlı dc tahrik devrelerinde , yarım dalga şekline sahip tristör doğrultucularının kullanımı , ekonomik olmaları açısından genelde tercih edilmektedir. Bu sistemler , tam yükte işletildikleri zaman , ( örneğin 0 ateşleme açısına sahip ) hemen hemen tamamen kontrol edilmiş dönüştürücüler gibi aynı harmonik akımları üretirler ve çok verimli çalışırlar. Bununla beraber , işletim koşulları altında istenilen ateşleme gecikmeleri , Şekil 4.20 'de görüldüğü gibi , akım dalga şeklinin yarım dalga simetrisinde kayıptır. Düşük yüklerde bu kontroller , yalnızca çok zayıf bir güç faktörüne sahip değildirler , aynı zamanda çift sayılı harmoniklerde önemli miktarda dalga şekli bozulmasına sebep olurlar.

Şekil 4.19 'da üç fazlı yarı kontrollü dönüştürücünün bağlantı şeması verilmektedir. Şekil 4.20 'de ise ,  $\alpha = 60^\circ$  için , bu dönüştürücüye ait teorik dalga şekli gösterilmektedir.

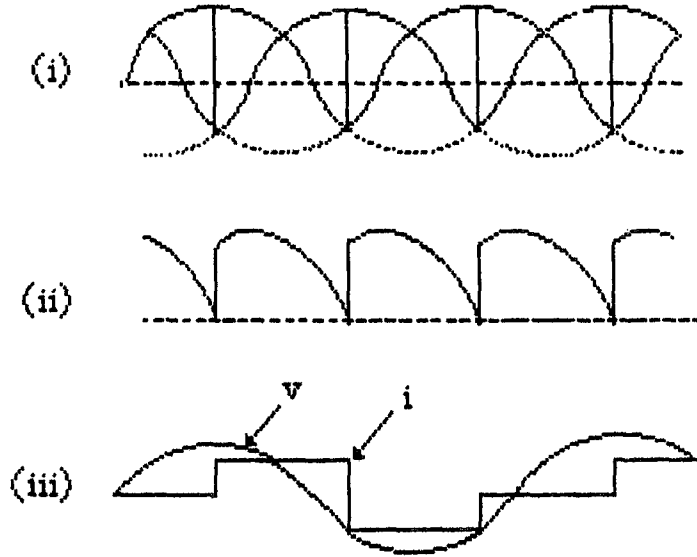
Şekil 4.20 'de ; (i) nötr (—) beslemeye göre dc uçtaki pozitif bir grubun gerilimini ve yine nötr (.....) beslemeye göre dc uçtaki negatif bir grubun gerilimini ,

(ii) köprünün dc uç gerilimini ,

(iii) A fazının besleme gerilim ve akımını gösterir.



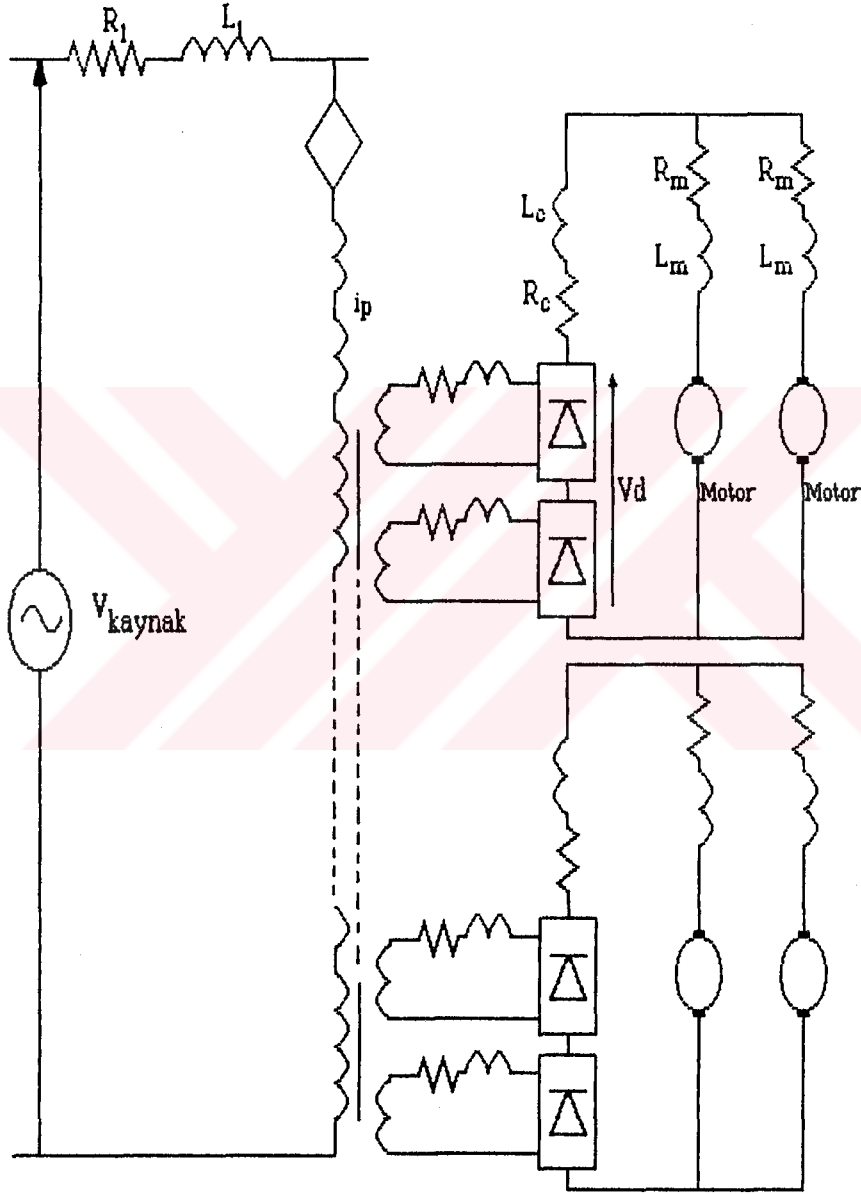
Şekil 4.19. Üç fazlı yarı kontrollü dönüştürücü şekli



Şekil 4.20.  $\alpha = 60^\circ$  için , yarı-kontrollü dönüştürücüye ait teorik dalga şekilleri

### 4.3.3 Teker teker kontrol edilmiş köprüler

Tek köprü kontrolü , genelde Şekil 4.21 'de görüldüğü gibi demiryolu çer şekillerinde kullanılır.



Şekil 4.21 Tipik bir lokomotif güç devresi

Bu tip kontrol , paralel bağlı iki dc çer motoruna seri bağlanmış iki köprü dönüştürücü grubundan meydana gelir.

Başlangıçta , dc motorun ters emk 'sı sıfırdır , besleme dc gerilimi düşüktür ve gecikme açısı büyüktür. Bundan dolayı ilk ivmelenme ( hızlandırma ) periyodu sırasında , maksimum dc motor akımlı köprü doğrultucu en kötü harmonik akımları üretir ve en düşük güç faktörü ile çalışır. Düşük hızlarda durumu hafifletmek için, genellikle köprülerden biri baypas yapılır ve faz kontrolu diğerinde gerçekleştirilir. Hız arttığı ve ikinci köprü minimum gecikmede çalıştığı zaman , faz kontrolu birinci köprüde yapılır. Buna ait dalga şekilleri ise Şekil 4.22 'de görülmektedir.

#### 4.3.4 Evirici beslemeli ac sürücüler

Ac sürücü kontrolünde yaygın olarak kullanılan , üç fazlı evirici köprü devresi Şekil 4.23 'de verilmektedir. Bu devre , herbiri geri besleme diyoduna sahip ters paralel bağlanmış 6 kontrol edilmiş tristörden meydana gelir. Köprü , ya kontrol edilmiş bir doğrultucudan sağlanan değişken bir dc gerilim ile yada sabit bir dc gerilim ile beslenir. Her iki durumda da kararlı rejim koşulları için , dc gerilim seviyesi sabit düşünebilir.

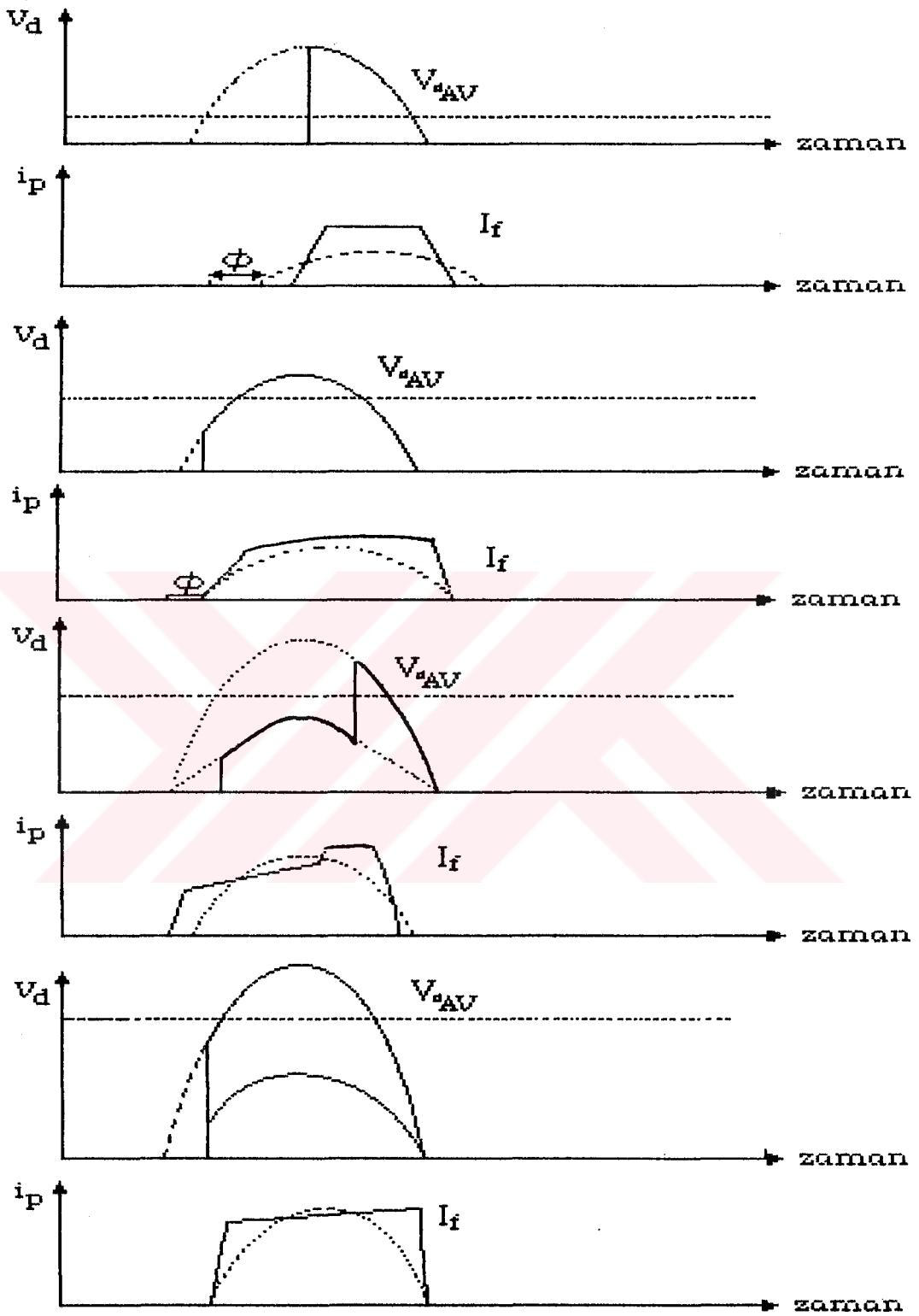
Şekil 4.23 'de gösterilen devrede , evirici faz çıkış gerilimi iki farklı gerilim seviyesinden birinde sürekli- dir. Toprağa göre değişken nötr gerilimi , evirici faz çıkış gerilim dalga şekilleri  $V_A$  ,  $V_B$  ,  $V_C$  'ye bağlı olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$V_N = \frac{1}{3} ( V_A + V_B + V_C ) \quad (4.30)$$

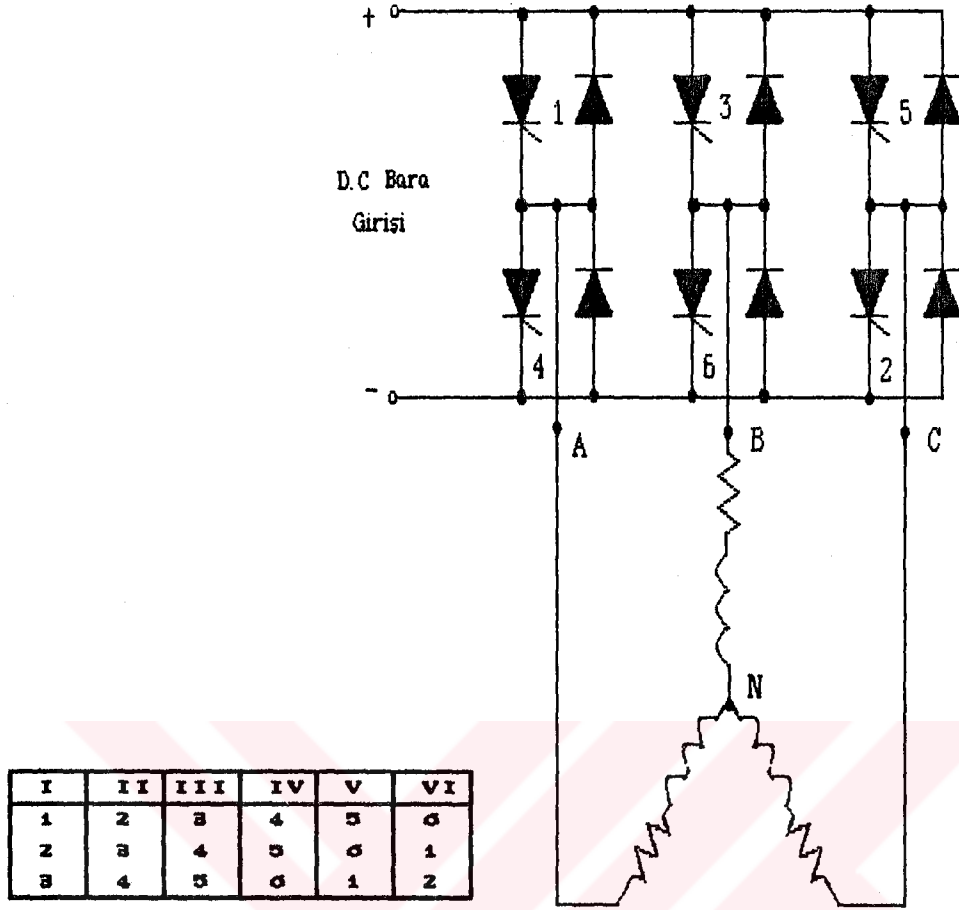
Tipik bir motor faz gerilimi ise ,

$$V_{AN} = V_A - V_N = \frac{1}{3} ( 2V_A - V_B - V_C ) \quad (4.31)$$

olur.



Şekil 4.22. Teker teker kontrol edilmiş bir çift köprü dönüştürücünün akım ve gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.23. Kapalı anahtar sırasını gösteren dengelenmiş bir motor yükü ve temel üç faz evirici devresi

k sıralı bir harmoniğin motor faz gerilimi denklem (4.32) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
 V_{AN(n)} &= \frac{1}{2} \left[ 2V_{A(n)} - V_{B(n)} - V_{C(n)} \right] \\
 &= \frac{1}{3} \left[ 2V_{mn} \sin n\omega_1 t - V_{mn} \sin n(\omega_1 t + 2\pi/3) \right. \\
 &\quad \left. - V_{mn} \sin n(\omega_1 t - 2\pi/3) \right] \\
 &= \frac{2}{3} V_{mn} \sin n\omega_1 t \left[ 1 - \cos 2n\pi/3 \right] \\
 &= \frac{2}{3} V_{A(n)} \left[ 1 - \cos 2n\pi/3 \right] \quad (4.32)
 \end{aligned}$$



Benzer şekilde B ve C fazları için ,

$$V_{BN(n)} = \frac{2}{3} V_{B(n)} [ 1 - \cos 2n\pi/3 ] \quad (4.33)$$

$$V_{CN(n)} = \frac{2}{3} V_{C(n)} [ 1 - \cos 2n\pi/3 ] \quad (4.34)$$

şeklinde elde edilir. Ayrıca tüm pozitif ve negatif sequence harmonikleri için ,

$\cos 2n\pi/3 = -1/2$  , olduğu için dolayısıyla ,

$$V_{AN(n)} = V_{A(n)} \quad V_{BN(n)} = V_{B(n)} \quad V_{CN(n)} = V_{C(n)}$$

olur. Dengelemiş üç faz sisteminde ise sıfır sequence harmonikleri için ,

$\cos 2n\pi/3 = 1$  , ve

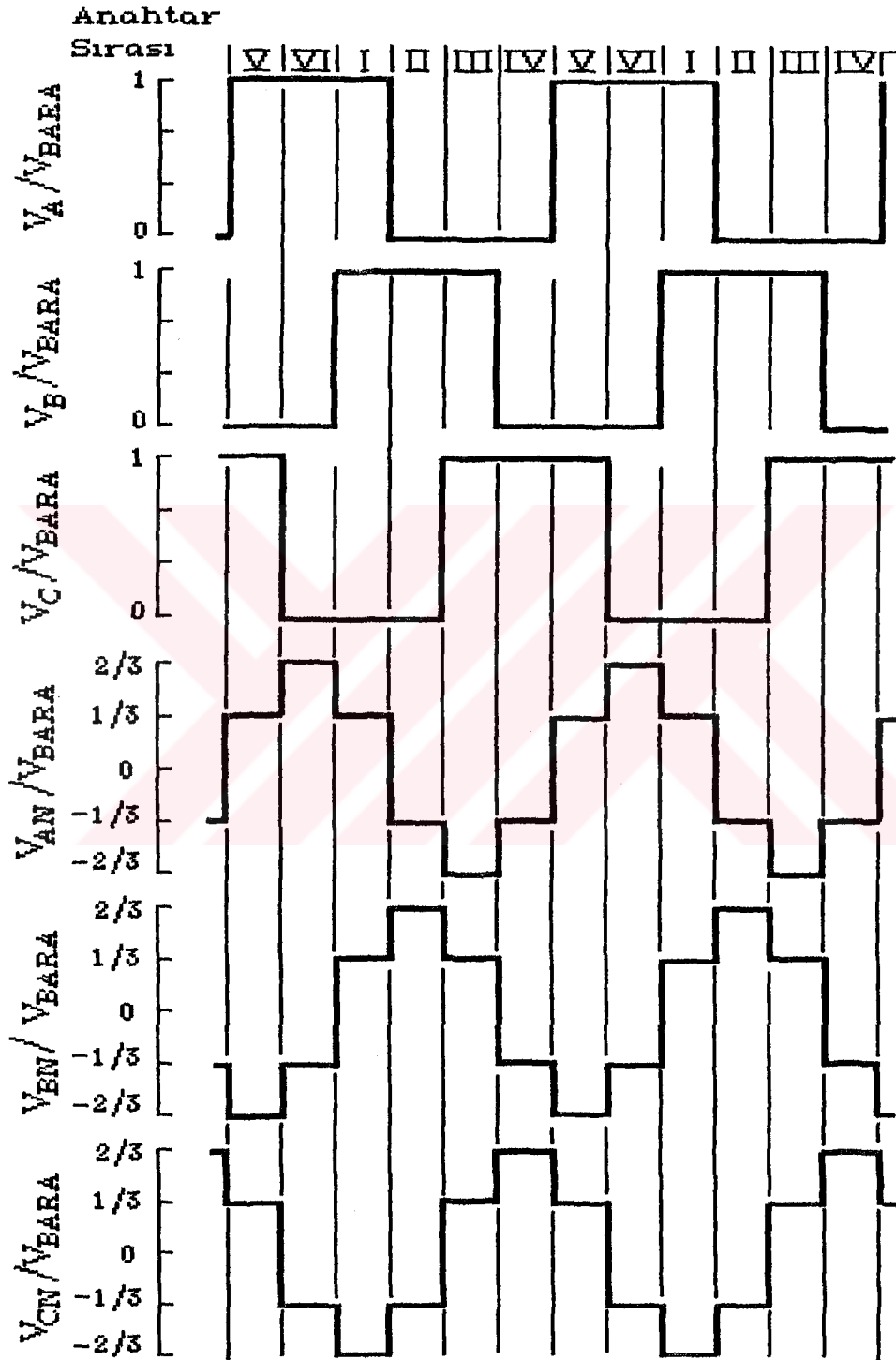
$$V_{AN(n)} = V_{BN(n)} = V_{CN(n)} = 0 \text{ olmaktadır.}$$

Bu durumda , bir ac motoru besleyen basit bir evirici devresi için , motor faz giriş gerilimi tüm evirici fazında yok edilmiş olan üç katlı harmonikler hariç tutularak , evirici faz çıkış gerilimine eşit olur.

Üç katlı harmoniklerin yok edilmesinin etkisi , Şekil 4.24 'de gösterilir.

Her motor için faz giriş gerilim dalga şekli , kare evirici faz gerilim dalga şekillerinden meydana geldiği için , frekans domeninde motor faz gerilimi aşağıdaki denklem ile verilir.

$$V_P = \frac{2}{\pi} V_{\text{barc}} \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(6k+1)} \sin ( 6k+1 ) \omega_1 t \right. \\ \left. + \frac{1}{(6k+5)} \sin ( 6k+5 ) \omega_1 t \right] \quad (4.35)$$



Şekil 4.24. Temel 6 adım dalga şekilleri

Ayrıca motor faz mıknatıslanma endüktansı  $L_m$ , giriş gerilim dalga şekli için integre edici bir filtre gibi davranır.

$$i_p = \frac{1}{L_m} \int_{t_0}^t v_p dt \quad (4.36)$$

Bu durumda n. harmonik faz gerilimi için, ifade aşağıdaki gibi olur.

$$V_{P(n)} = \frac{2}{\pi n} V_{bara} \sin n\omega_1 t \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} i_{P(n)} &= \frac{2 V_{bara}}{\pi n L_m} \int_{t_0}^t \sin n\omega_1 t dt \\ &= \frac{2 V_{bara}}{\pi n^2 \omega_1 L_m} \cos n\omega_1 t \end{aligned} \quad (4.38)$$

Denklemler (4.35) 'den yararlanılarak, mıknatıslanma akımı denklem (4.39) ile verilir.

$$\begin{aligned} i_p &= \frac{2V_{bara}}{\pi\omega_1 L_m} \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1)\omega_1 t \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5)\omega_1 t \right] \end{aligned} \quad (4.39)$$

Eşdeğer bir N dönüşünün bir motor faz mıknatıslanma endüktansı için, bileşke motor faz hava aralığı akı fazörü  $\phi_p$ , denklem (4.40) ile verilir.

$$\phi_P = \frac{2V_{\text{bara}}}{\pi W_1 N} \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1) \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5) \omega_1 t \right] \quad (4.40)$$

Bu motor faz harmonik değerlerinin bağıl genlikleri Tablo 4.1 'de gösterilir.

Tablo<sup>p</sup> 4.1. Motor faz harmoniklerinin bağıl genlikleri

D eğer ler	HARMONİK SAYISI , n								
	1	5	7	11	13	17	19	23	25
$V_P$	1.000	0.200	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.040
$i_P$	1.000	0.040	0.020	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002
$\phi_P$	1.000	0.040	0.020	0.008	0.006	0.003	0.003	0.002	0.002

Denklemler (4.35) 'de temel bileşen frekans geriliminin tepe genliği ,

$$V_{P(1)} = ( 2V_{\text{bara}} / \pi ) \text{ olarak verilir.}$$

Ve denklem (4.40) 'dan temel bileşen hava aralığı akı fazörünün tepe genliği ,

$$\phi_{P(1)} = \frac{1}{W_1 N} \frac{2V_{\text{bara}}}{\pi} = \frac{V_{P(1)}}{W_1 N} \quad (4.41)$$

olarak bulunur.  $\omega$  temel bileşen frekansı değiştiği zaman ,  $\phi_{P(1)}$  sabitini devam ettirebilmek için ,  $V_{P(1)}$  ifadesinin  $\omega_1$  'in lineer bir fonksiyonu olması gerekir.

<sup>p</sup> ARRILLAGA , J. et al BRADLEY , D. A. , BODGER , P. S. , 1985. Power Systems Harmonics . John Wiley and Sons.

Ac motor hız kontrolörlerini besleyen bazı yüksek güç eviricileri , frekans ile gerilimi lineer olarak değiştirmek için dc barada ayrı bir dc kıyıcı güç kaynağı kullanırlar. Bu durumda , evirici çıkış gerilim dalga şekilleri daima kare dalgadır ( Bk. Şekil 4.24 ) ve hava aralığı harmonik akı vektörleri , Tablo 4.1 'de gösterilmiş olan bağıl genliklere sahiptirler.

Dc gerilim kontrolundan bağımsız olmak için bir alternatif , darbe genişlik modülasyonunun kullanılmasıdır.

#### 4.4 DGM Tekniği

DGM (PWM) tekniği , sabit gerilimli dc kaynağından , değişken frekansta bir gerilimde ac çıkış oluşturan bir evirici olarak bilinir. Eviricilerin en kompleks çalışma şekli , darbe genişlik modülasyonunu uygulayanlarıdır. Bilindiği gibi , eviriciler önemli harmonik kaynaklarından biridir. Bu nedenle evirici çıkış dalgasındaki harmonikleri azaltmak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak farklı genlik ve genişlikte çeşitli dikdörtgen dalgalar üreterek çıkış dalgasını bunların uygun kombinezonu ile oluşturmaya dayanır. Bunları iki kısımda toplayabiliriz. Birinci kısım , darbe genişlik modülasyonlu eviriciler , ikinci kısım darbe genlik modülasyonlu veya basamaklı dalga çıkışlı eviricilerdir.

Basamaklı dalga eviricilerinin çeşitli avantajları ve bunların yanında da bazı sınırlamaları vardır. Bu tip eviricilerde denetleme devresi oldukça basittir ve bir yarım çevrimdeki anahtarlama sayısı az olduğundan anahtarlama kayıpları da düşük olacaktır.

Çıkış dalga biçimi kare dalga şeklinde olduğundan oldukça yüksek oranda harmonikler içerirler. Bu harmoniklerin belirli bir düzeyin altında tutulması gerekir. Bunu sağlayabilmek için , harmoniklerin süzülmesi , ancak sabit

frekans çıkışlı eviricilerde mümkündür. Değişken frekans çıkışları için , filtre devresi tasarımı oldukça zordur. Kullanılan filtre devreleri eviricinin fiziksel boyutunu büyülttüğü gibi maliyetini de artırır.

Bu tip sorunlar , eviricilerde darbe genişlik modülasyonu (DGM) kullanılarak çözümlenebilir.

#### 4.4.1 Darbe genişlik modülasyonlu eviricilerde harmonikler

Bu tip eviricilerde , bir evirici katından yararlanılarak genlikleri eşit , genişlikleri farklı darbeler üreten güç elektronik düzenekleri kullanılır. En yaygın olarak kullanılan yöntemler , sinüs şeklindeki DGM ve harmonik yoketme yöntemidir.

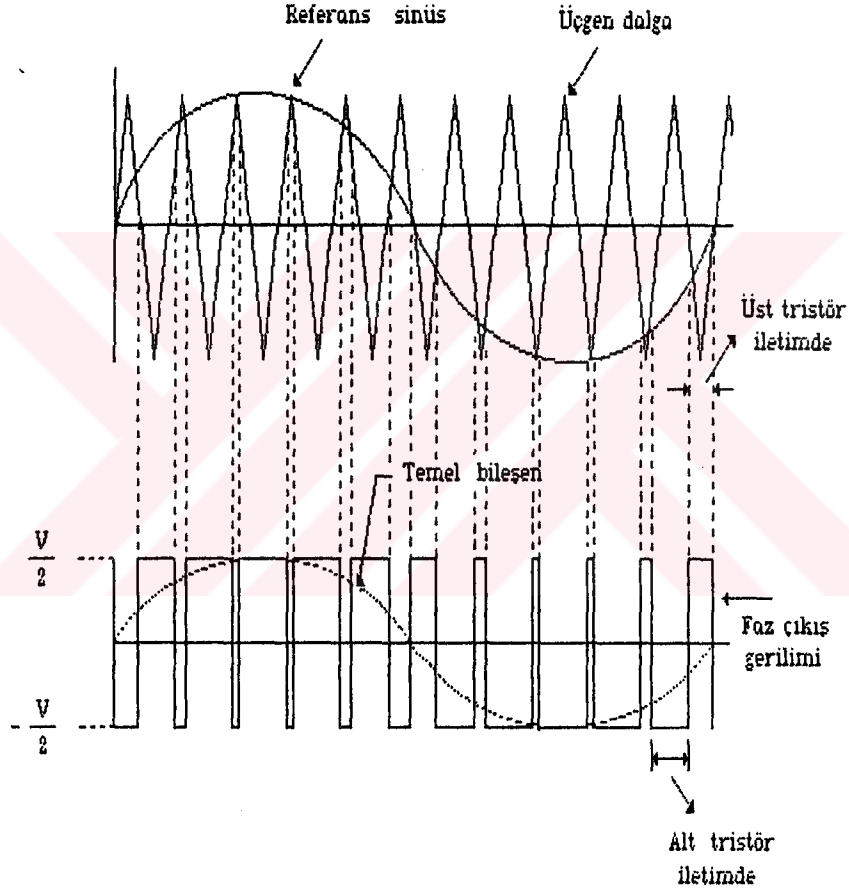
##### 4.4.1.1 Sinüs şeklindeki DGM yöntemi

Bu yöntemde üçgen taşıyıcı dalga , elde edilmek istenen çıkış frekansındaki bir referans sinüs dalgasıyla karşılaştırılır. DGM yönteminin temel ilkesi , Şekil 4.25 ' de gösterilmektedir.

Kesim noktaları eviricinin bir kolundaki elemanların anahtarlama anlarını belirtir. Çıkış geriliminin genliğini değiştirmek için , referans sinüsün genliği değiştirilir. Bu yöntem "doğal örnekleme yöntemi " denir.

Elde edilen çıkış dalga biçiminde  $M_1 P_1 w_c + N_1 w_e$  biçiminde harmonikler bulunur. Burada  $w_c$  taşıyıcı dalga frekansı ,  $w_e$  referans ( modülasyon ) frekansı ,  $M_1$  ve  $N_1$  birer tamsayı ,  $M_1 + N_1$  tek bir sayı olup  $P_1$  ise taşıyıcı / referans frekans oranıdır. Harmoniklerin genliği  $M_1$  ve  $N_1$  ile ,  $P_1$  ' den bağımsız olarak ters orantılıdır. Bir ac motor devresinde evirici kullanılması durumunda ,  $P_1$  ' nin yüksek değerleri için harmonikler , makinanın kaçak endüktansı ile süzülür ve evirici

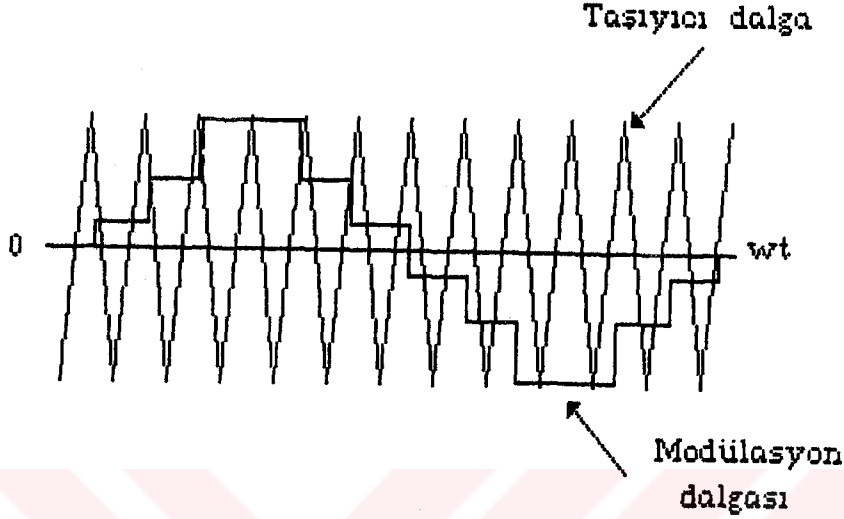
akımı bir sinüse yaklaşır.  $P_1$ , genel olarak için katı şeklindedir. Bu durumda için katı olan harmonikler önlenmiş olur. Düşük frekanslarda yüksek  $P_1$  değeri ile makinanın harmonik kayıpları minimum bir düzeyde tutulur, yüksek frekanslarda ise  $P_1$  düşürülerek anahtarlar kayıpları azaltılır ve aynı zamanda tristörler için gerekli minimum susma sağlanmış olur.



Şekil 4.25. Darbe genişlik modülasyonu yönteminin temel ilkesi

DGM yönteminin diğer bir uygulaması şekli de, referans sinüs dalgası yerine bunun taşıyıcı frekansında örneklenmiş ve tutulmuş şeklini kullanmaktır. Bu durum, Şekil 4.26 'da gösterilir.

Mikro işlemci kullanımıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilecek olan bu yönteme " tek biçimli örnekleme yöntemi " adı verilir ve harmonikler açısından doğal örnekleme yöntemine kıyasla daha iyi sonuç verir.

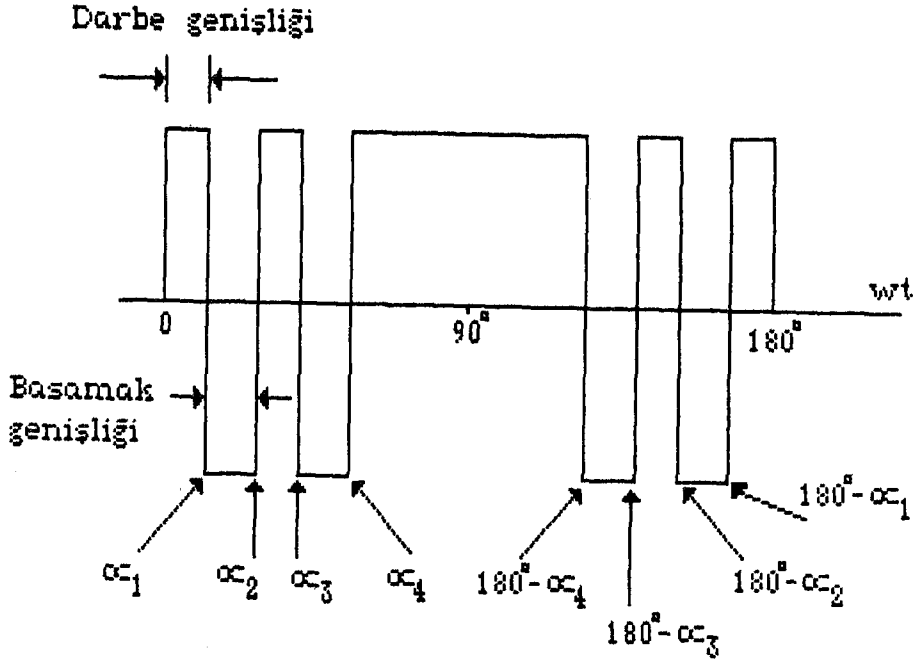


Şekil 4.26. Tek biçimli örnekleme yöntemi

#### 4.4.1.2 Harmonik yoketme yöntemi

Evirici çıkışındaki istenmeyen harmonikler , harmonik yoketme yöntemi olarak bilinen bir yöntemle ortadan kaldırılabilir ve aynı zamanda da temel bileşenin genliği denetlenebilir. Bu yöntem , Şekil 4.27 'de bir yarım çevrim için verilir. Şekilden de anlaşılacağı gibi  $\alpha_1$  ,  $\alpha_2$  ,  $\alpha_3$  ve  $\alpha_4$  açıları ile temel bileşen gerilimi kontrol edilebilir ve ilk üç harmonik yokedilebilir. Bu durumda , üç fazlı bir eviricide 5. , 7. ve 11. harmonikler ortadan kaldırılabilir. Yok edilecek olan harmonik sayısı , hesaplanması gereken  $\alpha$  sayısından bir eksiktir.





Şekil 4.27. Harmonik yoketme metodu için kullanılan gerilim dalga şekli

Bu dalga için genel bir Fourier serisi , aşağıdaki ifade ile verilir.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cdot \cos n\omega t + b_n \cdot \sin n\omega t \right] \quad (4.42)$$

Burada , bilindiği gibi  $a_n$  ve  $b_n$  ifadeleri ise denklem (4.43) ve (4.44) ile gösterilir.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cdot \cos n\omega t \cdot d\omega t \quad (4.43)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cdot \sin n\omega t \cdot d\omega t \quad (4.44)$$

Yarı devir simetrik bir dalga şekli için , yalnızca sinüs bileşenli tek harmonikler mevcuttur. Bu yüzden katsayılar , aşağıdaki şekilde sonuçlanır.

$$a_n = 0 \quad \text{ve} \quad (4.45)$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt \quad (4.46)$$

Örneğin dalganın , pu olarak  $v(t) = \pm 1$  genliğine sahip olduğu kabul edilirse ,  $b_n$  ifadesi aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$b_n = \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\alpha_1} (+1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt \right. \\ \left. + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (+1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt + \dots + \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} (-1)^{k-1} \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt \right. \\ \left. + \int_{\alpha_k}^{\pi/2} (+1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt \right] \quad (4.47)$$

$$\int_{\theta_z}^{\theta_1} \text{Sin } nwt \cdot dt = \frac{1}{n} \left[ \text{Cos } n\theta_1 - \text{Cos } n\theta_z \right] \text{ bağıntısını}$$

kullanarak , ilk ve son terimi aşağıdaki denklemlerle elde edebiliriz.

$$\int_0^{\alpha_1} (+1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt = \frac{1}{n} \left[ 1 - \text{Cos } n\alpha_1 \right] \quad (4.48)$$

$$\int_{\alpha_k}^{\pi/2} (+1) \cdot \text{Sin } nwt \cdot dt = \frac{1}{n} \text{Cos } n\alpha_k \quad (4.49)$$

(4.47) denkleminin diğer bileşenleri , (4.48) ve (4.49) denklemleri yerine koyularak integrasyon yapıldığında, denklem (4.50) elde edilir.

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[ 1 + 2 (-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \dots + \cos n\alpha_k) \right]$$

$$= \frac{4}{n\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (4.50)$$

Makina nötr noktası yalıtılmış bir yıldız sargıya sahip ise , üçüncü ve üçün katı olan diğer harmonikler ihmal edilebilir. Burada  $k = 3$  ve eş zamanlı denklemler , denklem (4.50) 'den yararlanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

Temel bileşen :

$$b_1 = \frac{4}{\pi} (1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3) \quad (4.51)$$

5. harmonik bileşen :

$$b_5 = \frac{4}{5\pi} (1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3) = 0 \quad (4.52)$$

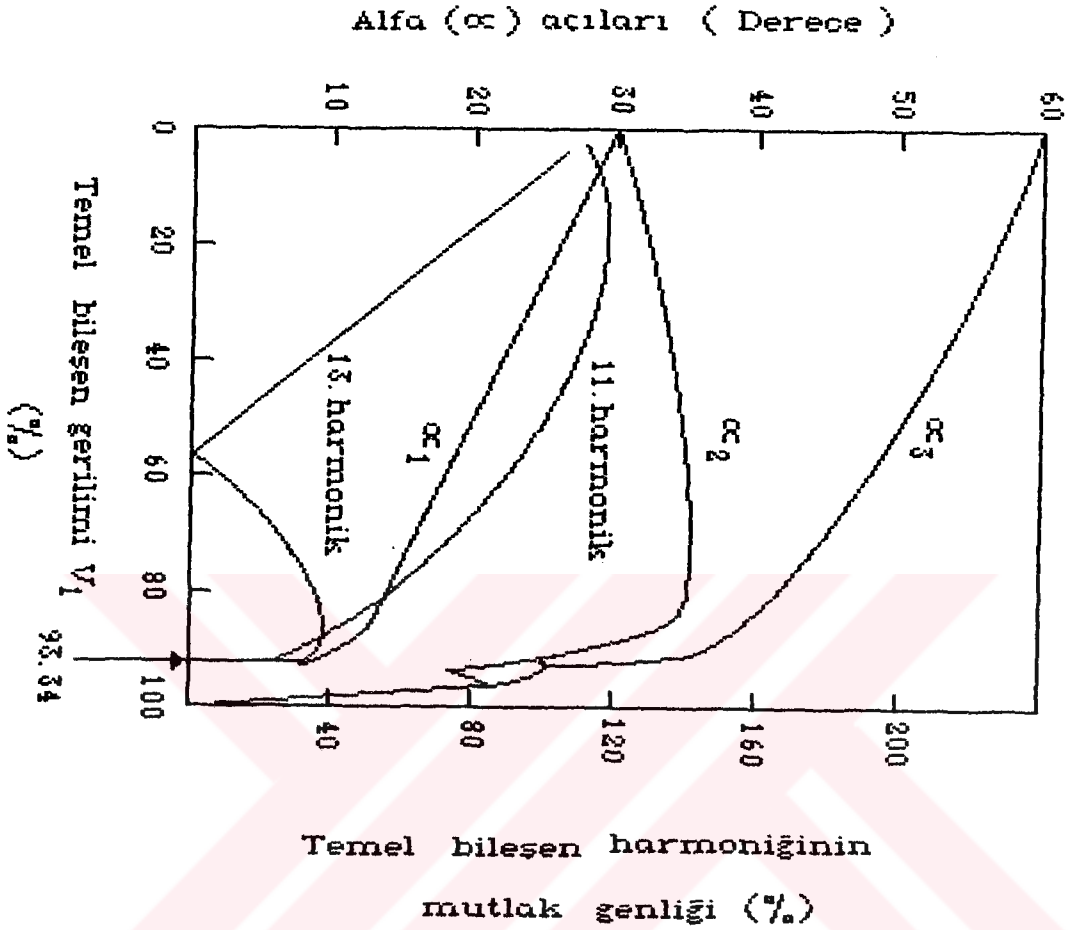
7. harmonik bileşen :

$$b_7 = \frac{4}{7\pi} (1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3) = 0 \quad (4.53)$$

şeklinde elde edilebilir.  $\alpha$  açıları , farklı çıkış gerilimlerinde çözülür ve çizilir.

Şekil 4.28 'den de görüldüğü gibi , 5. ve 7. harmonikler % 93.34 'lük bir gerilim seviyesine kadar yok edilebilir. Burada  $\alpha_1 = 0$  olur. ( Kare dalgaının karşılığı % 100 olur.) % 1 içindeki gerilim atlamaları için ,  $\alpha$  açısı tablosunun bu bölümü Tablo 4.2 'de açıklanır.

Bu hesaplama yöntemi , mikroişlemci uygulamaları için çok uygundur. Fakat , bu denklemlerin çözümü basit değildir. Çünkü bu denklemler , lineer eşitlikler olarak verilmezler , bu nedenle bu tip denklemlerin iteratif metotlarla çözümleri gerekir.



Şekil<sup>10</sup> 4.28. 5. ve 7. harmonikleri yoketmek için temel bileşen çıkış gerilimine bağlı açılar

Eğer mikroişlemci doğru ateşleme darbeleri ile çalışıyorsa, hem ekonomik hem de pratik nedenlerden dolayı, bu eşitliklerin mikroişlemciye uygun hale gelebilmesi için bir dönüşüm yapılmalıdır.

Bu durumda eşitlikler çözülebilmeli ve istenilen efektif gerilimin farklı değerlerine göre depolanmış tablolardan

<sup>10</sup>

BOSE, B. K., 1986. Power Electronics and AC Drives. Hall a Division of Simon and Schuster. Amerika.

veriler elde edilmeli ve gerilim değerinden olarak lineer eşitlikler haline dönüştürülebilmelidir. Lineer olmayan denklemlerin çözümü için Newton-Raphson yöntemi kullanılır ve elde edilen yaklaşık hata oldukça küçüktür.

Tablo<sup>10</sup> 4.2. % 93 ' den % 100 ' e  $V_1$  gerilimi için  $\alpha$  açısı tablosu

$V_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
93	0	15.94	22.03
94	0	16.17	21.56
95	0	16.41	20.86
96	0	16.88	20.39
97	0	17.34	19.92
98	0	11.02	13.59
99	0	4.69	7.27
100 (Kare dalga)	0	0	0

#### 4.4.2 Basamaklı dalga çıkışlı eviricilerde harmonikler

Birden fazla evirici katı kullanarak , herbir evirici katında ortaya çıkan dikdörtgen dalga şekillerinin uygun biçimde toplanmasıyla elde edilen dalga şekilleridir.

Basamaklı çıkış dalga şeklindeki harmonikleri azaltmak için , üç farklı yöntem kullanılmaktadır.

1) Basamak genişliklerini eşit kabul edilebilir veya belirli bir açının katları olarak farzedebilir.

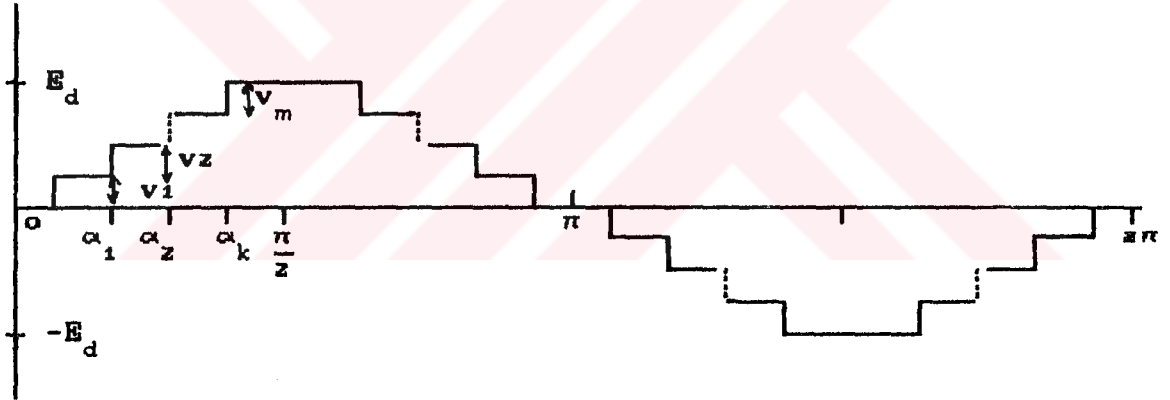
2) Basamakların genlikleri eşit kabul edilip , basamakların genişlikleri , yani açıları değişken olarak alınabilir.

<sup>10</sup>

BOSE , B. K. , 1986. Power Electronics and AC Drives. Hall a Division of Simon and Schuster. Amerika.

3) Hem basamakların genlikleri hem de genişlikleri değişken olarak kabul edilebilir.

Basamakların genliklerinin değişken olarak kabul edilmesi pratikte tercih edilmez. Değişken olarak çoğunlukla  $\alpha_k$  açıları alınarak harmonik analiz yapılır. Yokedilmek istenilen harmoniklerin genlik ifadeleri çıkarılıp, sıfıra eşitlenerek bir denklem sistemi elde edilir. Daha önce belirtildiği gibi, bu denklemleri sağlayacak şekilde  $\alpha_k$  değerleri çözülür. Temel bileşen geriliminin maksimum veya toplam harmonik bozulmanın minimum olması istenildiği takdirde, problemin çözümü zorlaşır. Eviriciden farklı olarak değişken gerilim ara devresine gereksinim vardır. Şekil 4.29 'da basamaklı çıkış dalga şekli verilmiştir.



Şekil 4.29. Basamaklı bir çıkış dalga şekli

Bu şekilde verilen bir çıkış dalgası için, Fourier serisi katsayıları, denklem (4.42) 'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$n = 2, 4, 6, \dots$  için,

$$a_n = 0 \text{ ve } b_n = 0 \quad (4.54)$$

$n = 1, 3, 5, \dots$  için,

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^{m_1} V_k \cdot \cos(n\alpha_k) \quad (4.55)$$

şeklinde olur. Burada  $n$  harmoniğin numarasını,  $m_1$  çeyrek periyottaki sıfırdan farklı basamak sayısını gösterir.  $\alpha_{m_1} \leq \pi/2$  'ye eşittir ve dalga şeklinde çeyrek dalga simetrisi dikkate alınmıştır.

Bu şekilde verilen bir dalga şeklinde, harmonikleri azaltmak veya dalganın harmonik bozulmasını küçültmek için, basamak genişlikleri eşit veya belirli bir açının katları varsayıлып, basamakların genlikleri değişken alınarak çözüm yapılabilir. Bu durumda,

$$E_k = \sum_{i=1}^k V_i \quad (4.56)$$

$$\alpha_1 = \frac{\alpha}{2}, \alpha_2 = 3 \frac{\alpha}{2}, \alpha_3 = 5 \frac{\alpha}{2}, \alpha_k = (2k-1) \frac{\alpha}{2} \quad (4.57)$$

şeklinde basamakların genişlikleri  $\theta = \alpha / 2$  'nin katları olarak kabul edilmiştir.  $q$  çeyrek periyottaki basamak sayısı,  $\alpha = \pi / 2q$  olacaktır.

$a_n$  ifadesi, denklem (4.56) ve (4.57) 'den yararlanılarak Şekil 4.29 'da verilen dalga şekli için harmonik katsayıları aşağıdaki şekilde bulunur.

$$a_n = \frac{4}{\pi} \left[ \int_{\alpha-\theta}^{\alpha+\theta} E_1 \sin(n\omega t) (d\omega t) + \int_{2\alpha-\theta}^{2\alpha+\theta} E_2 \sin(n\omega t) (d\omega t) + \dots + \int_{m_1\alpha-\theta}^{m_1\alpha+\theta} E_{m_1} \sin(n\omega t) (d\omega t) + \int_{\pi/2-\theta}^{\pi/2} E \sin(n\omega t) (d\omega t) \right]$$

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[ 2 \sum_{k=1}^m E_k \sin(kn\alpha) + E_{m+1} \right] \cdot \sin(n\theta) \quad (4.58)$$

$\theta = \pi / 4q$  olduğuna göre , bu şekildeki bir basamaklı dalgada var olan harmonikler , denklem (4.58) 'den de görüldüğü gibi ,

$$n = 4qk + 1 \quad ; \quad k = 1 , 2 , 3 , \dots \quad (4.59)$$

denklem (4.59) ile verilir.

#### 4.5 Düşük Güç Dönüştürücüleri

Düşük güç dönüştürücülerinin iki tipi vardır. Bunlardan biri daha öncede bahsedildiği gibi , televizyon düzenekleri , diğeri ise akümülatör sarj devreleridir.

Televizyon alıcıları ve akü sarj devrelerini de, harmonik üreten kaynaklar grubuna ilave edebiliriz.

Bu bölümde , harmonik üreten kaynaklar ayrıntılı olarak verilmeye çalışılmıştır. Harmoniğe neden olan kaynaklar giriş bölümünde de kısaca tanıtılmıştır. Ayrıca diğerk harmonik üreten kaynakları da daha öncede bahsedildiği gibi , aşağıda belirtilen başlıklar halinde verebiliriz.

#### 4.6 Diğerk Harmonik Üreten Kaynaklar

- 1) Lineer olmayan transformatör mıknatıslanması ,
- 2) Döner makineler ,
- 3) Ark fırınları ,
- 4) Civa ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri vs ,



olarak ana başlıklar halinde verebiliriz.

#### 4.7 Örnek Program

Bu bölümün sonuna ilave olarak , herhangi bir şekilde tanımlanan bir fonksiyonun , Runge-Kutte iterasyon yöntemi kullanılarak , istenilen harmonik derecelerine kadar sinüslü ve cosinüslü bileşenleri ve temel bileşenini hesaplayan , çizen bir program Ek.A ' da verilmiştir.



## BÖLÜM 5

### HARMONİKLERİN ETKİLERİ

#### 5.1 Giriş

Bu bölümde , harmoniklerin şebekelere , etraflarındaki tüketicilere ve donanımlara olan olumsuz etkileri ele alınmıştır. Bu etkileri , ayrıntılı olarak incelemeden önce aşağıda verildiği gibi ana başlıklar halinde sıralayabiliriz.

Harmonikler ;

- 1) Elektrik makinalarında , aşırı ısınmalara ve mekanik salınımlara ,
- 2) Güç üretiminde , iletiminde ve kullanımında verimin azalmasına ,
- 3) Güç sisteminde , elektrik tesis bileşenlerinin yalıtımının yıpranması ve dolayısıyla onların yararlı kullanım süresinin kısılmasına ,
- 4) Elektrik tesisinin kötü çalışmasına ,
- 5) Transformatörlerde kayıpların artmasına ,
- 6) Rezonans dolayısıyla güç sisteminde aşırı gerilimlere ve akımlara ,
- 7) Kapasite gruplarında tahribatlara ,

- 8) Haberleşme sistemlerinde parazitlere ,
- 9) Güç sistemlerinde ölçüm hatalarına ,
- 10) Yarı iletkenli ve mikroişlemcili sistemlerde , işa -  
retlerde karışımlara ,
- 11) Santrallardaki uyarma sistemlerinde ve büyük motor  
kontrol devrelerinde karışımlara ve bozulmalara ,
- 12) Ateşleme anları sıfır geçişlerine göre ayarlanmış  
devrelerde kararsız çalışmalara ,
- 13) Televizyon alıcılarında , tepe gerilim değerini  
etkileyerek , TV resim boyutunda ve parlaklığında de -  
ğişikliklere neden olurlar.

Bu olumsuz etkiler , diğer kısımlarda ayrıntılı olarak  
ele alınmaktadır.

## 5.2 Elektrik Makinalarındaki Harmoniklerin Etkisi

Güç sistemi bileşenlerindeki harmoniklerin etkisi dikkate  
alındığında , bu etkinin statik dönmeyen cihazlar ( ör -  
neğin transformatörler , kablo ve kapasitörler ) ve  
motorlar arasında önemli bir bölünmeye neden olduğu  
görülür. Statik cihazlardaki harmoniklerin etkisi , sa -  
dece ısınmanın artması şeklindedir. Bu etki , aynı  
zamanda motorlar için de geçerli olup , ancak değeri -  
lendirilmeleri daha karmaşıktır. Çünkü stator ve rotorun  
harmoniklerden etkilenmesindeki farklılık ve harmonik  
ısınmaya karşılık alınan termik cevaplar onların fiziksel  
tasarımlarında önemli değişikliklere neden olmaktadır.

Dönen makinalarda ortaya çıkan önemli bir etki de,  
harmonik gerilimlerin kompleks titreşimler yaratması ve  
rotor elemanlarının bağlı olduğu donanımda mekanik rezo -  
nanslar meydana getirmesidir. ( Örneğin bir kompresörün

bıçaklarında olduğu gibi.) Harmoniklerin genel etkilerinin elektrik motorlarında da ortaya çıkabileceği gözden kaçırılmamalıdır.

Bir dönüştürücü tarafından üretilen sinüs şeklinde olmayan bir gerilim , stator sargısında etkilendiği zaman dönen bir harmonik akım meydana gelir. Harmonik akımın genliği , stator sargı şekline , (örneğin 3 - faz veya 6 - faz ) harmonik reaktanslara ve rotor bastırma etkisine göre değişir. 5., 7. ve 11. gibi harmonik gerilimlerin her biri , stator sargısındaki harmonik akımlara karşılık olarak bir akım üretecektir. Bu harmonik derecelerin herbiri , simetrik bileşen teorisine göre, negatif veya pozitif sequence olarak tanımlanabilirler. Dolayısıyla bu harmonik akımlar , stator sargısında bir miktar daha ısınmaya neden olurlar. Bu ısınma , akımın temel bileşeninin oluşturduğu sıcaklık artışına eklenecektir. Statordaki harmonik akışları , hava aralığında uzay harmonikleri magneto motor kuvvetlerinin bir serisini (MMK) meydana getirecektir. Bu , rotorda bir akım akışına neden olacaktır. Her bir harmonik akım, pozitif veya negatif sequence olarak tanımlandığında, uzay harmoniği magneto motor kuvvetinin devri , rotor devrine bağlı olarak ya ileri yada geri olacaktır. Hava aralığında elde edilen stator MMK uzay harmonikleri, aşağıdaki ifade ile tanımlanırlar.

$$v = 2k m_2 \bar{+} 1 \quad (5.1)$$

Bu denklemde ,

$v$  = Uzay harmonik derecesini ,

$m_2$  = Stator sargı fazlarının sayısını ( üç veya altı) ,

$k$  = Herhangi bir tamsayıyı belirtir.

Tablo 5.1 ve 5.2 sıra ile üç faz ve altı faz sargılarında üretilen uzay harmoniklerini göstermektedir. Tablolardan da anlaşılacağı gibi , altı faz sargı düzenlemesi üç faz sargı düzenlemesine göre

harmonikleri daha çok bastırır. Alt faz makinalarında, çıkış döndürme momentleri darbeleri ve rotor sıcaklığının artması, üç faz makinalarına göre daha az olmaktadır. Altı fazlı bir makina 12 darbeli bir dönüştürücüye bağlı olduğu zaman, stator ve rotordaki harmonik akımların seviyesi oldukça azaltılabilir.

Tablo<sup>12</sup> 5.1. Üç faz sargılı stator MMK bileşenlerinin devir yönleri ve hızı<sup>11</sup>

Uzay Harmoniklerinin Derecesi	n Zaman Harmoniklerinin Derecesi					
	1	3	5	7	11	13
1	+1		-5	+7	-11	+13
3		+1				
5	-1/5		+1	-7/5	+11/5	-13/5
7	+1/7		-5/7	+1	-11/7	+13/7
9		+1/3				
11	-1/11		+5/11	-7/11	+1	-13/11
13	+1/13		-5/13	+7/13	-11/13	+1

Tablo<sup>12</sup> 5.2. Altı faz sargılı stator MMK bileşenlerinin devir yönleri ve hızı<sup>11</sup>

Uzay Harmoniklerinin Derecesi	n Zaman Harmoniklerinin Derecesi					
	1	3	5	7	11	13
1	+1				-11/1	+13/1
3						
5			+1	-7/5		
7			-5/7	+1		
9						
11	-1/11				+1	-13/11
13	+1/13				-11/13	+1

<sup>11</sup> Senkron hız,  $n = 1$ ,  $v = 1$  olduğu zaman elde edilir.

<sup>12</sup> HANNA, R. A., September/October 1989. Harmonics and Technical Barriers in Adjustable Speed Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 2, p. 894-900.

Bir senkron motor durumunda , rotorda endüklenen harmonik akımların frekansı aşağıdaki ifade ile elde edilir.

$$f_{n_v} = ( n + v ) f_1 \quad (5.2)$$

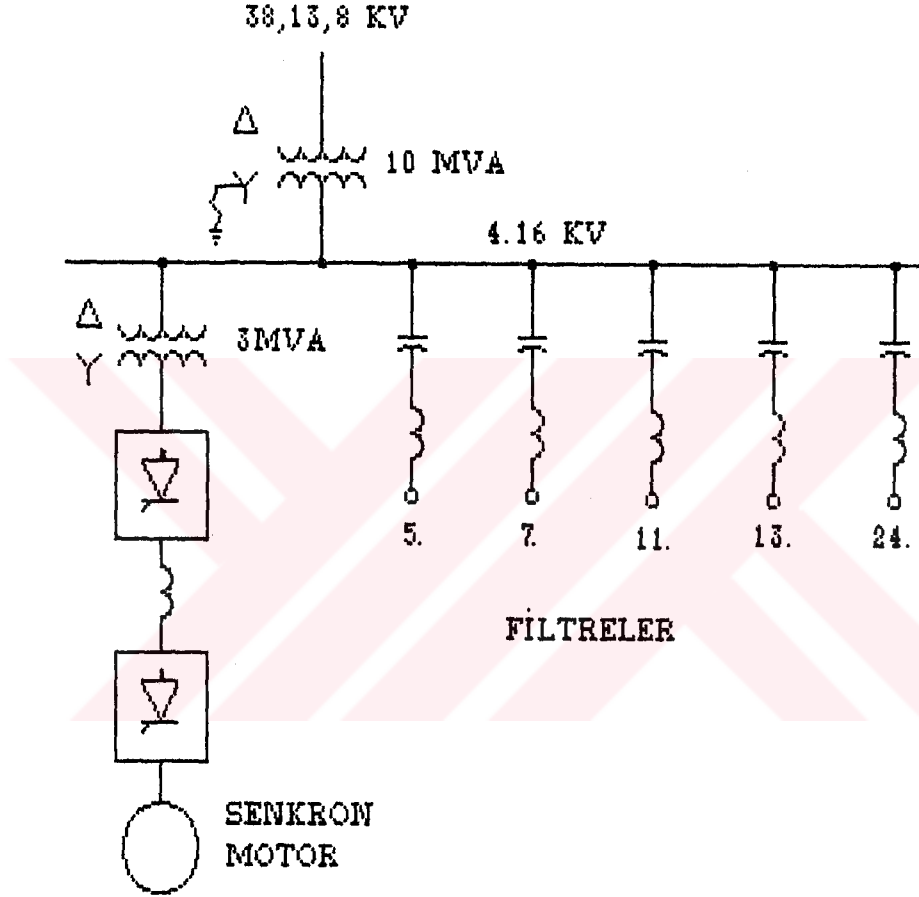
$v = n$  dereceli herhangi bir uzay harmoniği rotora göre hareketsiz olup , aynı dereceden rotor harmonikleri ile etkileşerek rotor ve stator temel MMK 'nin etkileşimine benzer bir şekilde bir senkron moment oluşturlar.

Örnek olarak , Şekil 5.1 'de verilen bir tek hat diyagramı düşünelim. Bu sistemde 4.16 kV 'luk baraya ayrı ayrı 5., 7., 11. ve 13. harmonik filtreler bağlanmıştır. Ayrıca sistemde , primeri üçgen , sekonderi yıldız bağlı 3000 kVA 'lık üç faz yalıtım transformatörü , 6 darbe hat dönüştürücü sistemi (doğrultucu) , reaktör , 6 darbe yük dönüştürücü sistemi (evirici) ve üç faz fırçasız senkron motor ( 3000 hp , 1000 V , 1800 d/dk , 4 kutup etiket değerlerine sahip ) mevcuttur. ( HANNA , 1989 )

Bu sistemde yapılan harmonik analiz sonucu , 5. , 7. , 11. ve 13. harmoniklerin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Rotor , katı kutup tipi olup , 80° 'lik sıcaklık artışı için dizayn edilmiştir. Motor komütasyon yapılmış bir evirici yükünden enerjilendiği zaman , ısınma problemi ortaya çıkmaktadır. Bu probleme çözüm getirebilmek için, katı kutup yerine yalıtılmış yeni bir rotor tipi düşünülmüştür. Harmoniklerin bu olumsuz etkilerinden kurtulmak için , aşağıda belirtilen önlemler alınmıştır.

- 1) Kutup yüzeyine amortisman çubuğu eklenmesi ,
- 2) Hava aralığınının 0.5 'den 0.35 'e düşürülmesi ,

- 3) Daha iyi ısı dağılımını sağlamak için , alan sargısının etkin dış yüzey alanının artırılması ,
- 4) Rotor yalıtımları ve alan sargıları için , F yalıtım sınıfı kullanılması ,



Şekil<sup>12</sup> 5.1. 3 Faz fırçasız senkron motora bağlanmış ,6 darbe sistemine sahip 2.3 MW 'lık ayarlanabilir tahrik sistemi için , basitleştirilmiş tek hat diyagramı

<sup>12</sup>

HANNA , R. A. , September/October 1989. Harmonics and Technical Barriers in Adjustable Speed Drives. IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 25 , no. 2, p. 894-900.

5) Soğutma fanlarını değiştirmek için , hava akımı dolaşımının düzeltilmesi ,

6) 5. , 7. , 11. , 13. ve 24. harmonikler için , ayrı ayrı filtreler kullanılmalıdır.

### 5.3 Taşıma Sistemlerinde Harmoniklerin Etkisi

Bir şebekede harmonik akımların akışı , iki ana etki meydana getirir. Bunlardan biri , akım dalga şeklinin artırılmış rms değerinin sebep olduğu ilave iletim kayıplarıdır. Örneğin , bu aşağıdaki ifade ile gösterilebilir.

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (5.3)$$

Burada  $I_n$  , n. harmonik akımını ,  $R_n$  ise harmonik frekansındaki sistem direncini gösterir.

Harmonik akım akışının ikinci etkisi , farklı devre empedansları geçişlerinde harmonik gerilim düşümlerinin yaratılmasıdır. Kablo ile taşıma durumunda , harmonik gerilimler , kendi tepe gerilimlerine oranla dielektrik gerilmeleri artırırılar. Bu etki , kablunun yararlı ömrünü kısalttığı gibi , arıza sayısındaki artışlara da neden olur ve bu yüzden onarım maliyetleri artar.

Korona başlangıcındaki ve sönme seviyelerindeki harmoniklerin etkileri , tepeden tepeye gerilimin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi , temel bileşen ve harmonikler arasındaki faz ilişkisine bağlıdır.

### 5.4 Kablolarda Harmoniklerin Etkisi

Kablolarda sinüs şeklinde olmayan bir akım akışı , deri olayı (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) durumlarına bağlı olarak dalga şeklinin efektif



değeri için tahmin edilenin üstünde ilave ısınmalara neden olacaktır. Söz konusu her iki olay , iletken boyutu ve aralığı kadar frekansın da bir fonksiyonu olarak değişirler.

Bu iki etkinin sonucu olarak , efektif alternatif akım direnci (  $R_{ac}$  ) , özellikle büyük iletkenler için , doğru akım direnci (  $R_{dc}$  ) üzerine çıkarılır. Harmonik olarak yüklenmiş bir akım dalga şekli , bir kabloda akıyorken, kablo için eşdeğer  $R_{ac}$  ,  $I^2R$  kaybının artması ile daha da yükselir. Dc dirence göre ac direnç oranı aşağıdaki ifade ile verilir. ( RICE , 1986 )

$$R_{ac} / R_{dc} = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} \quad (5.4)$$

Bu ifade de ,

$Y_{cs}$  = Deri olayına göre direnç bileşenini ,

$Y_{cp}$  = Yakınlık etkisine göre direnç bileşenini ,

gösterir. Deri olayı , alternatif akım taşıyan bir iletkende akım yoğunluğunun iletken yüzeyinde iletken merkezinden daha büyük olmasıdır. Magnetik akı , iletkenin her tarafında sabit yoğunlukta değildir. Fakat akım akışının artması ve endüktansın azalması ile dış yüzey yakınlarında azalmaya yönelir. Ac dalga şekillerinde eşit olmayan bir akım dağılımı vardır , bu nedenle kablonun efektif direnci , alternatif akım için doğru akımdan daha büyüktür. Deri olayına göre direnç bileşeni ,

$$Y_{cs} = f(x) \quad (5.5)$$

olarak tanımlanır.  $f(x)$  fonksiyonunun değeri , tablodan ( Bk. Tablo 5.3 ) belirlenir ,  $x$  faktörü ise aşağıdaki formülden bulunur. ( RICE , 1986 )

$$x = 0.027678 \sqrt{(f) (u) / R_{dc}} \quad (5.6)$$

Bu formülde ,

$f$  = frekans değerini ( Hz ) ,

$\mu$  = iletkenin magnetik geçirgenliğini , ( magnetik olmayan metallere için 1 'e eşittir. )

$R_{dc}$  = işletme sıcaklığındaki dc direnci belirtir.

Yakınlık etkisi , aynı kanalda olan çok iletkenli kablolar veya bitişik kablolarda meydana gelen akım sonucu oluşan , kablodaki magnetik akı bağlantısından yada çelik kablo borusu gibi bitişik magnetik etkilerde indüklenen akımlardan dolayı meydana gelir.

Yakınlık etkisine göre direnç bileşeni ise , aşağıdaki ifade ile verilir. ( RICE , 1986 )

$$Y_{CP} = f(x) \cdot d^2 \left[ \frac{1.18}{f(x) + 0.27} + 0.312 d^2 \right] \quad (5.7)$$

Burada ise ,

$f(x)$  = tablodan ( Bk. Tablo 5.3 ) bulunur.

$d$  = iletkenler arasındaki eksenel aralık ile bölünmüş iletken çapını gösterir.

Harmonik frekanslar için , direnç oranlarındaki etkilerin hesaplanmasında , hiç bir basit metot bilinmemektedir. Bu konuda, çeşitli yöntemler ortaya çıkarılmıştır.

Tablo<sup>13</sup> 5.3. Yekpare ve konsantrik bükülmüş yuvarlak iletkenler için deri olayı direnci

x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)
0.0	0.00000	2.0	0.07818	11.0	3.15100
0.1	0.00000	2.1	0.09375	12.0	3.50358
0.2	0.00001	2.2	0.11126	13.0	3.85831
0.3	0.00004	2.3	0.13069	14.0	4.20915
0.4	0.00013	2.4	0.15207	15.0	4.56205
0.5	0.00032	2.5	0.17538	20.0	6.32747
0.6	0.00067	2.6	0.20056	25.0	8.09412
0.7	0.00124	2.7	0.22753	30.0	9.88101
0.8	0.00212	2.8	0.25820	40.0	13.39545
0.9	0.00340	2.9	0.28644	50.0	16.93032
1.0	0.00519	3.0	0.31809	60.0	20.46541
1.1	0.00758	3.5	0.40202	80.0	27.53593
1.2	0.01071	4.0	0.57787	100.0	34.60666
1.3	0.01470	4.5	0.86275		
1.4	0.01988	5.0	1.04872		
1.5	0.02582	6.0	1.39359		
1.6	0.03323	7.0	1.74319		
1.7	0.04203	8.0	2.09445		
1.8	0.05240	9.0	2.44638		
1.9	0.06440	10.0	2.79857		

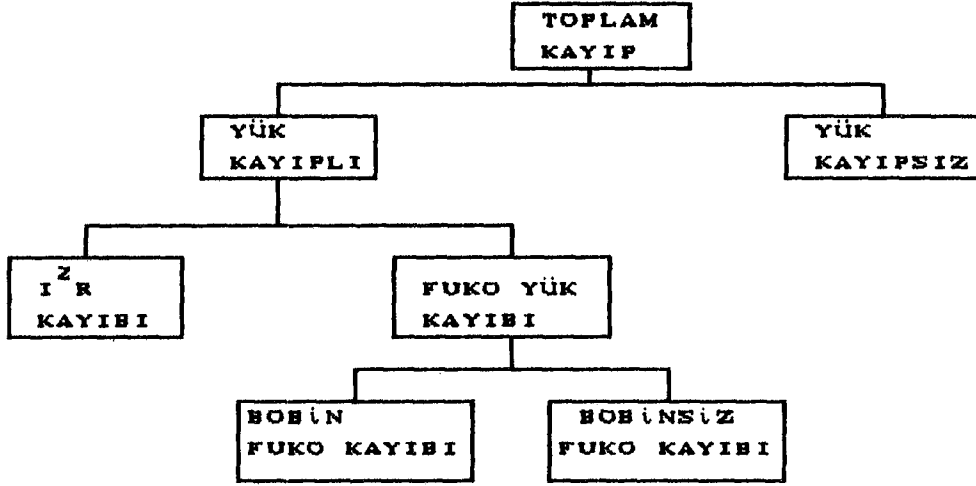
### 5.5 Transformatörlerde Harmoniklerin Etkisi

Harmonik gerilimler , transformatörlerde histeresiz ve fuko akım kayıpları ile yalıtım gerilmelerini artırırlar. Harmonik akımların akışı , bakır kayıplarını da artırır. Bu etki , dönüştürücü transformatörlerinde daha önemlidir. Transformatör toplam kayıplarını , yük kayıplı ve yük kayıpsız olarak ikiye ayrılabiliriz. Ayrıca yük kayıpları  $I^2R$  ( bobin kayıpları ) ve kaçak kayıplar şeklinde iki grupta toplanabilirler. Kaçak kayıplar bobinlerdeki kaçak elektromagnetik akı , çekirdek bağlantıları magnetik siperler, ana tank ve transformatörün diğer yapısal parçalarından dolayı oluşan fuko akım kayıplarıdır.

<sup>13</sup>

RICE ,D.E. , January/February 1986 . Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics -Their Effect on Power Systems Components. IEEE Transactions on Industry Applications , vol.IA-22 , no.1 , p.161-177 .

Şekil 5.2 'de toplam transformatör kayıp bileşenleri gösterilir.



Şekil 5.2. Toplam transformatör kayıp bileşenleri

Güç transformatörlerine bağlı önemli bir etkide , üçgen sargılarda için katı olan sıfır sequence akımlarının dönmesidir. Ekstra dönen akımlar , dizayn esnasında hesaba katılmazsa sargıları aşırı yükleyebilir.

Diğer önemli bir etki , simetrik olmayan bir yükü besleyen bir transformatör içindir. Yük akımı bir dc bileşen içerirse , transformatör magnetik devresinin doyuma ulaşması sonucu , ac uyarma akımının tüm harmonik bileşenlerinin seviyesi oldukça artabilir.

## 5.6 Rezonanslar

### 5.6.1 Genel tanıtım

Bir güç sisteminde , işletim esnasında harmoniklerin etkisinin iki analitik amacı vardır : Bunlardan biri harmonik rezonans meydana gelmesindeki olasılığın incelenmesi , diğeri ise çeşitli anahtarlama ve yük koşulları altında sistem harmonik gerilimleri ve akımlarının tam genliklerinin belirlenmesidir. Amaç , genelde

birinciyi önlemek , ikinciyi mümkün olduğu kadar azaltmaktır.

Güç sisteminde kapasitörlerin uygulanması , bir harmonik rezonans koşulu sağlamaktadır. Bir kapasitör grubunun kapasitif reaktansı doğrudan doğruya frekans ile azalacak endüktif reaktansı ise frekans ile artacaktır. Herhangi bir LC devresinin rezonans frekansında endüktif reaktans, kapasitif reaktansa eşit olur. Güç faktörünü düzeltmek için kapasitörlerden yararlanılan elektriki sistemlerde, hem seri hem de paralel rezonans veya ikisinin bileşimi meydana gelebilir. Seri devre durumunda rezonans frekansındaki toplam empedans , sadece sistemin dirençli bileşenini azaltır. Bu bileşen küçük ise , yüksek akım genlikleri kullanılan frekanslarda olacaktır. Paralel devre durumunda , rezonans frekansındaki toplam empedans çok yüksektir. Bu durumda rezonans frekansında aynı seviyede küçük bir kaynaktan uyarıldığı zaman , paralel kapasitör ve endüktör arasında yüksek dairesel bir akım akacaktır. Paralel birleştirme geçişlerinde gerilim oldukça yüksek olabilir.

Sonuç olarak , bu her iki devreye ait rezonans noktası sistemdeki harmonik kaynaklar tarafından üretilen frekanslardan birinin yakınında oluşursa , aşırı miktarda harmonik akım akacak ve aşırı harmonik gerilimler oluşacaktır.

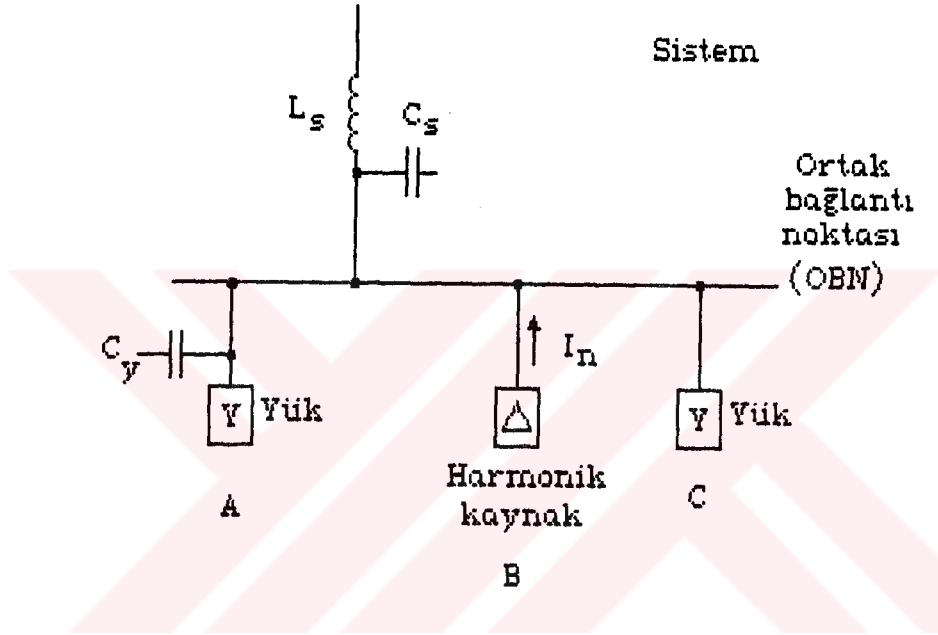
Tüm bu anlatılanları göz önüne alarak , ayrı ayrı paralel ve seri rezonansları tanımlayalım.

#### 5.6.2 Paralel rezonans

Paralel rezonans , rezonans frekansındaki harmonik kaynağı gösteren yüksek bir empedansda meydana gelir. Harmonik kaynakların çoğu akım kaynakları olarak düşünüldüğü için , bu paralel empedansın her bir koldaki yüksek akımlar ve artmış harmonik gerilimler ile

sonuçlanır.

Paralel rezonans , bir çok şekilde meydana gelebilir , en basit olarak bir kapasitör ile harmonik kaynak aynı baraya bağlantılı olursa , bir paralel rezonans oluşabilir. Şekil 5.3 'de ortak bağlantı noktasındaki paralel rezonans gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Ortak bağlantı noktasındaki paralel rezonans

Kaynağın tamamıyla endüktif olduğu kabul edilerek , rezonans frekansı aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$f_p = f \sqrt{\left(\frac{S_k}{S_c}\right)} \quad (5.8)$$

Burada  $f$  (Hz) temel bileşen ,  $f_p$  (Hz) ise paralel rezonans frekansıdır.  $S_k$  (VAr) kaynağın kısa devre gücünü,  $S_c$  (VAr) ise kapasitör gücünü belirtir.

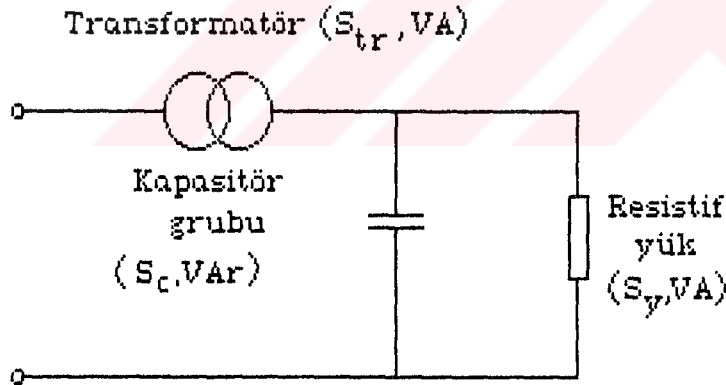
Bundan sonra paralel rezonans olasılığı , sistem hesaba katıldığı zaman ortaya çıkabilir.

Şekil 5.3 'de B alıcısından gelen harmonik akım , barada yüksek bir harmonik empedansla karşılaşır. Bu , sistem endüktansı (  $L_s$  ) veya sistem kapasitansı (  $C_s$  ) yada yük kapasitansı (  $C_y$  ) arasındaki rezonansdan dolayı olabilir.

Var olan rezonans koşullarını belirlemek için , baradaki harmonik gerilim ile birlikte her bir kaynak , alıcı ve yükteki harmonik akımları ölçmek gereklidir. Baradan güç sistemi içine akan akım , gerilim yüksek değerde iken küçük olursa , güç sistemi içindeki rezonans belirtilebilir.

### 5.6.3 Seri rezonans

Daha yüksek frekanslarda Şekil 5.4 'de verilen sistem dikkate alındığı zaman , kapasitif empedans azalırken yük önemsenmeyebilir.



Şekil 5.4. Seri rezonans devresi

Bu koşullar altında , denklem ( 5.9 ) 'daki eşitlik sağlandığı zaman , bir rezonans koşulu ortaya çıkacaktır.

$$f_{seri} = f \sqrt{\left[ \frac{S_{tr}}{S_c Z_{tr}} - \frac{S_y^Z}{S_c^Z} \right]} \quad (5.9)$$

Burada  $f_{\text{seri}}$  ( Hz ) bir seri rezonans frekansını ,  $S_{tr}$  transformatör gücünü ,  $Z_{tr}$  transformatörün pu empedansını ,  $S_y$  ise yük nominal değerini ( dirençli ) gösterir.

Seri rezonansda , küçük harmonik gerilimlere bağlı olarak yüksek kapasitör akımları akabilir. Akacak olan gerçek akım devrenin kalite faktörü  $Q$  ' ya bağlı olacaktır. Bu değer 500 Hz ' de tipik olarak 5 'e eşittir.

#### 5.6.4 Sistem davranışındaki rezonansın etkileri

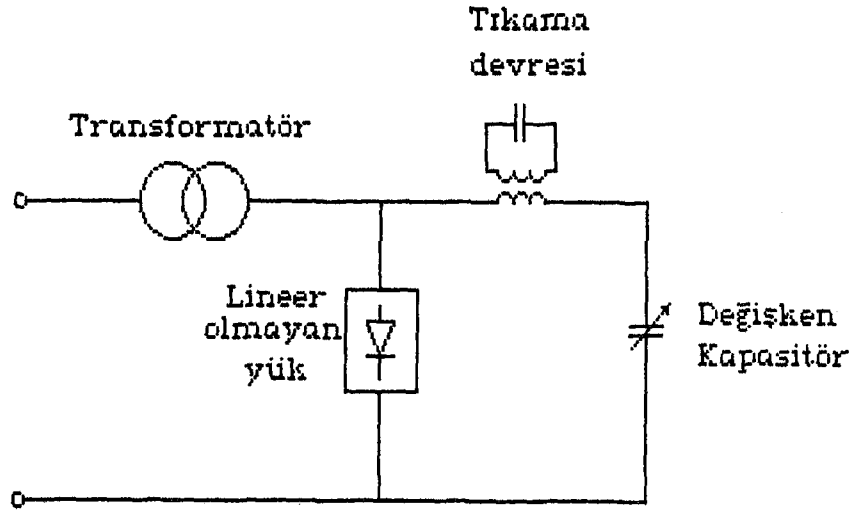
Rezonanslar , kapasitörlere ve özellikle güç faktörü düzeltme kapasitörlerine bağlı olarak düşünülmüştür. Bu kapasitörler , aşırı yük akım kabiliyetinin değişen seviyelerini gösteren standartlara göre yapılır. Tipik olarak aşırı yük kabiliyeti , % 15 ' den (UK) başlayarak , % 30 ile ( Avustralya ve Avrupa ) % 80 'e kadar (USA) olan yüksek değerler arasında değişir.

Rezonans etkilerinin neden olabileceği hataları engellemek için , dalgalılık kontrolü yapılır. Bu tip sistemlerde ayarlanmış tıkaçlar (filtreler) , güç faktörü düzeltme kapasitörleri , düşük empedans elemanlarında absorbe edilmiş olan sinyalleme frekansını engellemek için kullanılır. Tipik bir örnek , Şekil 5.5 ' de verilmektedir.

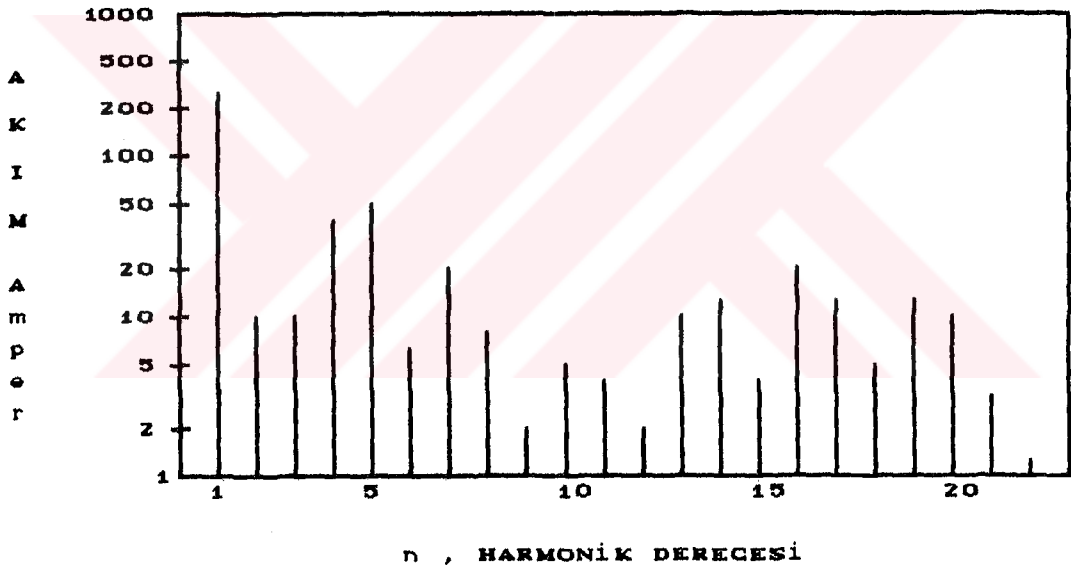
O bölgede rezonans oluşur ve aşırı harmonik akımlar akabilir , ayar kapasitörleri zarar görebilir.

Şekil 5.6 ' da ise bu tip bir sistemde kaydedilmiş olan harmonik akımlar gösterilmektedir.





Şekil 5.5. Dalgalılık kontrol sinyali için ayarlanmış durdurucu devre



Şekil 5.6. Bir tıkama devresi içinde ölçülmüş harmonik akımlar

### 5.7 Kapasitör Gruplarında Harmoniklerin Etkisi

Elektrik tesislerinde , reaktif güç kompanzasyonu amacı için , tüketicilerin bağlı oldukları baralara kondansatörler paralel bağlanırlar. Eğer bu baraya harmonik üreten lineer olmayan yükler de bağlı ise , bu durumda kondansatörler harmonikli gerilimler tarafından beslenirler ve aşırı akım çekerler.

Kondansatörlerin kapasitif dirençleri , bobinlerdeki reaktansların aksine daha küçük değerlere sahiptirler. Bundan dolayı , kondansatör akımındaki harmoniklerin genlikleri , kondansatöre uygulanan gerilim genliklerinden büyük olur. Harmonikli bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımın rms değeri , harmonikli gerilimin rms değerine eşit sinüs biçimindeki bir gerilim altında çektiği akımdan büyük olur. Kompanzasyon tesislerinin tasarımında bu durumların gözönüne alınması gereklidir.

Kapasitör karakteristikleri ile ilgili standartlar , sinüs biçiminde olmayan bir dalga şekli ortamında uygulanırken, güvenilir bir servis istenilirse ,aşılmaması gerekli olan sınırlamaları içerirler. Bunlar , kapasitörün nominal reaktif güç kapasitesi , nominal uç gerilimi ve nominal rms akımıdır. Kapasitörler için kabul edilen standartlar , nominal reaktif gücün % 135'inde sürekli çalışma için uygundur. Bu tolerans aşağıdaki ifadelerde gereklidir.

1) Kapasitör ucunda bastırılmış olan harmonik gerilimlerin yol açtığı reaktif gücün ilavesi için ,

2) Etiket oranındaki aşırı temel bileşen geriliminin yol açtığı reaktif gücün ilavesi için ( Fakat standartlar tarafından % 10 içinde sürekli maksimum aşırı gerilime izin verilmiştir . ) ;

3) Üretim toleransının neden olduğu aşırı kapasitans reaktif güç ilavesi için . ( Standartlar , % 0 - 15 kapasitans üretim toleransına müsaade ederler )

Bu toleranslar sonucu ilave bir reaktif güç gelir , bu özelleştirilmiş % 35 sınırını aşmamalıdır. Örneğin , kapasitörün % 10 'luk temel bileşen aşırı gerilim kabiliyeti tutulmak istenilirse bu , kapasitörün % 35'lik aşırı güç kabiliyetinin % 21 ' ini içine çekecektir. % 10 ' luk tipik kapasitans üretim toleransı , hesaba

katıldığında , bu durumda güç sistem harmoniklerini dikkate almak için % 4 kalır.

Reaktif güç sınırlaması pu olarak aşağıda verilen denk - lem ile ifade edilir. ( RICE , 1986 )

$$kVar_T (pu) \leq 1.35 = \sum_{n=1}^{n_{max}} ( I_n^2 (pu) / n ) \quad (5.10)$$

Burada ,

$kvar_T (pu)$  = pu olarak toplam reaktif gücü ,

$I_n$  = nominal kapasitör akımındaki ( pu ) kapa - sitör içindeki temel bileşen veya harmonik akımı ,

$n$  = harmonik derecesini belirtir.

Şekil 5.7 'de kondansatör gücü olarak verilen % 135 sınır değerini aşmadan , çeşitli harmonik derecelerinde gerilime bağlı olarak akımın aldığı değerler grafik halinde verilmektedir.

Bu grafik incelendiğinde , akımın müsaade edilen rms değeri , gerilim artıkça düşmektedir. Ayrıca yüksek de - receli bir harmonik mevcut ise , kapasitif güç bakımın - dan daha büyük akımlara izin verilir. Bunun için TS 804 , % 130 gibi bir sınır değer tespit etmiştir. Bu demektir ki : Nominal gerilim altında kondansatör akımı , nominal akımın 1.3 katını aşmadığı sürece , kondansatör akım harmonikleri ile aşırı yüklenmiş olmaz.

İkinci kapasitör güç sınırlaması , gerilime bağlıdır. Standart , hem rms gerilimi hem de tepe gerilimi olarak belirtilir. Toplam rms uç gerilimi , % 10 ' u aşmayacak şekilde aşağıdaki denklem ile hesaplanır. ( RICE , 1986 )

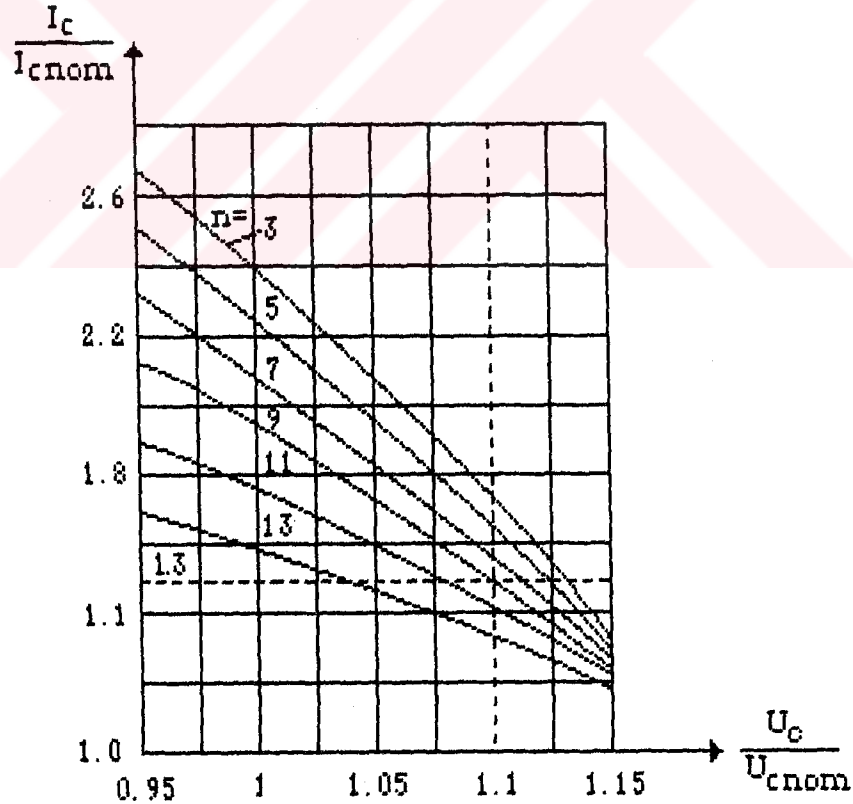
$$V_T \text{ (pu)} \leq 1.10 = \left[ \sum_{n=1}^{n_{\max}} V_n^2 \text{ (pu)} \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

Bu denklemde ,

$V_T \text{ (pu)}$  = toplam pu rms uç gerilimini ,

$V_n \text{ (pu)}$  = temel bileşen veya harmonik (pu) rms gerilimini gösterir.

rms gerilim değerlendirmesi , tepeden tepeye gerilimin fonksiyonu olan kapasite ömründeki korona etkisini hesaba katmaz. Standartlara göre , bu nominal rms gerilimi ile  $1.2 \sqrt{2}$  değerinin çarpılması şeklinde , tepeden tepeye gerilimdeki bir sınırlama ile belirlenerek tanımlanır.



Şekil 5.7. %135 'lik sınır değeri aşılmadan , çeşitli harmonik derecelerinde akımın gerilime bağlı olarak değişimi

Toplam pu tepe uç gerilimi aşağıdaki denklem ile gösterilir. ( RICE , 1986 )

$$V_{TP} (pu) \leq 1.2 \sqrt{2} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n_{max}} V_n (pu) \quad (5.12)$$

Bu denklemde ise ,

$V_{TP} (pu)$  = toplam pu tepe uç gerilimini ,

$V_n (pu)$  = pu harmonik ve temel bileşen rms gerilimini gösterir.

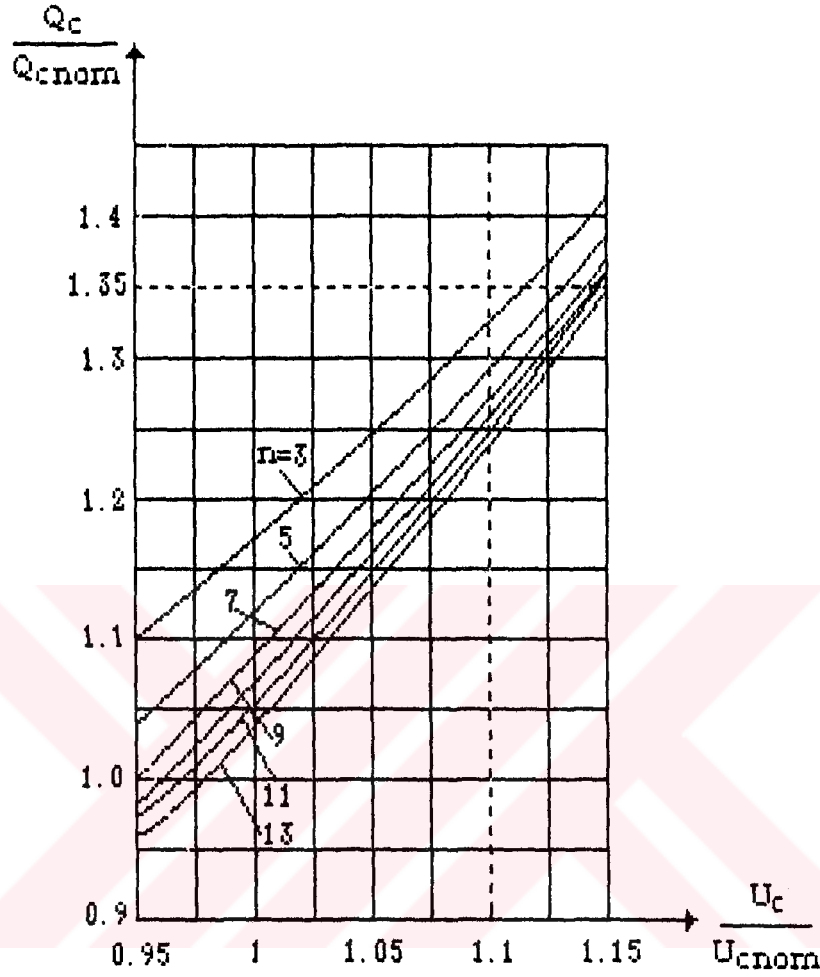
Bu metot , baskın harmonik ve temel bileşen arasındaki faz açılarında oluşan farklılıklardan meydana gelen harmonik gerilim genliklerinin aynı dağılımında oluşabilecek , çok farklı dalga şekilleri ve tepe gerilimlerini tanımlamaktadır. Uygulanan bir gerilimde kondatörün ömründe kısa devreye neden olacak olan her artış ve normal temel bileşen gerilim dalgalanmaları için , izin verilen rms toleransının % 10 olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 5.8 'de ise , kondansatörün çektiği akım , % 130 sınır değerini aşmadan , çeşitli harmonik derecelerinde gerilime bağlı olarak gücün aldığı değerleri grafik halinde vermektedir.

Akım ve gerilimin rms değerinde kondansatörün verdiği güç , harmoniklerin derecesine ancak düşük bir ölçüde bağlıdır. Fakat gerilimin karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Kondansatör akımının ve geriliminin belirli sınırlarda tutulması , harmonikli gerilimlerde kondansatörlerin aşırı yüklenmesini önler.

Bilindiği gibi , kapasitörler arasındaki seri ve paralel rezonanslar ile sistemin diğer bölümleri , aşırı gerilimlere neden olurlar ve bunun sonucu olarak oluşan yüksek

akımlar kayıpları artırırılar , kapasitörlerde aşırı ısınma ve zarara neden olurlar.



Şekil 5.8. Kondansatör akımının % 130 'luk sınır değerini aşmadan , çeşitli harmonik derecelerinde kondansatör gücünün gerilime bağlı değişimi

### 5.8 Güç Ölçümünde Harmoniklerin Etkileri

Üç faz güç ölçümünde harmoniklerin etkilerini incelemek için , bu harmoniklerin etkilerinin analizi yapılmıştır. Hem gerilim hem de akım dalga şeklinde oluşan harmoniklerini inceleyelim.

Gerilim dalga şeklini denklem ( 5.13 ) 'de görüldüğü gibi ifade edebiliriz.

$$v = \sum V_n \cdot \sin ( n\omega t + \theta_n ) \quad (5.13)$$

Bu ifadede ,

$V_n$  = harmonik gerilim genliğini ,  
 $n$  = harmonik derecesini ,  
 $\theta_n$  = harmonik faz açısını belirtir.

Akım dalga şeklini de , aşağıdaki denklem ile gösterebiliriz.

$$i = \sum I_n \cdot \sin ( n\omega t + \phi_n ) \quad (5.14)$$

Yine benzer şekilde burada da,

$I_n$  = harmonik akımın genliğini ,  
 $n$  = harmonik derecesini ,  
 $\phi_n$  = harmonik faz açısını gösterir.

Böylece gerçek güç ,

$$\frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt = \frac{v}{2\pi} \int_0^{2\pi/v} e ( \omega t ) \cdot i ( \omega t ) \cdot dt \quad (5.15)$$

denklem (5.15) ' e eşit olur.  $n \neq m$  için ,

$$\int_0^{2\pi} \sin ( mt ) \cdot \sin ( nt ) \cdot dt = 0 \quad (5.16)$$

denklem (5.15) elde edilir. Tüm  $n$  ve  $m$  değerleri için ise ,

$$\int_0^{2\pi} \sin ( nt ) \cdot \cos ( nt ) \cdot dt = 0 \quad (5.17)$$

yukarıdaki denklem verilir.

Böylece harmoniklerin var olması halindeki gerçek güç, her bir harmonik ve temel bileşen için gerçek güçlerin toplamı şeklinde olacaktır.

Sadece temel bileşenden meydana gelen , bir gerilim dalga şeklinin olduğu özel bir durumu düşünelim. Yük akımı çeşitli harmoniklerden meydana gelirse , gerçek gücü aşağıdaki denklem ile ifade edebiliriz.

$$(w/2\pi) \int_0^{2\pi/w} E_1 \cdot \sin wt \sum I_n \cdot \sin (nwt + \theta_n) \cdot dt \quad (5.18)$$

Tüm harmonik terimler sifıra eşittir.  $\theta_1$  , gerilime göre akımın faz açısı ise , bu durumda gerçek güç ,

$$w/2\pi) \int_0^{2\pi/w} (E_1 \cdot \sin wt) \cdot I_1 \cdot (\sin nwt \cdot \cos \theta_1 + \cos wt \cdot \sin \theta_1) \cdot dt \quad (5.19)$$

olur. Daha önce belirlendiği gibi ,

$$\int_0^{2\pi/w} I_1 (\sin wt \cdot \cos wt \cdot \sin \theta_1) \cdot dt = 0 \quad (5.20)$$

olduğundan , gerçek güç denklem (5.21) ile verilir.

$$\text{Gerçek güç} = E_{\text{rms temel bl.}} \cdot I_{\text{rms temel bl.}} \cdot \cos(\theta_1)$$

(5.21)

Mikroişlemci teknolojisi ve hızlı analog /dijital dönüştürücüleri ile devir üzerindeki çeşitli zamanlardaki faz akım ve gerilimlerinin genliklerini ölçmek mümkündür. Her bir ölçüm örnek olarak , örnekler arasındaki ölçüm ise örnekleme aralığı olarak tanımlanır. Örneğin ne kadar sık olacağı , giriş dalga şeklindeki mevcut harmoniklerin sayısı ile belirlenir. Örnekleme frekansı,



giriş sinyalinin en yüksek frekansından iki kez daha yüksek olmak zorundadır.

Örnekler bir kez alındığında , bunların birlikte çoğaltılması ve belirtilecek olan zaman aralıklarındaki gerçek güce eklenmesi gerekir.

Gerilim ve akım arasındaki sıfır geçiş açısının kosinüsü ile rms gerilim ve akımının çarpılması sonucu elde edilen gerçek güç değeri , sistemde harmonikler mevcut olmadığı hallerde doğru , aksi durumda hatalı sonuçlar verebilir.

Güç ölçümündeki farklılıkları dikkate alan , bir matematiksel simülasyon araştırmasında , dört durum simüle edilmiş ve tablolar halinde ( Bk. Tablo 5.4 ve 5.5) gösterilmiştir. Sıfır geçiş tekniği , gerçek güç ölçümü ile karşılaştırılmış , yük akımı 11. dereceye kadar olan harmonikleri içerdiği halde , gerilim dalga şeklinin sadece temel bileşenden meydana geldiği kabul edilmiştir. Tablolardan da anlaşılacağı gibi , hata analizi sırasında harmoniklerin faz açısı , bu teknikteki net hatadaki en büyük duyarlılığa sahiptir.

Yük dalga şeklindeki harmonikler , güç ölçümünü önemli bir şekilde etkilerler. Bazı durumlarda harmoniklerin miktarlarının , kWh ve güç faktörü ile ilişkisinin bilinmesi gerekir. Güç ölçümünde sayısal mikroişlemci tekniğinin kullanılması , güç ölçümünün çok hassas bir şekilde yapılmasına olanak sağlar. Bu nedenle , güç dağıtım sistemlerince sağlanan , kWh ve gerçek gücün hesaplanması veya zayıf güç faktörü sorunlarının çözülmesi , örnek veri tekniklerinin kullanımı ile mümkün olmaktadır.

Tablo<sup>14</sup> 5.4. Test durumundaki harmonikler

DURUM	5	7	11	HATA
I	0.175	0.026	0.026	30 derecede % 11.98
II	0.110	0.016	0.016	30 derecede % 5.97
III	0.045	0.045	0.007	30 derecede % 2.37
IV	0.007	0.029	0.004	30 derecede % 4.83

Tablo<sup>14</sup> 5.5. Simülasyon çalışması sonuçları

DURUM I		
<u>GERİLİM</u>		
Temel Bileşen :	1	FAZ AÇISI:0°
<u>AKIM</u>		
Temel Bileşen :	1.000	FAZ AÇISI:30°
5. Har. Bileşen :	0.175	FAZ AÇISI:15°
7. Har. Bileşen :	0.026	FAZ AÇISI:30°
11. Har. Bileşen :	0.026	FAZ AÇISI:15°
DOĞRU GERÇEK GÜÇ = 0.866025		
$V_{rms} * I_{rms} * \cos(\Theta) = 0.969741$		
% HATA = % 11.98		
DURUM II		
<u>GERİLİM</u>		
Temel Bileşen :	1	FAZ AÇISI:0°
<u>AKIM</u>		
Temel Bileşen :	1.000	FAZ AÇISI:30°
5. Har. Bileşen :	0.110	FAZ AÇISI:15°
7. Har. Bileşen :	0.016	FAZ AÇISI:30°
11. Har. Bileşen :	0.016	FAZ AÇISI:15°
DOĞRU GERÇEK GÜÇ = 0.866025		
$V_{rms} * I_{rms} * \cos(\Theta) = 0.917738$		
% HATA = % 5.97		

Tablo<sup>14</sup> 5.5. (Devam) Simülasyon çalışması sonuçları

DURUM III		
<u>GERİLİM</u>		
Temel Bileşen :	1	FAZ AÇISI:0°
<u>AKIM</u>		
Temel Bileşen :	1.000	FAZ AÇISI:30°
5. Har. Bileşen :	0.045	FAZ AÇISI:15°
7. Har. Bileşen :	0.045	FAZ AÇISI:30°
11. Har. Bileşen :	0.007	FAZ AÇISI:15°
DOĞRU GERÇEK GÜÇ = 0.866025		
$V_{rms} * I_{rms} * \cos(\theta) = 0.886566$		
% HATA = % 2.37		
DURUM IV		
<u>GERİLİM</u>		
Temel Bileşen :	1	FAZ AÇISI:0°
<u>AKIM</u>		
Temel Bileşen :	1.000	FAZ AÇISI:30°
5. Har. Bileşen :	0.029	FAZ AÇISI:15°
7. Har. Bileşen :	0.029	FAZ AÇISI:30°
11. Har. Bileşen :	0.004	FAZ AÇISI:15°
DOĞRU GERÇEK GÜÇ = 0.866025		
$V_{rms} * I_{rms} * \cos(\theta) = 0.907846$		
% HATA = % 4.83		

14

PURKAYASTHA , I. and SAVOIE , P. J. , September/October 1990. Effect of Harmonics on Power Measurement . IEEE Transactions on Industry Applications , vol. IA-22, no.1, p. 161-177.

## 5.9 Haberleşme Sistemleri Üzerinde Harmoniklerin Etkileri

Haberleşme devreleri ve elektriki güç sistemleri arasındaki magnetik ( veya elektrostatik ) bağlantı , haberleşme parazitlerine neden olabilir. Güç devresindeki akım akışı , haberleşme devresi yakınındaki iletkenlerde bir akım veya gerilim endükleyecek olan bir magnetik ( veya statik ) alan üretebilir. Parazitlerin miktarı, magnetik bağlantının verimine , frekansına , endüklenen akımın veya gerilimin genliğine bağlı olacaktır. Diğer haberleşme parazitlerini aşağıdaki şekilde genel olarak sıralayabiliriz.

- 1) Endüklenen hat gürültüsü ,
- 2) Güç hat taşıyıcı sistemli parazitler ,
- 3) Röle arızaları şeklindedir.

## 5.10 Güç Elektronik Düzenekli Donanımlar Üzerinde Harmoniklerin Etkileri

Eğer donanım sıfır geçişlerine duyarlı ise , harmonikler güç elektroniği cihazlarının düzensiz çalışmasına neden olurlar.

Bir rezonans koşulu , her yarı devirde birden fazla sıfır geçişlerine sahip bir akım dalga şekli için meydana gelebilir. Güç elektronik cihazlarından doğan problemler, ayrıca gerilimin tepe değerlerine karşılık vererek çalışan donanımlardan dolayı çoğalabilirler. Buna en güzel örnek diyottur.

Bu tip cihazlarda , çalışma ortamı kullanıcı kolaylığı açısından çoğunlukla rms ' ye göre verilir. Cihaz, harmonikler karşısında düzgün çalışmayabilir , çünkü doğrudan doğruya dalga şeklinin rms değerine karşılık

gelmeyen bir tepe değerini hissetmektedir. Gücü elektro-  
nigi cihazlarına ait diğer arızaları ise aşağıdaki  
şekilde verebiliriz.

- 1) lme donanımındaki hatalar ,
- 2) Röleler ve kesicilerde oluşan arızalar ,
- 3) Ateşleme devrelerinin sıfır gerilim geçişlerinin  
kararsız alışması ,
- 4) Motor kontrollü parazitler şeklindedir.



## BÖLÜM 6

### MODELLEME VE SİMÜLASYON

#### 6.1 Giriş

Harmonikleri tesbit etmek ve hesaplamak için , harmoniğe neden olan lineer olmayan yüklerin , güç elektroniği anahtarlama cihazlarının modellenmesi gereklidir. Ayrıca güç sistemine bağlı olan şebeke bileşenleri de herhangi bir harmonik akım aktığı zaman , karakteristik değerleri de dikkate alınarak modellenmelidir.

Frekans domeni ve zaman domeni modellemesi , harmonik simülasyon çalışmalarında kullanılan en önemli iki yöntemdir. Lineer olmayan , zamanla değişen yüklerin ayrıntılı modellemesini yapmak için , yükleri zaman domenindeki analiz teknikleri ile modellemek gereklidir. Harmonik akım genliklerini , faz açılarını ve faz spektrumunu belirlemek için de FFT hesaplama algoritmaları uygulanır. Frekans domenindeki harmonik çalışmaları , bileşenlerin temel bileşen frekansının bir fonksiyonu olarak modellenmesini ve bileşen karakteristiklerindeki değişimlerin harmonik derecelere bağlı olmasını gerektirir.

Dengeli şebekelerde tek faz modelleme , simetrik olmayan şebekelerde ise üç faz modelleme kullanılır.

Tam bir harmonik modelleme için , olması gereken şartları aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

1) Taşıma hatları , duran dalga olayı ve deri olayı koşulları ile temsil edilmek zorundadırlar.

2) Yük , transformatör , generatör , şönt kapasite ve filtre modellerini içerecek şekilde düşünülmelidir.

3) Herhangi bir baradaki sistem empedansı hesaplanabilmelidir.

4) Düğüm admitans matrisleri frekansların herhangi bir aralığı için oluşturulmalı ve temel bileşenin harmonik katsayıları için sınırlandırılmamalıdır.

5) Sistemdeki çok katlı bölgelerde akım girişlerinin mümkün olabilirligi düşünölmek zorundadır.

6) Şebeke ( pasif ve lineer farzedilmiş ) tüm frekanslar için , bütün düğüm noktalarındaki sistem gerilimlerini elde etmek için çözülebilmelidir.

7) Hat akım akışları , her frekansda hesaplanmalıdır.

8) Çıkış verisinin açıklamayı kolaylaştırmak için çizilmiş olması gerekir.

Tüm bu şartlar göz önüne alınarak , harmonik üreten kaynaklarda zaman domeni veya frekans domeni modellemesi için , bir hesaplama metodu olan  $Y_{bara}$  matris yöntemi kullanılır. Bu matris yaklaşımı için , bileşenlerin empedans değerleri , admitans değerlerine dönüştürölür. Simetrik güç sistem işletiminde , dengeli bir tek faz hat diyagramı şebeke bileşenlerinin tüm admitans değerlerinin pozitif sequencedeki temsili kullanılarak modellenir. Fakat dengesiz işletimlerde , pozitif , negatif ve sıfır sequence bileşenlerinin tümü kullanılır.

Bu modellerin algoritmaları ve oluşumlarını ayrı ayrı incelenmeden önce , bileşen modellerinin harmonik model

karşılıkları Tablo 6.1 ' de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Frekansa bağlı bileşen modelleri

BİLEŞENLER	HARMONİK MODEL ŞEKLİNDEKİ GÖSTERİM
DİRENÇLER	$R + R_n$ 
ENDÜKTÖRLER	$n X_{end}$ 
KAPASİTÖRLER	$n Y_{cap}$ 
TRANSFORMATÖRLER ( DOYMA OLUŞUR )	$X_{tr}$ 
TRANSFORMATÖRLER ( SERİ MODEL )	$n X_{tr}$ 
MOTORLAR	$n X_{motor}$ 
TAŞIMA HATLARI	$R_{hat}$ $n X_{hat}$ $n Y_{\text{gnt}}/z$ $n Y_{\text{gnt}}/z$ 

Tablo 6.2 ' de ise parametrelerin temel bileşen ve harmonik karşılıkları verilmektedir.

## 6.2 $Y_{bara}$ Matrisinin Oluşumu

Bilindiği gibi  $Y_{bara}$  matrisi , admitans değerlerine göre



yazılır. Bu matris , kompleks ve simetriktir. Ayrıca matris sıfırlı birçok bileşen içerdiği takdirde , seyrek olur ve seyreklik yüzdesi matris boyutu ile artar.

Tablo 6.2. Parametrelerin frekans modelinde gösterilişi

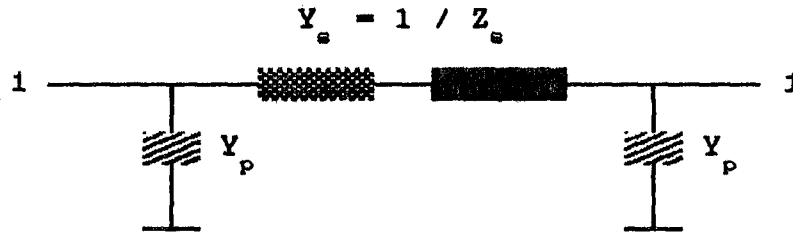
Parametre	Temel bileşen (Baz)	Harmonik
$\omega$	$2\pi f$	—
$\omega_n$	$2\pi f$	$n\omega$
$X_{end}$	$\omega L_{end}$	$n X_{end}$
$Y_{end}$	$(X_{end})^{-1}$	$(n X_{end})^{-1}$
$X_{motor}$	$\omega L_{motor}$	$n X_{motor}$
$Y_{motor}$	$(X_{motor})^{-1}$	$(n X_{motor})^{-1}$
$X_{tr}$	$\omega L_{tr}$	$n X_{tr}$
$Y_{tr}$	$(X_{tr})^{-1}$	$(n X_{tr})^{-1}$
$X_{hat}$	$\omega L_{hat}$	$n X_{hat}$
$Y_{hat}$	$(X_{hat})^{-1}$	$(n X_{hat})^{-1}$
$X_{kap.}$	$(\omega C_{kap.})^{-1}$	$(n \omega C_{kap.})^{-1}$
$Y_{kap.}$	$\omega C_{kap.}$	$n Y_{kap.}$
$Y_{\phi\ddot{u}nt}$	$\omega C_{hat}$	$n Y_{\phi\ddot{u}nt}$
$X_f$	$\left[ \omega L_f - \frac{1}{\omega C_f} \right]$	$\left[ n\omega L_f - \frac{1}{n\omega C_f} \right]$
$Y_f$	$(X_f)^{-1}$	$\frac{n\omega C_f}{n^2\omega^2 L_f C_f - 1}$

$Y_{bara}$  admitans matrisinde ;

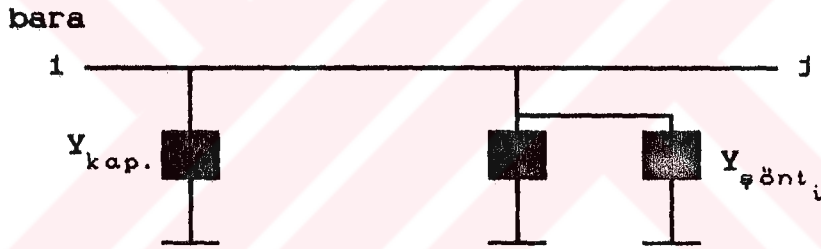
$Y_{ii}$  :  $Y_{bara}$  matrisinin diagonal girişleridir. Bu girişler , i nolu baradaki referans ile paralel bağlı olan taşıma hatlarının admitanslarının toplamı ile bulunur.

$Y_{ij}$  : Diagonal dışı girişlerdir, bunlar i ve j baraları arasındaki admitansların negatifine eşittir. i ve j baraları arasında hat olmadığı takdirde, bu terim sifıra eşit olacaktır.

Şekil 6.1 'de taşıma hattının eşdeğer devre modeli, Şekil 6.2 'de ise baralar ile olan paralel bağlantılar için, eşdeğer devre modelleri verilmiştir.



Şekil 6.1. Taşıma hatları için eşdeğer devre modeli



Şekil 6.2. Baralar ile olan paralel bağlantılar için eşdeğer devre modelleri

Dengeli durum modellenmesinde bara admitans matrisi, yalnızca şebekenin pozitif sequence bileşenlerinden meydana gelir. + indisi, pozitif sequence, - indisi negatif sequence ve 0 indisi ise sıfır sequence bileşenlerini gösterir. Buna göre dengeli durum için,  $Y_{\text{bara}}$  matrisi aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\left[ Y_{+bara} \right] = \begin{bmatrix} y_{+11} & y_{+12} & \dots & \dots & \dots & y_{+1m} \\ y_{+21} & y_{+22} & y_{+23} & \dots & \dots & y_{+2m} \\ y_{+31} & y_{+32} & y_{+33} & y_{+34} & \dots & y_{+3m} \\ y_{+41} & y_{+42} & y_{+43} & y_{+44} & y_{+45} & \dots & y_{+4m} \\ y_{+51} & y_{+52} & y_{+53} & y_{+54} & y_{+55} & \dots & y_{+5m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{+m1} & y_{+m2} & y_{+m3} & y_{+m4} & y_{+m5} & \dots & y_{+mm} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Burada ,

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \left[ Y_{p_{ik}} + Y_{s_{ik}} \right] \quad (6.2)$$

$$Y_{ik} = Y_{ki} = -Y_{s_{ik}} \quad (6.3)$$

ifadelerine eşit olur. Her bir frekans için , pozitif sequence bileşenlerini içeren bara admitans matrisi oluşturulacaktır.  $i$  ve  $k$  noktaları arasındaki taşıma hattının seri eleman modeli denklem (6.4) ile verilir.

$$\overline{Y_{s_{ik}}} = \frac{1}{\overline{Z_{s_{ik}}}} = \frac{1}{R_{s_{ik}} + jX_{s_{ik}}} = \frac{R_{s_{ik}} - jX_{s_{ik}}}{R_{s_{ik}}^2 + X_{s_{ik}}^2} \quad (6.4)$$

Harmonikleri içeren model ise aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$\left[ \overline{Y_{s_{ik}}} \right]_n = \frac{\left[ R_{s_{ik}} \right]_n - j \left[ X_{s_{ik}} \right]_n}{\left[ R_{s_{ik}} \right]_n^2 + \left[ X_{s_{ik}} \right]_n^2} \quad (6.5)$$

Bu ifade de,

$R_{ik_n}$  = n harmonik derecesine göre , i ve k arasındaki taşıma hattının seri direncini temsil eder.

$X_{s_{ik_n}}$  = reaktanslar için  $nX_{s_{ik}}$  ,  
kapasitanslar için ,  $X_{s_{ik}} / n$  olur.

Şebekedeki paralel elemanlar için de , benzer şekilde model oluşturulur.

$$\left[ \overline{Y}_{p_{ik}} \right]_n = \frac{\left[ R_{p_{ik}} \right]_n - j \left[ X_{p_{ik}} \right]_n}{z} \quad (6.6)$$

$$\left[ R_{p_{ik}} \right]_n + \left[ X_{p_{ik}} \right]_n$$

Dengesiz işletim durumlarında ,  $Y_{bara}$  matrisi yerine bu matrisin simetrik bileşen modelini temsil eden,  $Y_{SYM\ bara}$  matrisi kullanılır. Bu durumda matris , içindeki her elemanının pozitif , negatif ve sıfır sequence bileşenlerini içereceğinden bara admitans matrisinin üç katı genişleyecektir.  $Y_{SYM\ bara}$  matrisini oluşturmak için , bir takım kabuller yapılır. Gerçek veriler uygun olmadığı zaman , aşağıda verilen denklemde görüldüğü gibi , pozitif ve negatif sequence admitansları yaklaşık olarak birbirlerine eşit kabul edilir.

$$\left[ Y_{- \text{ bara}} \right] = \left[ Y_{+ \text{ bara}} \right] \quad (6.7)$$

Simetrik bileşen matrisi ise , denklem (6.8) ile verilir.

Sonuç olarak , dengeli harmonik işletim çalışmaları için, sistem pasif ve lineer kabul edilir . Bu sisteme harmonik üreten kaynaklar , akım kaynağı olarak eklenip , bileşke sistem harmonik gerilimleri admitans matris yöntemi ile çözülür. Böyle bir sistem için oluşturulan algoritma,

sistemin yalnızca kararlı durum davranışını modelleyebilir. Oysa fiziksel bir sistemin harmonik davranışları değişebilir.

$$\left[ Y_{SYM \text{ bara}} \right] = \begin{bmatrix}
 \begin{array}{ccc|ccc}
 y_{+11} & 0 & 0 & \dots & y_{+1m} & 0 & 0 \\
 0 & y_{-11} & 0 & \dots & 0 & y_{-1m} & 0 \\
 0 & 0 & y_{011} & \dots & 0 & 0 & y_{01m} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 y_{+m1} & 0 & 0 & \dots & y_{+mm} & 0 & 0 \\
 0 & y_{-m1} & 0 & \dots & 0 & y_{-mm} & 0 \\
 0 & 0 & y_{0m1} & \dots & 0 & 0 & y_{0mm}
 \end{array}
 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Dengeli olmayan ac sistem kabulünde ise , bilindiği gibi  $Y_{\text{bara}}$  matrisinin modellenmesi için , tüm sequence bileşenlerinin değerleri gereklidir. Sistemdeki lineer olmayan yüklerin modellenmesi için durum değişken analizi kullanılır.

$$\left[ \underline{V}_{\text{bara}} \right]_n = \left[ \underline{Y}_{\text{bara}} \right]_n^{-1} \cdot \left[ \underline{I}_{\text{bara}} \right]_n \quad (6.9)$$

Yukarıda verilen denklem ile, hem dengeli hem de dengesiz durum koşullarında analiz yapılabilir. Daha önce belirtildiği gibi  $Y_{\text{bara}}$  matrisi basittir ve  $I_{\text{bara}}$  vektörü belirlenmiş harmonik karışıklıkların olduğu bara bölgeleri hariç sifıra eşit olur. Dengesiz sistem işletiminde ise , simetrik bileşen ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\left[ \underline{V}_{SYM \text{ bara}} \right]_n = \left[ \underline{v}_{+1} \ \underline{v}_{-1} \ \underline{v}_{01} \ \dots \ \underline{v}_{+k} \ \underline{v}_{-k} \ \underline{v}_{0k} \ \dots \ \underline{v}_{+m} \ \underline{v}_{-m} \ \underline{v}_{0m} \right]^T \quad (6.10)$$

$$\left[ I_{\text{SYM Bara}} \right]_n = \left[ I_{+i} \ I_{-i} \ I_{0i} \ \dots \ I_{+k} \ I_{-k} \ I_{0k} \ \dots \ I_{+m} \ I_{-m} \ I_{0m} \right]^T \quad (6.11)$$

$\left[ Y_{\text{SYM Bara}} \right]_n$  matrisinin tersi , gerilim harmoniklerini verir.

$V_{\text{SYM Bara}}_n$  : harmonik gerilim vektörünü ,

$I_{\text{SYM Bara}}_n$  : harmonik akım vektörünü temsil eder.

Güç sistemi bara gerilimlerdeki harmonikler , frekans domenindeki analiz sonucunda bulunur. Ancak bu yöntemde lineer olmayan bir yük modellenirken , sinüs şeklinde bir gerilimin bulunduğu kabul edilir. Gerilimin sinüs şeklinde olmaması durumunda lineer olmayan yükler , durum değişkenleri yöntemi veya parça-parça birleştirme yöntemi kullanılarak , yapılan hesaplama sonucu bulunur. Bu şekilde karma bir yöntemle çeşitli çalışmalar<sup>15</sup> yapılmıştır.

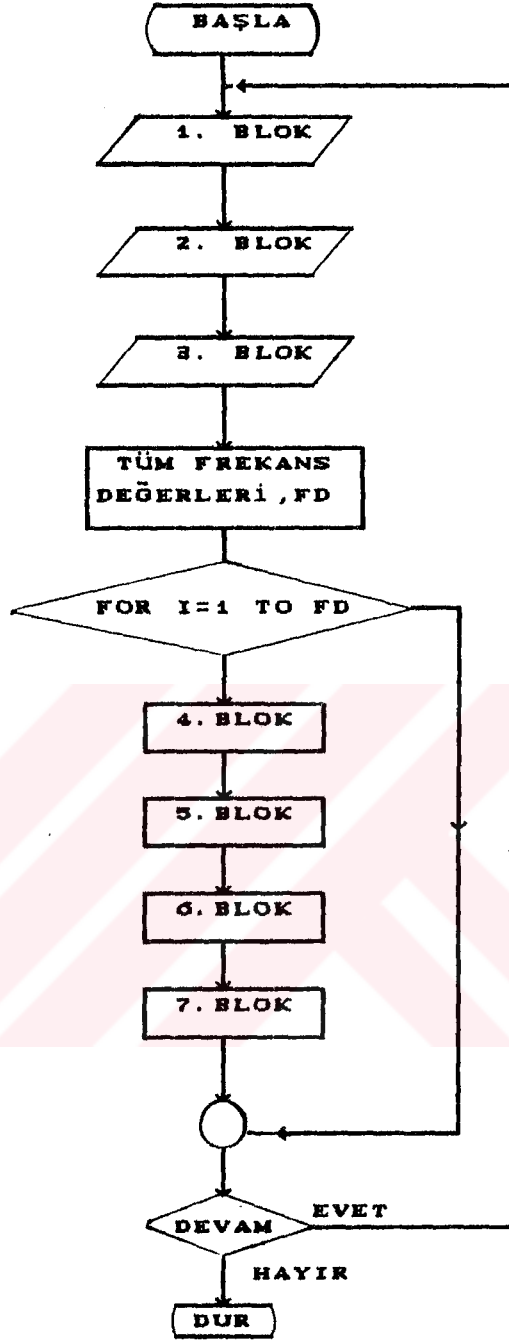
Harmonik analiz çalışmaları için , tek faz ve üç faz harmonik yayılma algoritmaları oluşturulmuştur.

### 6.3 Tek - faz Modelleme

Tek faz harmonik yayılma algoritmasının yapısı , Şekil 6.3 'de gösterilir. Bu algoritma , dengeli durum çalışmaları için geçerlidir.

<sup>15</sup>

Bu konuda , ayrıntılı bilgi ( BROWN , P. J. , January 1990 . Computerized Simulation and Measurement of Power Harmonics , PH. D.Thesis , İstanbul Technical University) olarak belirtilen kaynakta yer almaktadır.



Şekil 6.3. Tek-faz harmonik modelleme yapı diyagramı

Şekilde verilen algorithmda blokların işlevleri aşağıda sıralanmıştır.

1. blok , sistem veri tabanından temel bileşen frekansı için , pozitif sequence hat seri empedansını ve şönt admittansını okur.

2. blok , sistem veri tabanından temel bileşen frekansı için dengeli yük , transformatör , generatör , filtre ve şönt veriyi okur.

3. blok , giriş akım barası ve frekans aralığı girişini gösterir.

4. blok , frekansın temel fonksiyonlarına bağlı sistem admitans matrisi oluşturur.

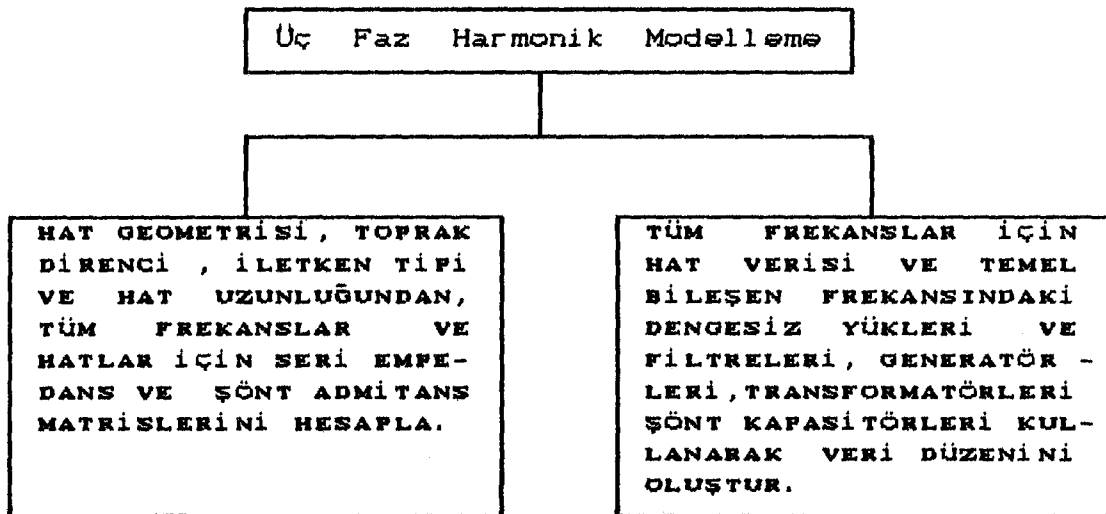
5. blok , pozitif sequence gerilimlerini ve bunların çıkışlarını elde etmek için  $[ I ] = [ Y ]. [ V ]$  denklemini çözer.

6. blok , hat akım akışlarını ve bunların çıkışlarını hesaplar.

7. blok , sistem empedanslarını ve bunların çıkışlarını hesaplar.

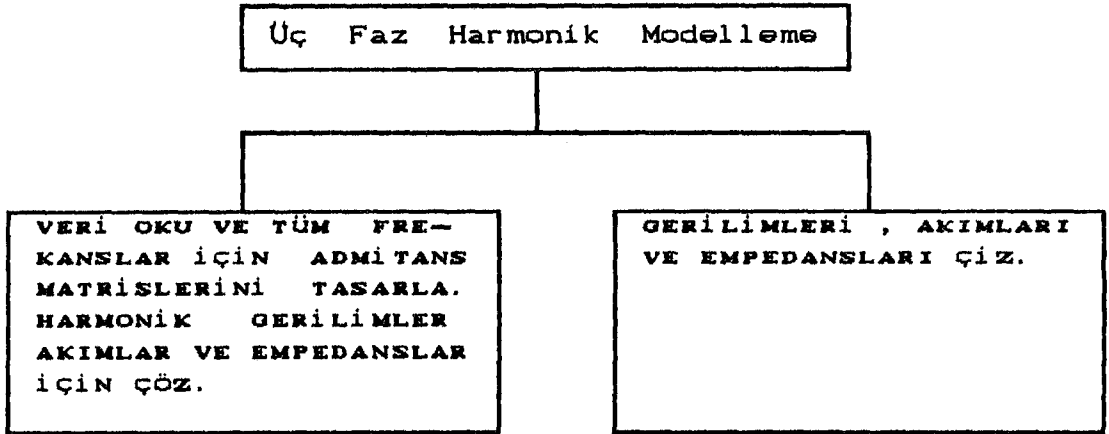
#### 6.4 Üç - faz Modelleme

Üç faz harmonik yayılma algoritmasının yapısı da , Şekil 6.4 'de verilmektedir. Bu algoritma ise , dengesiz durum çalışmaları için geçerlidir.



Şekil 6.4. Üç faz harmonik modelleme yapı diyagramı





Şekil 6.4. (Devam) Üç faz harmonik modelleme yapı diyagramı

Şekilde verilen ,

1. blok , eşdeğer PI modeli kullanılarak , istenilen bir aralığın üzerindeki her frekans için , taşıma hat parametrelerini hesaplar.

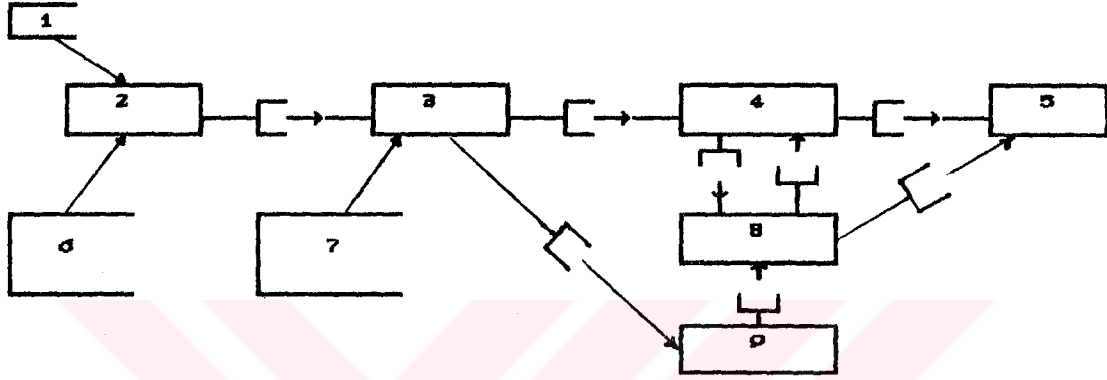
2. blok ,ilk bloktan hat verilerini okuyarak ve istenilen diğer bileşen verilerini ve dengelenmiş yükleri ilave ederek veri tabanını tamamlar.

Şekil 6.5 'de ise üç faz modelleme için veri akış diyagramı verilmiştir. Bu akış diyagramı , üç faz algoritmasının temelini oluşturan büyük veri kütüklerini ve farklı programları gösterir. Hem harmonik yayılma hem de üç faz güç akış çalışmaları için veri formasyonu aynı yazılım ile gösterilir.

Üç faz ac / dc güç akışı , dönüştürücü etkileşim ( interaction ) yazılımı için , temel bileşen frekans verisi ve dönüştürücü işletim durumunu gösterir. Şekil 6.6 'da gösterilen bu yazılımda , dönüştürücü uçlarında elde edilen harmonik gerilim ve akımların lineer olmayan dönüştürücü denklemlerini çözmek için , harmonik yayılma programı ile hesaplanmış üç faz sistem empedansları

kullanılır. Ac sistem içinde herhangi bir baraya bağlı olan , dönüştürücülerin etki ettiği akım girişleri , ac sistem içindeki bu harmonik akımların yayılma analizi için uygundur.

Uç faz harmonik yayılma programının yapısı ise , Şekil 6.7 'de verilen diyagram ile gösterilir.

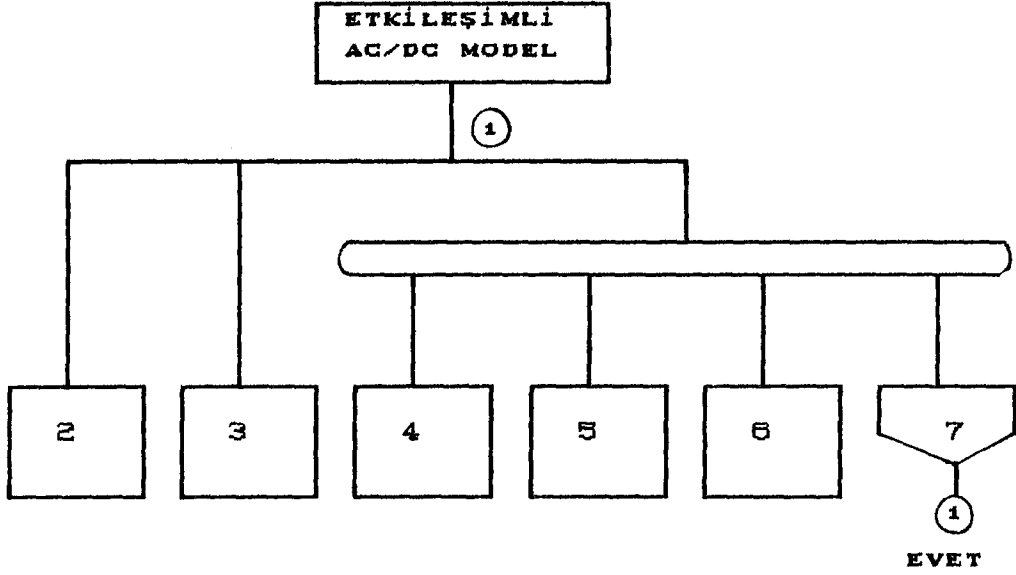


□ ile , program □ şeklindeki gösterim ile de veri kütükleri belirtilir.

Şekil 6.5. Uç-faz modelleme veri akış diyagramı

Şekilde numaralandırılmış olan blokların karşılıkları aşağıda verilmiştir.

1. blok : iletken verisini ,
2. blok : taşıma hattı parametre programını ,
3. blok : etkileşimli veri programını ,
4. blok : harmonik yayılma programını ,
5. blok : grafik programını ,
6. blok : hat geometrisini ve iletken tipi verisini ,
7. blok : generatör , transformatör şöntü , filtre ve yük verisini ,
8. blok : dönüştürücü etkileşim programını ,
9. blok : güç akış programını gösterir.



Şekil 6.6. Etkileşimli (interactive) ac - dc modelin yapı diyagramı

Şekilde verilen blokların tanımları ise şu şekildedir :

2. blok , harmonik frekanslardaki gerçek sistem bileşen verisini okur.

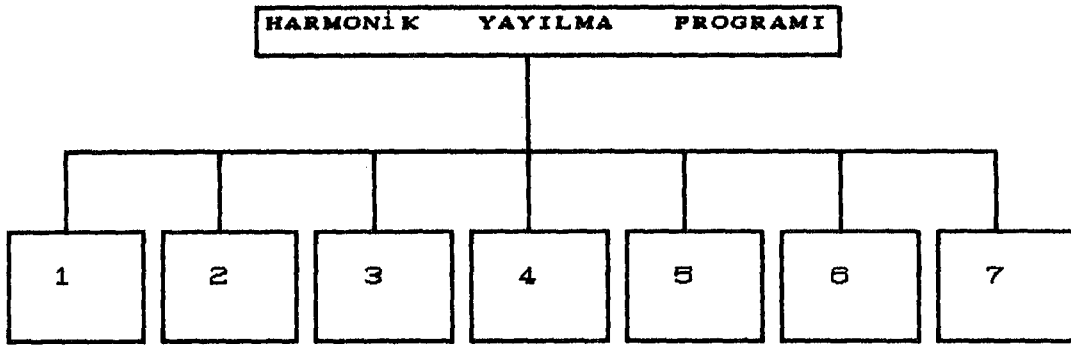
3. blok , dönüştürücü transformatörleri ve filtreleri içeren bir  $[ Y ]$  matrisi oluşturur.

4. blok , FFT kullanarak harmonik akım girişlerini belirler.

5. blok , bara uçlarındaki harmonik gerilimleri hesaplar.

6. blok , yeni dönüştürücü koşullarını belirler.

7. blok , sistemin harmonik olarak kararlı olup olmadığını sorar.



Şekil 6.7. Üç -faz harmonik yayılma programının yapı diyagramı

Bu programda verilen blokların işlevleri ise , aşağıda sıralanmıştır.

1. blok , frekans aralığı ve harmonik empedans baraları girişini verir.

2. blok , temel bileşen frekansındaki şönt kapasitörleri, transformatörleri , generatörleri , filtreleri ve denge -siz yükleri okur ve admitans matrislerini oluşturur.

3. blok , tüm frekanslar için hat verisini okur ve harmonik admitans matrislerini içine alır.

4. blok , indirgenmiş bir sistem için , sistem harmonik admitans matrisini hesaplar.

5. blok , akım barası ve üç faz veri girişlerini gösterir.

6. blok , üç faz gerilimlerini ve çıkışları elde etmek için , tüm frekanslarda  $[ I_n ] = [ Y_n ] \cdot [ V_n ]$  denklemini çözer.

7. blok , tüm frekanslar ve çıkış için hat akım akışlarını hesaplar.

Modelleme ve algoritmalar hakkında verilen bu kısa bilgilerden sonra , Bölüm 7 ' de elektrikli çer sistemlerine ait iki örneğe yer verilmiştir. Bu örneklerde sistemler , frekans domeninde modellenerek simülasyon çalışmaları yapılmış olup , uygulamada yapılan ölçümler ile hesaplamalar sonucu bulunan değerler karşılaştırılmıştır.



## BÖLÜM 7

### ELEKTRİKLİ ULAŞIM YÜKLERİNİN HARMONİK KARAKTERİSTİKLERİNE AİT SİMÜLASYON VE MODELLEME ÖRNEKLERİ

#### 7.1 Giriş

Elektrikli lokomotiflerin çoğu tristörler ile kontrol edilirler ve bundan dolayı , sistem ve lokomotifler karşılıklı olarak birbirlerini etkiledikleri zaman , büyük harmonik akımları ve rezonans aşırı gerilimleri meydana gelebilir. Bu nedenle , dizayn sırasında veya problemler ortaya çıkarken , lokomotiflerin tahrik sistemlerinin neden olduğu akımlar ve aşırı gerilimler hesaplanmalıdır. Böylece , bundan sonra doğabilecek olan problemler önlenmiş olur.

Bu bölümde , Avustralya 'da ve Yeni Zelanda ' da gerçekleştirilmiş olan modeller ve bilgisayar simülasyon çalışmaları örnek olarak verilmektedir.

#### 7.2 Birinci Örnek Ototransformatörlü Bir Cer Sisteminin Frekans Domeni Modeli

##### 7.2.1 Genel tanıtım

Ototransformatörlü ( AT ) sistemler , genellikle büyük cer elektrifikasyon projeleri için , kaynak gücü olarak kullanılırlar. Birinci örnekte , bir AT cer sisteminin matematiksel modeli ve bilgisayar programı tanıtılmaktadır. ( GRIFFITHS , 1987 )

Avustralya , Central Queensland hattı , 50 Hz ve 132 kV 'luk üç fazlı bir sistemden beslenir. 30 MVA 'lık 132 / 50 kV 'luk tek fazlı transformatörler ise , AT cer sistemini beslerler. Bu bölümde , bu sistemler genel olarak tanıtılmaktadır. Sistemin tanıtımından sonra , sistemin özellikleri ele alınmış ve bu özelliklere göre bir model oluşturulmuştur.

Bilindiği gibi , bir elektriki sistem çeşitli şekillerde modellenebilir. Modelleme tekniklerini , fiziksel modeller ve dijital bilgisayar modelleri olarak ikiye ayırabiliriz. Fiziksel modeller , fiziksel olarak ayarlanmış ve elektriki olarak eşdeğer modeller şeklinde verilirler. Dijital bilgisayar modelleri ise , dinamik zaman domeni, frekans domeni ve hareketli dalga teorisi modelleri olarak üç grupta toplanabilirler.

İlk örnekte , frekans domeninde modelleme tekniği kullanılmaktadır. Bu modelleme ile , AT cer sistemindeki rezonans aşırı gerilimleri , harmonik sızma seviyeleri ve sistem rezonansı tam olarak belirlenebilir. Model , oto-transformatörleri ve kompleks dönüş akım şebekelerini gösteren ( düzgün kaskad ) yeni bir frekans domeni tekniğine dayandırılmaktadır. ABCD parametreleri ile tanımlanmış olan çok uçlu şebekeleri kullanmak için ,klasik frekans domeni yaklaşımı yapılmış ve sistemin kısa bölümleri karma bir ABCD şebekesi ile modellenmiştir. 5 adımda tanıtılan bir dalga şekli algoritması kurulmuştur.

Avustralya Central Queensland ' da , Callemondah ve Rocklands arasındaki hatta ait akım ve gerilim dalga şekilleri , pantograf gerilimi , dc motorun akımı , hızı , durumu ve lokomotifin ateşleme açıları kaydedilmiştir. Kaydedilen test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve frekans domeni modelinin pratik olarak ispatı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler sonucunda ölçülmüş olan aşırı

gerilimlerin bilgisayar programı tarafından belirlenen tahminlere uygun olduğu görülmüştür.

### 7.2.2 Güç sisteminin tanıtılması

Bu kısımda , Avustralya ' da örnek alınan sistem tanıtılmaktadır. Verilen örnekte , elektrikli lokomotiflere enerji sağlamak için , temel metot olarak AT cer sistemleri kullanılmıştır. 50 Hz , 132 kV üç fazlı taşıma sistemi bir AT sisteminde , her biri 30 MVA 132 / 50 kV ' luk tek faz transformatörlü besleme istasyonlarına elektrik enerjisi sağlamaktadır. Büyük lokomotifin ürettiği kaynak şebekesine geçen harmonik gerilimleri ve akımları önlemek için , her besleme istasyonuna 3. , 5. ve 7. harmonik filtreleri yerleştirilmiştir.

Her AT sistem , yaklaşık 50 km. uzunlucundadır ve tek ( tek hatlı demiryolu ) yada çift ( çift hatlı demiryolu ) elektrikleştirilmiş demiryollarına sahiptir. Acil besleme durumunda , iki AT sistem ( 100 km.lik hat ) en uç noktadan veya AT sistemler arasına yerleştirilmiş olan 132 / 50 kV ' luk tek fazlı bir transformatörden beslenmektedirler. Yüksüz koşullarda , besleme istasyonunda katener/bağlantı sistemi ve besleme hattı , 27.5 kV ' luk bir gerilime sahiptirler. 10 MVA 50/ 25 / 25 kV ' luk ototransformatörler , birbirleri ile yaklaşık 10 km. ' lik aralıklarla dizilirler ve katener / bağlantı sistemi ile besleme hattı arasına bağlanırlar.

Her ototransformatörün merkez noktası doğrudan doğruya raylara veya empedans bağlantılarının merkezine bağlanmıştır. Empedans bağlantıları<sup>10</sup> ise raylara bağlıdır ve temel bileşen frekansında (50 Hz) düşük bir empedans, cer devrelerinin sinyalizasyonunda kullanılan daha yüksek frekanslarda ise , yüksek bir empedans sağlamaktadırlar.

Empedans bağları , yaklaşık 650 m. aralıklarla dizilirler.



Raylar , yaklaşık 1 ohm / km. 'lik bir kaçak empedans değerine , 50 m. aralıklarla dizilmiş olan anten direkleri ise , direk ile toprak arasında ortalama 30 ohmluk bir omik direnç değerine sahiptirler. AT sistemin topraklama hattı , cer sistemi havai hattını destekleyen her direğin tepesine elektriki olarak bağlanmıştır. Toprak hattı , yıldırımından korunmayı sağlamakta ve oto-transformatöre dönen akım devresini tamamlamaktadır.

İki adet kaskad bağlı yarı-kontrollu köprü tipi lokomotifler kullanılır ve bunlar , 25 kV ' da 200 amper akım taşıyabilecek kapasitededirler.

### 7.2.3 Model seçimi

Bir sistemin modellenmesinden önce , sistemin hangi özelliklere sahip olduğunu belirlemek gerekir. Daha sonra bu belirlemeler doğrultusunda bir model kurulur. Bu özellikler , sistem modelinin koşullarını oluştururlar.

#### 7.2.3.1 Bir AT cer sistem modelinin koşulları

Tasarlanan model , aşağıda verilmiş olan koşulları sağlamak zorundadır :

1 ) Herhangi bir güç besleme sistemini simüle edebilmelidir.

2 ) Birbirinden bağımsız iletkenler olarak , katener / bağlantı sistemini , besleme hattını , rayları ve toprak dönüş devresini gösterebilmelidir. (Önemli harmonik akımlar toprak dönüş devresinden akacaktır. Bundan dolayı,

1a

Empedans bağlantısı , dc çekiş akımını geçirecek, fakat sinyalizasyon amaçları için kullanılan ac akımları geçirmeyecek şekilde tasarlanmış olan yüksek reaktanslı, düşük dirençli özel bir ray bağlantısıdır.

toprak dönüş devresi , raylar ve toprak hattını ayrı ayrı göstermek gerekir. Empedans bağlantıları , demiryolu kaçak empedansı ve direk ile toprak arasındaki omik direnç de içermelidir.)

3 ) AT sisteminde herhangi bir yerde belirlenecek olan, gerilim ve akım dalga şekillerine ve harmonik seviyelerine ( Örneğin , katener/bağlantı sisteminin , besleme hattının , rayların veya toprak hattının herhangi bir yerinde ) ayrıca AT sisteminin herhangi bir yerine yerleştirilecek olan lokomotiflere de müsaade edilebilmelidir.

4 ) 132 kV 'luk kaynak şebekesini , tüm transformatörleri , harmonik fitreleri ve bastırma şebekelerini içermek zorundadır.

5 ) Hem AT , hem de 132 kV 'luk taşıma sisteminde iletim hattı için , duran dalga ve deri olayını yeterli derecede gösterilebilmelidir.

Fiziksel modeller , bir AT sisteminin pratik çalışmasını gösterebilir , fakat kolayca idare edilemezler. Bu tip modeller pratik değildir , değişik besleme tiplerinde fiziksel modeli yeniden oluşturmak oldukça zaman alır. Kaçak empedans , empedans bağları vs. modellenmek zorundadır ve sonuç olarak da model , birçok düğüm noktasına sahip olacaktır. Bu yüzden , zaman domeni ve hareketli dalga modellerinin programları hem hesap açısından zordur hem de pahalıdır. Ayrıca , deri olayını göstermek de kolay değildir. Tüm bu nedenlerden dolayı frekans domen modeli tercih edilmektedir. Bu örnekte de , bu tip bir modelleme tekniği kullanılmıştır.

#### 7.2.4 Frekans domeni modellemesi

Frekans domeni modelinde , çözülecek problemin her frekans değeri için ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Sistemde lineer olmayan elemanlar , tüm frekansı

içerecek şekilde ( örneğin deri olayı ) tam olarak modellenmelidir. Frekanslar , temel bileşenin harmonikleri olmak zorunda değildirler. Bununla beraber , kararlı durumda güç sistemi tarafından üretilen dalga şekillerinin simetrisinden dolayı , harmoniklerin öncelikle ele alınması gerekir.

Sistem modelinde çok sayıda düğüm ve taşıma hattının çeşitli kısımlarında dağılmış olan transformatörler gibi çok sayıda eleman vardır. A B C D parametreleri ile tanımlanmış olan çok uçlu şebekeleri kullanmak için, klasik frekans domen yaklaşımı yapılmıştır.

#### 7.2.5 Çok uçlu ABCD parametre şebekeleri

ABCD parametreleri , sistemin bir ucundaki akımlar ve gerilimlere bağlı olarak pasif bir lineer sistemi tanımlar.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{(n-1)} \\ I_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

ABCD parametreleri , genelde matris şeklindedirler. Tek hatlı bir demiryolu AT sistem parametreleri için , 4x4 bir matris kullanılmıştır. Katener / bağlantı sistemi, besleme hattı , toprak hattı ve raylar dört ayrı iletken olarak tanımlanırlar. Toprak dönüş akımları, bu iletkenlerdeki akımların toplanmasıyla belirlenir. Sistem simetrik ise , denklem ( 7.1 ) denklem (7.2) 'de görüldüğü gibi ters çevrilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_{(n-1)} \\ -I_{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Alt sistemler , bütün sistemin bir A B C D tanımlamasını elde etmek için , alt sistem A B C D matrislerinin

çarpımlarıyla kaskad bağlanabilirler.

Bir AT sistemin A B C D parametre modelleri , aşağıdaki alt sistemler için oluşturulmuştur. Bu alt sistemler, mümkün olduğunca simetrik bir şekilde meydana getirilirler.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{(n-1)} & B_{(n-1)} \\ C_{(n-1)} & D_{(n-1)} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix}$$

(7.3)

#### 7.2.5.1 Alt sistemler

1 ) Bir ototransformatör , karşılıklı empedanslar kullanılarak ve kaçak empedans ile frekans bağıntıları dahil edilerek modellenmiştir..

2 ) Taşıma hattının 500 m. ' lik bir kısmı çok iletkenli bir nominal PI model ( veya eşleniği ) tarafından modellenmiştir. Bu PI model , hem self hem de karşılıklı seri empedansları ve şönt kapasiteleri içermektedir. Bir toprak dönüş devresini tanımlayan seri empedanslar , Carson formülü kullanılarak bulunur. Her iletkenin self empedansı hesaplanırken , deri olayı da dikkate alınmalıdır. Ayrıca , bir empedans bağı , demiryolu kaçak empedansı , toprak ile direk arasındaki omik direnç de gözönüne alınmalıdır. Taşıma hattının büyük bölümleri , yeterli sayıda 500 m. ' lik bölümlerin kaskad bağlanmasıyla oluşturulur.

3 ) Üçüncü , beşinci ve yedinci harmonik filtreler , seri bağlanmış bir direnç , bir endüktans ve kapasiteden oluşan şebekeler tarafından modellenmiştir.

4 ) 132 kV besleme şebekesi ve 132 / 50 kV ' luk transformator , transformatorün lineer olmayan frekansını , duran dalga olayını , deri olayını ihtiva edecek şekilde

tasarlanmıştır.

5 ) Lokomotif empedans şebekesi , transformatör kaçak empedansı ve güç faktörü düzeltme şebekelerini içermektedir.

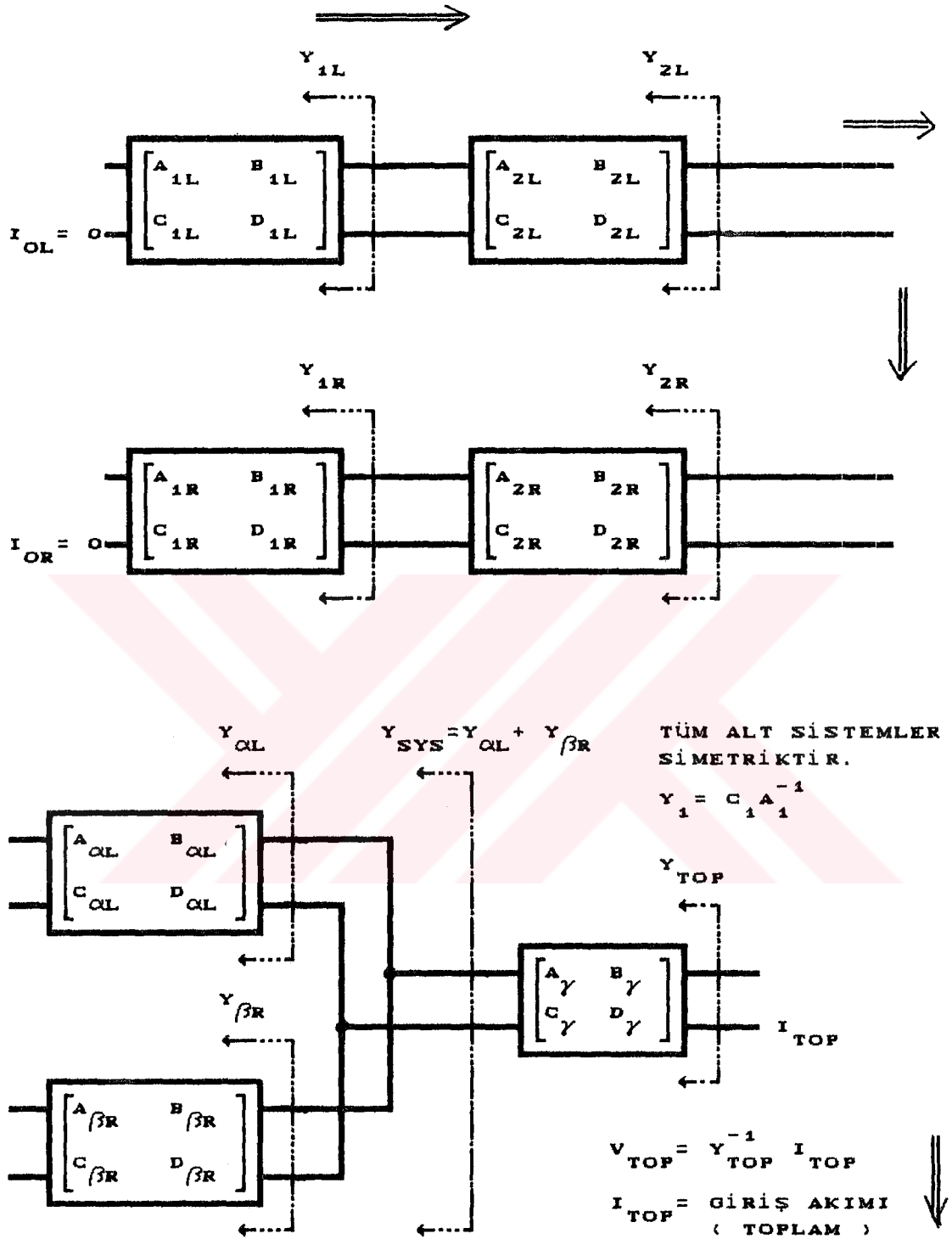
Tüm sistem için , eşdeğer bir A B C D modeli oluşturulduktan ve alt sistemler kaskad bağlandıktan sonra, problemi çözmek için ya parametre matrislerinden birinin ya da tüm A B C D matrisinin ters çevrilmesi gerekmektedir. Ancak ; raylar , toprak hattı ve toprak arasındaki ve ayrıca besleme hattı ile katener / bağlantı sisteminin gerilim genliklerini eşitlemeye çalışan ototransformatörler arasındaki büyük admitanslardan dolayı , ABCD matrisi ve tüm matris parametreleri sistemi büyütürler.

Bu yüzden , sistemin sadece kısa bölümleri karma bir ABCD şebekesi tarafından modellenmiştir.

#### 7.2.5.2 Düzgün kaskadlama algoritması

Düzgün kaskadlama algoritması , pasif bir lineer sistemde herhangi bir yerdeki akım ve gerilim harmonik seviyelerini belirleyebilen bir harmonik yayılma yöntemidir. Sistemdeki her giriş noktası , diğer kısa devre edilmiş gerilim ve açık devre edilmiş akım girişlerinden bağımsız olarak düşünülmüştür.

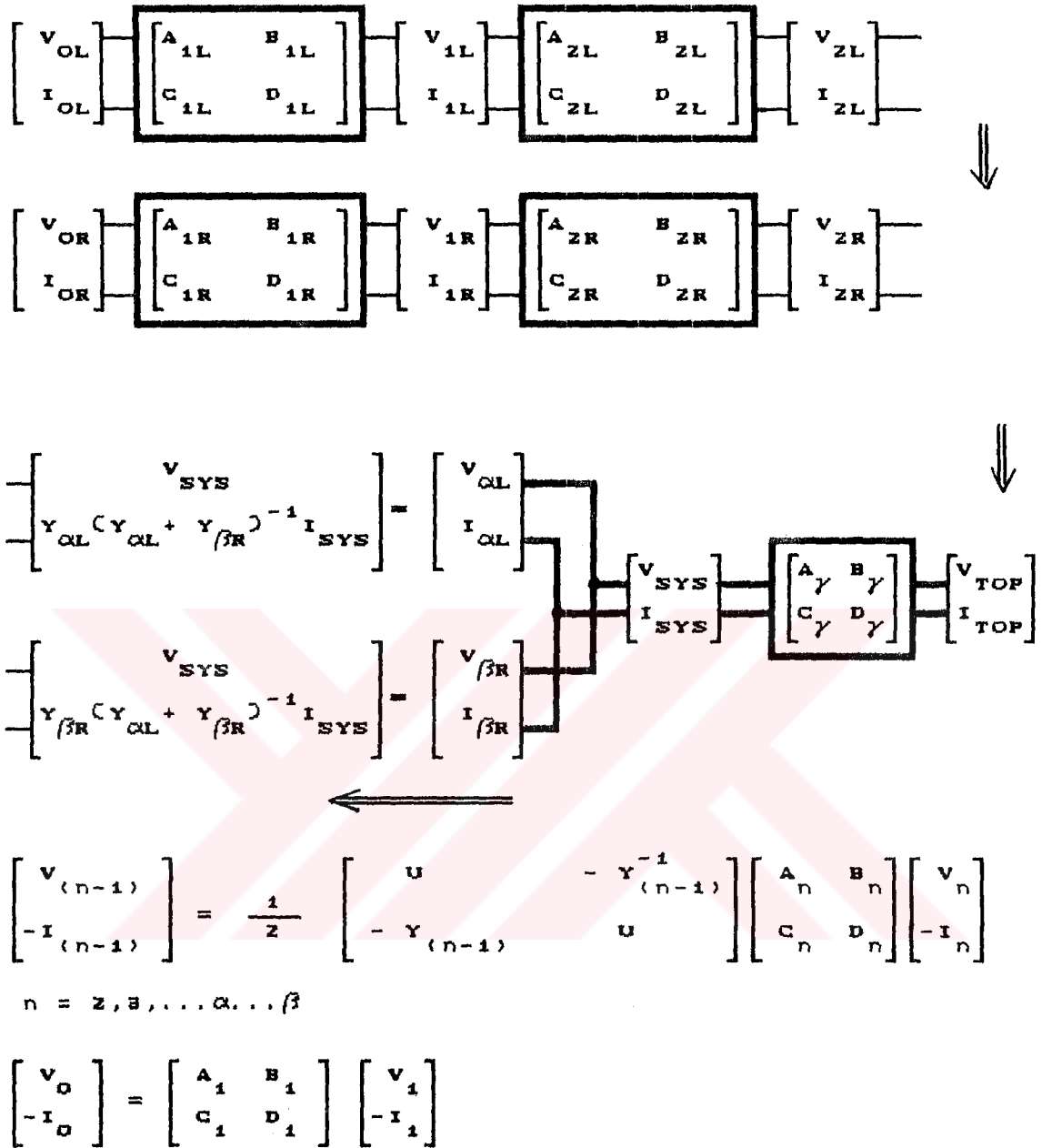
Düzgün kaskadlama algoritması , Şekil 7.1 'de özet olarak verilmiştir.



$$Y_n = (C_n + D_n Y_{(n-1)}) (A_n + B_n Y_{(n-1)})^{-1}$$

$$n = 2, 3, \dots, \alpha, \dots, \beta$$

Şekil<sup>17</sup> 7.1. Düzgün kaskad algoritması



SON KONTROL  $I_0$  , SIFIRA EŞİT OLMAK ZORUNDADIR.

Şekil<sup>17</sup> 7.1. (Devam) Düzgün kaskad algoritması

17

GRIFFITHS , P. T. , 22-25 September 1987. A Frequency Domain Model of an Autotransformer Traction System for Penetration and Resonant Overvoltage Studies. Intern. Conf. on Electric Railway Systems for a New Century (IEE) p. 109-113 , LONDON , U.K.

Kaskadlama algoritması , üç temel adımda tanımlanabilir :

**Adım 1 :** Sistemin bitiş noktalarından başlayarak , admitans matrisini hesaplar ve kaydeder , daha sonra giriş noktasına doğru ilerler. Sistem kapalı olduğunda , çıkış noktalarından hiçbir akım akmaz , bu yüzden sistemin ilk bölümünün açık devre admitansını hesaplamak mümkün olabilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

$$I_1 = C_1 \cdot A_1^{-1} \cdot V_1 = Y_1 \cdot V_1 \quad (7.5)$$

Bir AT sistemdeki bu ilk bölüm , sistemin bir ucunda çalışırken ya bir ototransformatör veya diğer ucunda çalışırken 132 kV ' luk kaynak şebekesi olacaktır.

Bir önceki bölüm admitansı bilindiği zaman , bir sonraki bölümünkini bulmak mümkündür. Dolayısıyla bütün bölüm admitans matrisleri kolayca bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ Y_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

U , eşdeğer matrisi ifade eder.

$$Y_n = \left[ C_n + D_n \cdot Y_{(n-1)} \right] \cdot \left[ A_n + B_n \cdot Y_{(n-1)} \right]^{-1} \quad (7.7)$$

**Adım 2 :** Giriş noktasından bakıldığında , sistemin giriş admitansı biliniyorsa , sırasıyla giriş akımı veya gerilimi verildiğinde , bu noktadaki gerilim veya akım hesaplanabilir. Gerilim / akım düzeni , bu durumda giriş noktasında tanımlanır.



$$V_{TOP} = Y_{TOP}^{-1} \cdot I_{TOP} \quad (7.8)$$

Adım 3 : Sistem uçlarına doğru geri çalışırken, akım ve gerilim değerlerini kaydeder ve hesaplar. Denklem ( 7.2 ) ' den yararlanılarak, yeni bir akım / gerilim düzeni elde etmek mümkündür. Bölüm admitans matrisi de yeni gerilimler ve akımlar arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır.

$$I_{(n-1)} = Y_{(n-1)} \cdot V_{(n-1)} \quad (7.9)$$

( 7.2 ) ve ( 7.9 ) nolu denklemler kullanılarak , aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{(n-1)} \\ -I_{(n-1)} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} U & -Y_{(n-1)}^{-1} \\ -Y_{(n-1)} & U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Bu denklem , önemli hata olmaksızın bir önceki düzenden hesaplanacak yeni gerilim / akım düzenini dikkate alır. Sistem uçlarındaki akımlar hesaplandığı zaman , son olarak yöntem kontrol edilebilir. Bu akımlar , sifıra eşit olmalıdır.

Konu ile ilgili tüm frekanslar için , sabit bir giriş seviyesi ve düzgün kaskad algoritması uygulanarak , sistemdeki herhangi bir yerde , gerilim ve akım seviyeleri belirlenebilir. Şekil 7.2 , 1 amperlik giriş akımına bağlı olarak , bir AT sistemdeki katener / bağlantı iletkenleri boyunca gerilim harmonik seviyelerini göstermektedir.

#### 7.2.5.3 Dalga şekli algoritması

Bir harmonik yayılma programının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlardan , dalga şekilleri oluşturulduğunda kararlı durum çalışmasına geçildiği farz edilir.

Bu varsayım ; birçok çalışma koşullarında , giriş akımlarını sabit olarak kabul etmek için lokomotiflerdeki tristörlerin ateşleme açılarının yeterince yavaş bir şekilde değiştirildiği , bir AT cer sistemi için mümkündür.

Gerilim ve akım dalga şekilleri , 5 temel adımın kullanılmasıyla oluşturulabilir :

**Adım 1 :** Bir giriş gerilim veya akım dalga şekli meydana getirir. Bu , yükün çalışmasını tanımlayan denklemlerin kullanılması veya indirgenmiş dereceli bir zaman domeni simülasyonu uygulaması ile elde edilebilir.

**Adım 2 :** Giriş dalga şeklinden oluşan harmoniklerin düzenini elde etmek için Fourier analizi kullanılmasıdır.

**Adım 3 :** Giriş dalga şeklinden dolayı sistemdeki gerilim ve akımların harmonik bileşiminin , düzgün kaskad programı ve adım 2 'nin sonuçlarının kullanılması ile belirlenmesidir.

1 ' den 3 ' e kadar olan adımlar , her giriş noktası için tekrar edilir.

**Adım 4 :** Giriş dalga şekillerinin istenen zaman değişimlerini bulmaktır. Süperpozisyon teoremi kullanılarak bilinen harmonik bileşenlerden , giriş noktalarındaki gerilim dalga şekillerini oluşturmaktır. Bu gerilim dalga şekilleri , tristör köprülerinin ateşleme durumuna uymak zorundadırlar. Giriş noktalarındaki gerilimlerin istenilen zaman değişimleri , giriş dalga şekillerinin zaman değişimlerinin bir fonksiyonudur.

**Adım 5 :** Sistemin herhangi bir yerindeki akım ve gerilim dalga şekilleri , bilinen harmonik bileşenlerden meydana getirilebilir.

### 7.2.6 Modelleme yönteminin pratik olarak ispatı

Frekans domeni modelinin pratik olarak bir ispatı, gerçek bir AT sistem boyunca kaydedilen test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak yapılmıştır. ( GRIFFITHS , 1987 )

Bir AT sistemin harmonik verimini ve aşırı gerilimlerini araştırmak için , Queensland Avustralya ' da Callemondah ve ( 0 km. ) Rocklands ( 95 km. ) arasında , 1244 tonluk bir kütleyi taşıyan tek fazlı bir elektrikli lokomotif kullanılmıştır. Hattın 95 km. ' lik bölümü çift hatlı demiryolu sistemidir ve Callemondah 'tan beslenmektedir.

Bu testler sırasında , pantograf gerilim dalga şekli, dc motor akımı , hızı , durumu ve lokomotifin her iki ateşleme açıları trende kaydediliyorken ; Callemondah ve Rocklands arasındaki katener / bağlantı ve besleme hatlarının her ikisinin akım ve gerilim dalga şekillerini aynı anda kaydetmek için çok kanallı FM magnetik teypleri kullanılmıştır. Kayıtların çoğu lokomotifin hızlandırma zamanlarında yapılmıştır.

En büyük katener / bağlantı aşırı gerilimleri , lokomotif Rocklands yakınındayken meydana gelmiştir. 0 ve 40 derece ateşleme açılı çift köprülü olan lokomotif , Callemondah 'dan 95 km. ve Rocklands 'dan 1 km. 'lik mesafede bulunduğu zaman , 25 kV ' da 147 amperlik akım çekmekte ve 37 km/h 'lik hızda hareket etmektedir. Callemondah 'dan sonra 95 'inci kilometrede ölçülen katener / bağlantı gerilim dalga şekilleri , sırasıyla Şekil 7.4 ve 7.5 ' de görülmektedir.

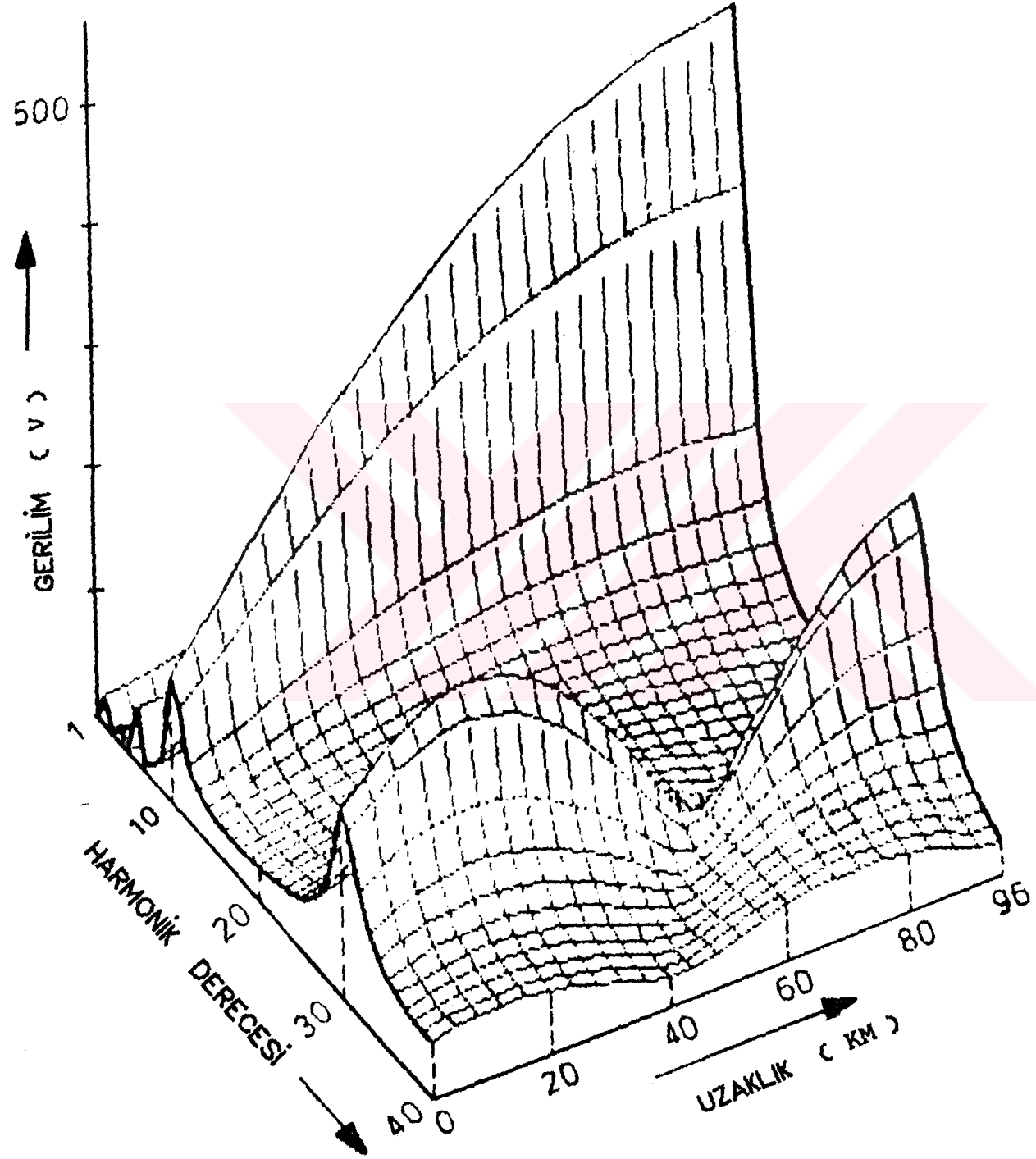
Bu sistemde , lokomotif ve güç istasyonunun herikisi de giriş noktalarını gösterirler. Sistem , ototransformatörler ve çift hatlı demiryolu bölümleri , çift hatta 95 km. 'lik noktada lokomotifin pozisyonu gibi tüm ilgili alt sistemlerin tanımlanmasıyla modellenmiştir.

Düztün kaskadlama algoritması , her frekansdaki 1 amper lokomotif giriş akımından dolayı , sistemdeki harmonik akım ve gerilim seviyelerini belirlemek için kullanılmıştır.

Şekil 7.2 , çift hatlı demiryolunun katener / bağlantı sistemi boyunca harmonik gerilim seviyelerini göstermektedir. Bu şekli bir " Harmonik gerilim haritası " olarak tanımlayabiliriz. Onuncu ve onbirinci harmonikler arasındaki frekans rezonans frekansıdır. Düztün kaskadlama algoritması ayrıca , güç sistemindeki 1 voltluk bir girişe göre , katener / bağlantı sistemi için temel gerilim ve akım seviyelerini hesaplamada da kullanılmaktadır.

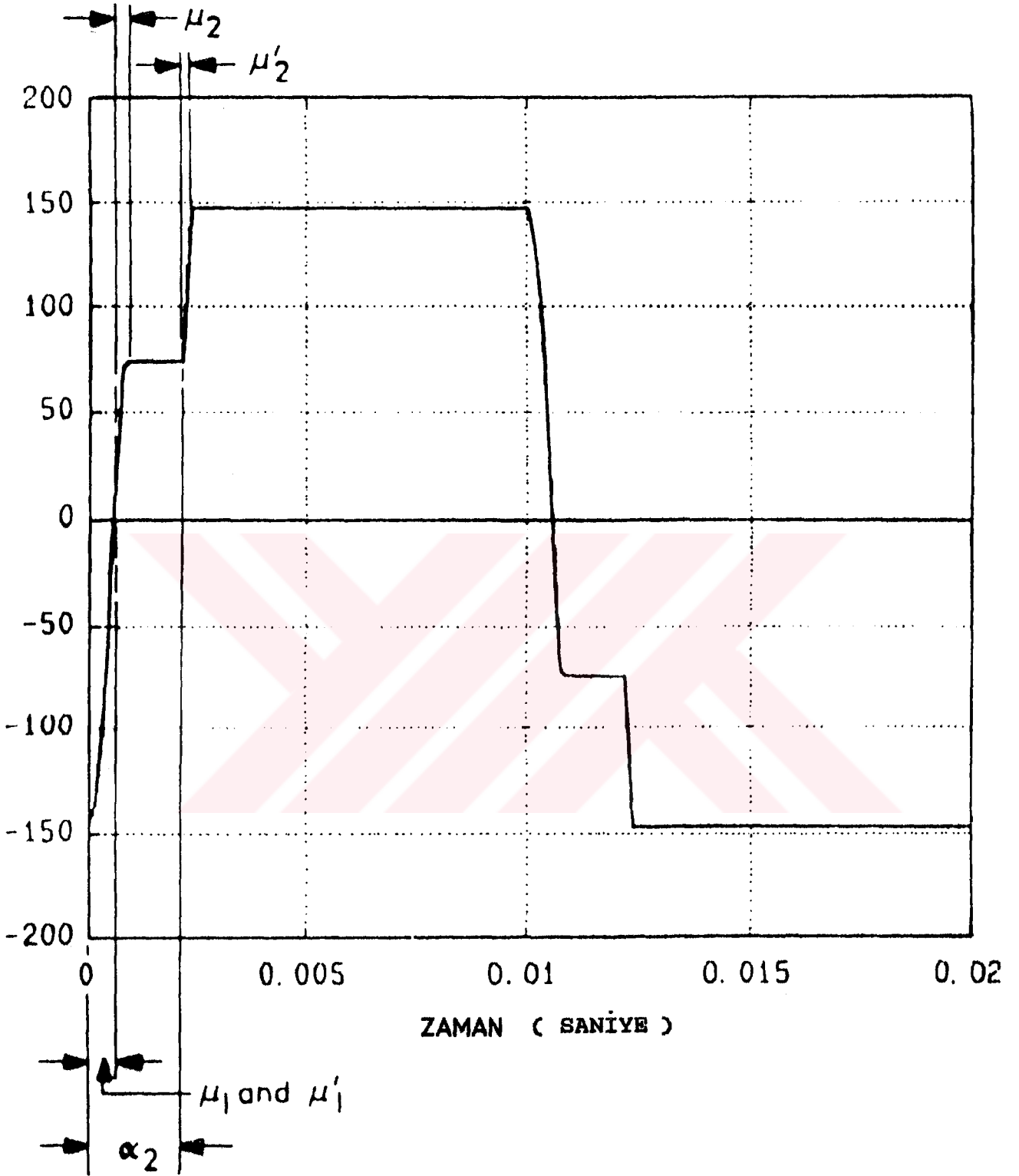
Şekil 7.4 , dc akımı tamamen düztün kabul ederek , dc motor akımı ve ateşleme açıları bilindiği takdirde, giriş akımı dalga şekillerinin nasıl oluştuğunu açıklamaktadır. Bu yöntem kullanılarak giriş akım dalga şekli bulunmuş ve Şekil 7.3 ' de gösterilmiştir.

Daha sonra , dalga şekli yapım algoritması , 95 km. 'lik ( pantograf gerilimi ) ve 0 km. 'lik ( Callemondah ) noktalarındaki katener / bağlantı sistemi gerilim dalga şekillerini oluşturmak için kullanılmıştır. Bu simüle edilmiş dalga şekilleri , sırasıyla Şekil 7.4 ve 7.5 'de görülür ve doğrudan doğruya ölçülmüş dalga şekilleri ile karşılaştırılabilir. Simüle edilmiş ve ölçülmüş dalga şekilleri arasında çok iyi bağlantıların olduğu görülebilir. Frekans domen modeli , dalga şekillerinin faz ilişkilerini ve rezonans frekanslarını doğru olarak tahmin etmektedir. Hem 0 km. 'lik hem de 95 km. 'lik noktalarda , bu simülasyon ve ölçüm frekans domen modelinin pratik bir ispatını vermektedir.



Şekil<sup>17</sup> 7.2. Katener sistemi boyunca harmonik gerilimler  
( 95 km. deki giriş akımı 1 amperdir.)

AKIM ( AMPER )

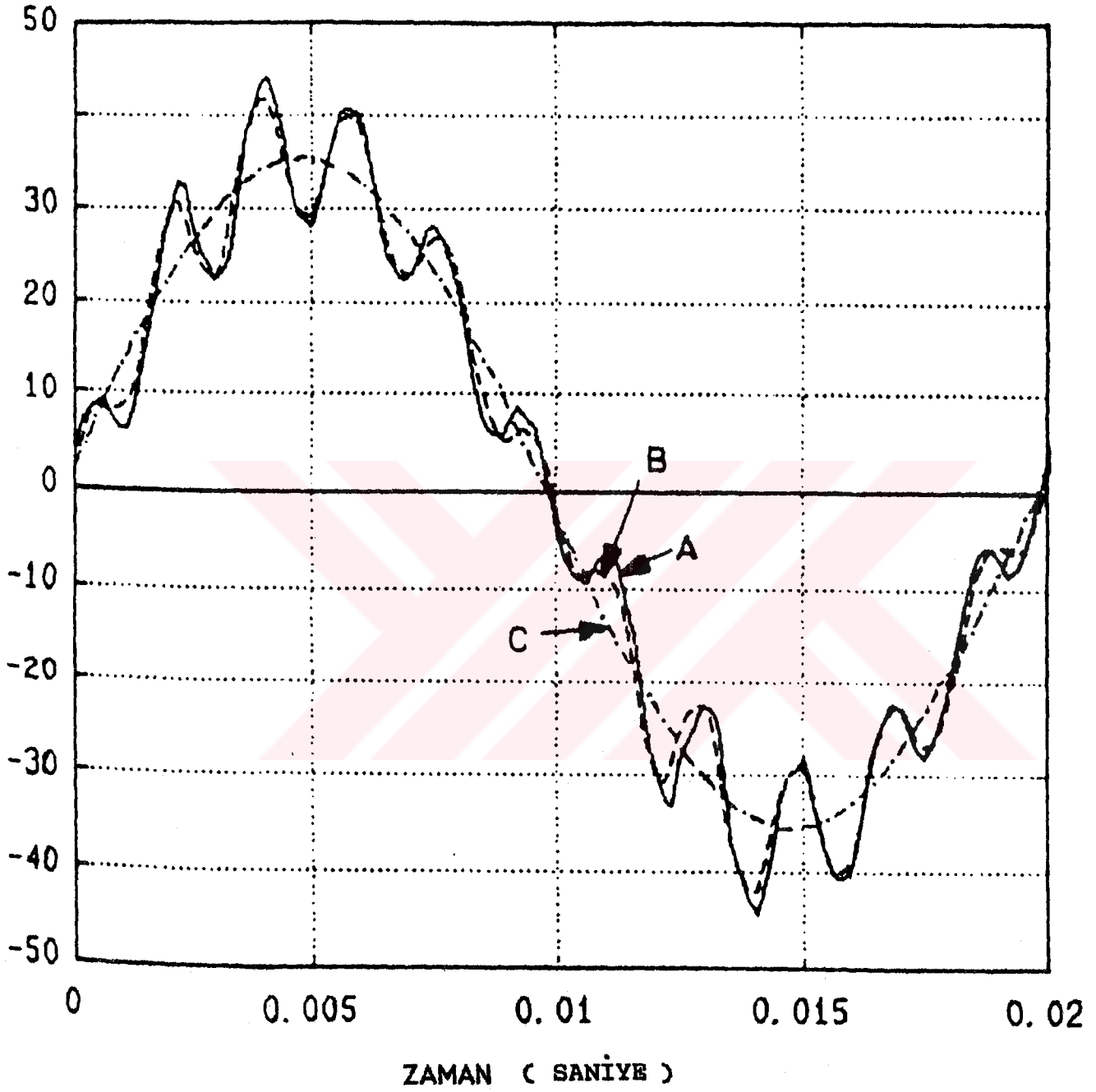


$$\alpha_1 = 0^\circ, \mu_1 = 10^\circ, \mu_2 = 4.2^\circ$$

$$\alpha_2 = 40^\circ, \mu'_1 = 10^\circ, \mu'_2 = 1.3^\circ$$

Şekil<sup>17</sup> 7.3. Lokomotif giriş akım dalga şekli

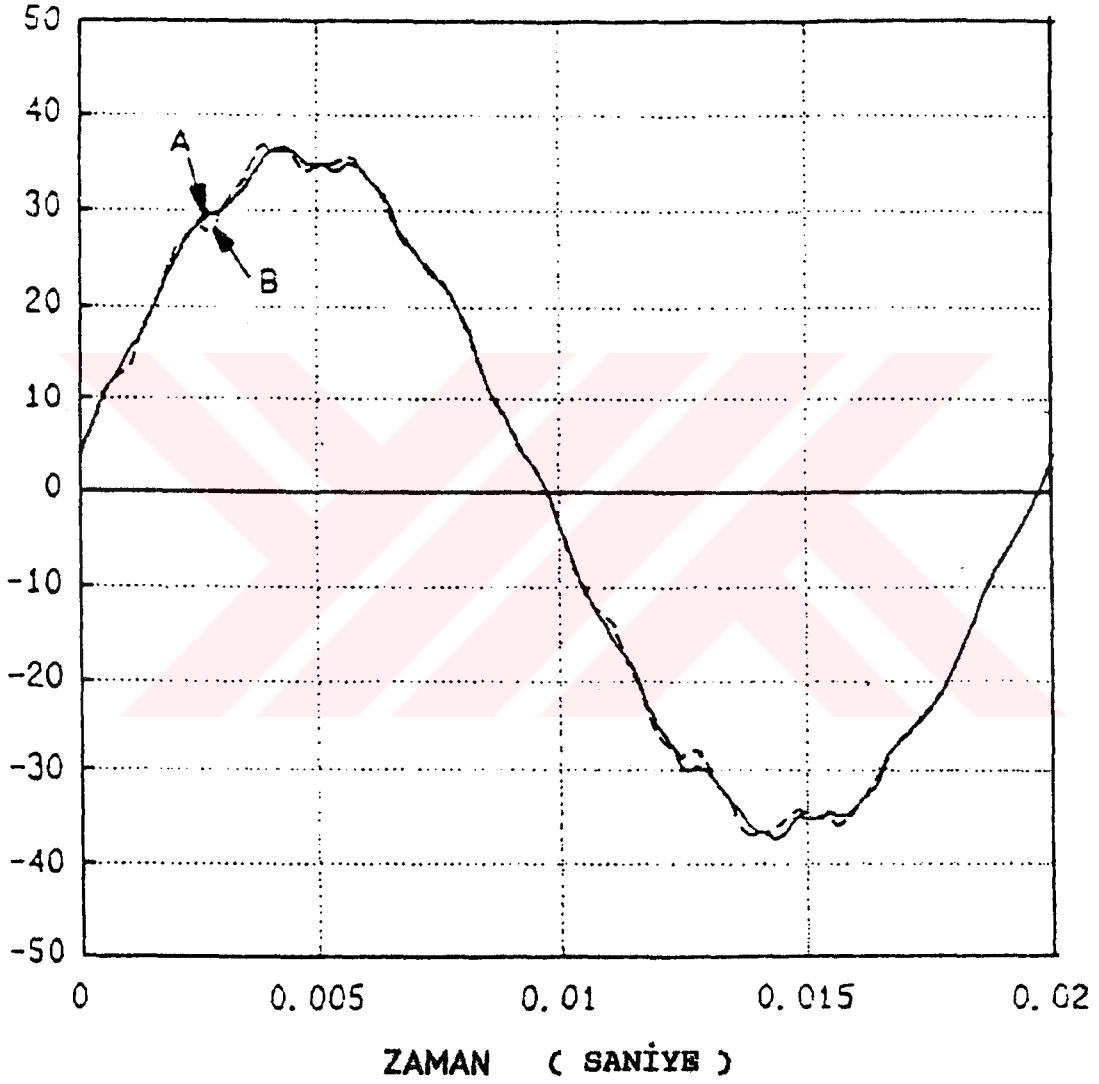
GERİLİM ( kV )



- A - Ölçülmüş gerilim dalga şekli
- B - Simüle edilmiş gerilim dalga şekli
- C - 25 kV rms referans gerilimi

Şekil<sup>17</sup> 7.4. Pantograf gerilim dalga şekli ( 95 km )

GERİLİM ( kV )



A - Ölçülmüş gerilim dalga şekli

B - Simüle edilmiş gerilim dalga şekli

Şekil<sup>17</sup> 7.5. Callemondah 'daki ( 0 km.) katener sistem gerilim dalga şekli



### 7.3 Elektrikli Demiryollarının Katener Hatlarındaki Duran Dalga Olayı ve Rezonans Koşulları

Bu kısımda , birinci örnekte bahsedilen ve elektrikli ulaşım sistemlerindeki katener hatlarında meydana gelen duran dalga ve rezonans olayı tanıtılmış , ayrıca bunlara karşı alınacak önlemler özet olarak verilmiştir.

Modern ac besleme sistemlerinde çer motorları , değişken gerilim ve frekanslı PWM eviriciler üzerinden beslenmektedirler. Bu sistemlerden dolayı , katener hattına yürüyen dalgalar olarak her iki yönde yayılan akım harmonikleri dahil edilmektedir. Bu yürüyen dalgalar , besleme yardımcı istasyonları ya da ray üzerindeki diğer lokomotiflerden yansımaktadır. Hattın elektriksel öz frekanslarında yansıyan ve giden dalgaların kesişmesi sonucunda duran dalgalar oluşmaktadır.

Bu rezonans koşulu , hatta büyük akımların geçmesine neden olmaktadır.Hattın belirli kısımlarında bu akımların genliği , giriş harmonik akımlarının birkaç katına kadar çıkabilir. Hareket halindeki aracın yeri değişken olduğundan , hattın öz frekansları da buna bağlı olarak değişeceğinden , birkaç yüz Hz. ile 5 kHz. arasında rezonans olayları görülebilir.Pratik bir katener hattında, elektriksel süreksizliklerin sayısına bağlı olarak , 10 civarında öz rezonans frekansı oluşabilir. Bunlar , aşağıda verilen iki koşula göre değişken sönüm katsayılarıyla karakterize edilirler.

- 1) Yürüyen dalga tarafından kaplanan hat mesafesi ,
- 2) Hattın elektriksel parametreleri .

Belirli topografik koşullar altında , hattın öz frekansları harmonik akımların herhangi birinin maksimumuyla çakışabilir. Bu gibi durumlarda , sinyalizasyon sistemi ve tren haberleşmesi üzerinde elektromagnetik girişim problemleri gözlenebilir.

Bu olumsuz etkiler , aşağıda sıralanmış olan önlemler ile azaltılabilir.

- 1) Katener hattındaki rezonans koşullarının zamana bağlı olarak belirlenmesi ,
- 2) Her bir rezonans frekansının uyarılma durumunun belirlenmesi ,
- 3) Dönüştürücü kontrolündeki optimum PWM dalgasının üretilmesi.

#### 7.4 İkinci Örnek Yeni Zelanda ' da Devreye Alınmış Olan Cer Sisteminin Simülasyonu

##### 7.4.1 Giriş

Bu kısımda ise , ikinci bir örnek sistem olarak Yeni Zelanda ' nın North Island hattında devreye alınmış olan, bir sistemin bilgisayar simülasyonu verilmiştir. Bu örnek<sup>18</sup> , dip not olarak verilen kaynaktan yararlanılarak hazırlanmıştır.

Yeni Zelanda Demiryolu Şirketi ( NZRC ) tarafından, North Island ana hattının ( NIMT ) elektrifikasyonu yapılmıştır. 45 geçiş halkalı , raylar arası uzaklığı 1087 mm. olan tek fazlı bir demiryolu , 580 km. ' lik bir mesafe ile iki eyaleti birbirine bağlamaktadır.

Demiryolu , nominal geriliminin 25 kV olması için üç fazlı bir ototransformatör sistemi kullanılarak ( AT ) , 50 kV ' luk şebekeden beslenmektedir. Bu hat , genelde yük için kullanılmaktadır ve NZRC toplam tonajının % 40 ' ını taşımaktadır.

<sup>18</sup> MELLITT , B. et al ALLAN , J. , SHAO , Z.Y. , JOHNSTON, W. B. , HOOPER , A. , DENLEY , M. R. , 1989. Harmonic Characteristics of Traction Loads on New Zealand ' s Newly Electrified North Island Line , vol. 5. , p.392-396. U.K.

Merkezi hat yüksek rüzgar ve ağır kış koşullarına maruz kalmaktadır. Bu örnekte, tristörlerle kontrol edilmiş olan bir lokomotifin etkilerini önceden tahmin etmek için geliştirilmiş bilgisayar simülasyon modelleri ele alınmıştır.

#### 7.4.2 Şebekenin tanıtımı

Örneğimizde ana dağıtım şebekesi için , 220 veya 110 kV alt dağıtım için ise 66 kV gerilim seviyesi kullanılmaktadır. Üretim ağırlıklı olarak South Island 'daki hidro elektrik santralinden , 600 MW 'lık HVDC ( Yüksek doğru gerilim ile iletim ) hattı ile sağlanmakta ve bu hat , North Island yükünün % 30 ' unu beslemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu güçlüklerin yanında South Island 'ın Tiwai noktasında alüminyum ergitme tesisi bulunmaktadır. Bu özel şebeke koşullarından dolayı harmoniklerin sıkı kontrolü gerekli görülmüştür. Demiryolu işletmesine bağlı olarak elektrik şirketi tarafından istenilen şartlar , aşağıda sıralanmıştır :

##### 7.4.2.1 Harmonik akım

Ortak bağlantı noktasındaki harmonik akımlar , tek sayılı harmonikler için nominal hat geriliminin ( kV ) 13.n ile ( n harmonik derecesi ) , çift sayılı harmonikler için ise 39.n ile bölünmesi sonucu elde edilen değeri aşmamalıdır.

##### 7.4.2.2 Psfometrik ( Gürültü ) akım

110 kV ' da 1.3 amperi , 220 kV ' da 2.6 amperi geçmemelidir.

##### 7.4.2.3 Gerilim bozulması

Gerilim bozulması , nominal besleme geriliminin yüzdesi olarak , ortak bağlantı noktasında tek harmonikler için

% (20/3n) 'i , çift harmonikler için % (20/9n) 'i aşmamalıdır.

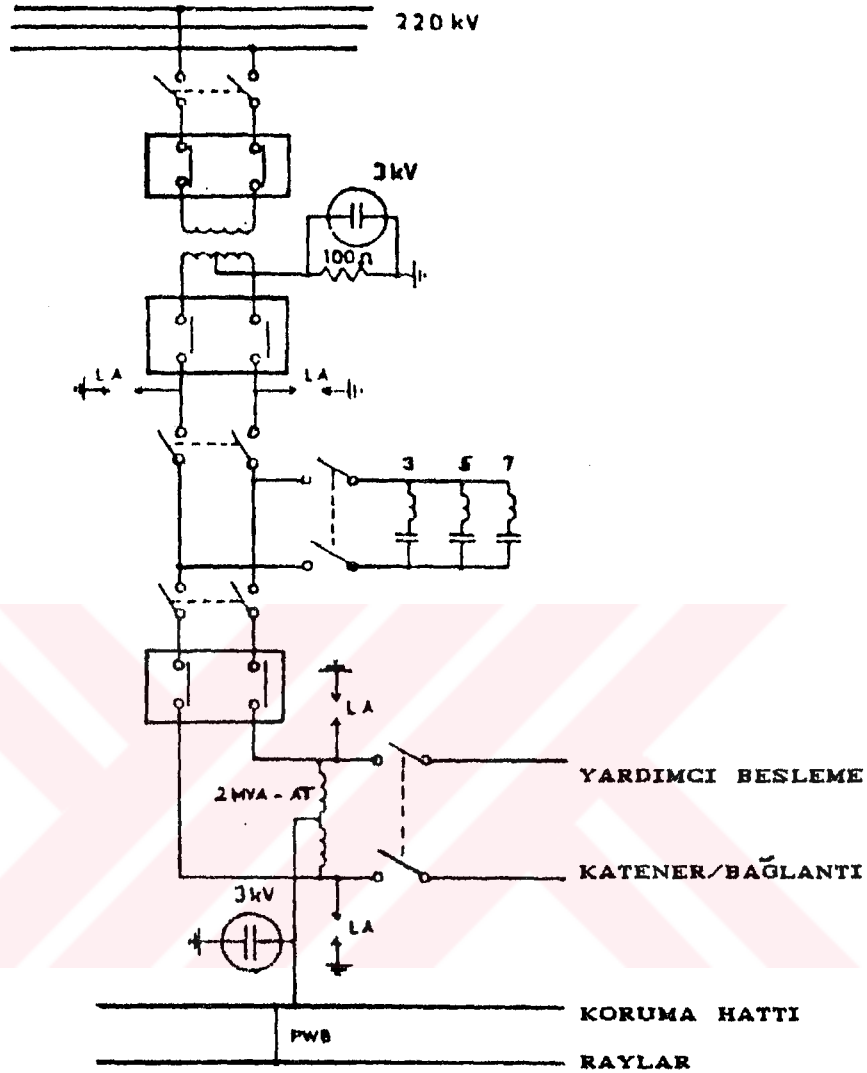
Bunların dışında , dalgalılık kontrolü için bazı frekansların kullanılmaması , maksimum sürekli negatif faz sequence bileşen gerilimlerinin %2 ile sınırlanması ve yük güç katsayısının 0.95 'den (geri) daha iyi olması gibi zorunluluklar bulunmaktadır.

Ayrıca , telefon şebekeleri etkilenmeyecek şekilde tüm önlemler alınmıştır. Bu önlemler , bazı bölgelerde telsiz telefonların telli hale getirilmesi ve demiryoluna yakın bölgelerde , ilave ekranlama yapılması şeklindedir.

#### 7.4.3 Güç sisteminin seçimi

Bu örnekte ilk olarak, yardımcı transformatörler ile seri bağlı 25 kV 'luk bir güç sistemi kullanılmıştır. Fakat bu sistemle yüksek gerilim iletimini sağlamak için , 13 ac alt istasyona gereksinim olmuştur. Lokomotiflerdeki 25 kV 'u ayarlayan ototransformatörlü , 50 kV 'luk demiryolu hattı bu düzenleme için uygun ve ekonomik görülmüştür. Ancak , şirketler tarafından belirlenen harmonik sınırlara göre ac alt istasyonlarının 110 kV 'daki kullanımı kabul edilmemiştir. Demiryolunun 220 kV 'luk donanımlardan beslenen 4 ac alt istasyonu ile çalışabileceği kabul edilmiştir. Ancak , herhangi bir alt istasyonun tamamen devreden çıkması demiryolu üzerindeki çalışma koşullarını etkilemektedir.

25-0-25 kV 'luk nominal değerlere sahip 3 fazlı bir çar kaynağını sağlamak için kullanılan , 220 / 55 kV 'luk bir alt istasyonun genel düzenlemeleri Şekil 7.6 'da gösterilmiştir.



Şekil<sup>18</sup> 7.6. 220 / 55 kV besleme şekilleri

#### 7.4.4 Elektrikli lokomotifler

Örneğimizdeki lokomotifler, 106.5 ton ağırlığındadır ve maksimum çekme kapasitesi 300 kN'dur. 3 MW'lık sürekli bir güce sahip olan lokomotif, 105 km/h hızındadır. Lokomotif vakumlu bir devre kesicisi üzerinden ana trafonun (4456 kVA) primer sargılarını besleyen tek hatlı bir pantografa sahiptir. İki sekonder sargı, üç tane paralel bağlı serbest uyarımlı çer motoru için, endüvi gerilim dönüştürücüsünü (2140 kVA) meydana

getiren iki seri bağılı tristör köprüyü beslemektedir. Çift köprü düzenlemesi , harmonik akımları azaltmak ve güç faktörünü düzeltmek için seçilmiştir. Üç çer motoru ise , iki tristör köprüsü tarafından kontrol edilmekte ve diğer sekonder sargılardan beslenmektedir. Lokomotivin bir özelliği de dinamik frenlemenin mümkün olmasıdır. Bu , alan akım yönü ters çevrilmiş olan tam kontrollü dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güç faktörü düzeltme donanımı lokomotive monte edilmiş ve lokomotiv yükünün bir fonksiyonu olarak anahtar kontrollü kapasite grubu şeklini almıştır. Şirketlerin belirlediği harmonik sınırlamalarına göre aşağıdaki koşullar gözönüne alınmaktadır :

#### 7.4.4.1 Psöfometrik ( Gürültü ) akım

Pantograftaki ( 25 kV ) psöfometrik akım ,  $9.6 \pm 1$  amperi geçmemektedir.

#### 7.4.4.2 Harmonik akımlar

Pantograftaki bu akımlar , Tablo 7.1 ' de verilen değerleri aşmamaktadır.

#### 7.4.5 Güç sistemi için bilgisayar simülasyonu

Tek fazlı güç sisteminde tristör kontrollü çer yüklerinin etkileri dikkate alınmıştır. Temel frekans değerinde gerilim regülasyonu ve güç katsayısıyla birlikte , çer sisteminin yarattığı harmoniklerin etkileri önemlidir.

Yayılmış kapasite ve endüktansa sahip olan , havai hattan beslenen demiryollarında , paralel rezonans etkilerinin olasılığı dikkate alınmalıdır. Bilindiği gibi , güç sistemlerinde yeterli bastırma filtreleri kullanılmadığından, tren geriliminde önemli bozulmalar oluşabilir. Bu uygulamada lokomotiv , dinamik frenleme modunda çalışırken, evirici modunda çalışan tristör dönüştürücülerinin hat

gerilim komütasyonu gerektiğinden , bu çeşit bozulmalar problem yaratmaktadırlar. Bu tip sistem etkilerini ifade edebilmek için uygun bir metod araştırmasında ; frekans domeninde , tek hatlı bir demiryolunu ve buna ait 50 kV 'luk devre elemanlarını göstermek için , bir güç sistem simülatörü geliştirilmiştir.

18

Tablo 7.1. Sınıf 30 elektrik lokomotifinin tepe harmonik akımları

FREKANS (Hz)	İZİN VERİLEN MAKSİMUM DEĞER (A)	TESTLER ESNASINDA ÖLÇÜLMÜŞ OLAN LOKOMOTİV PRİMER AKIMI	
		MOTOR ÇALIŞMA	FREN ÇALIŞMA
150	32.8	32.0	20.0
250	19.2	18.6	11.0
350	12.8	12.0	8.4
450	8.03	6.9	4.9
550	5.42	4.3	4.8
650	4.31	3.7	3.8
750	3.09	2.9	2.8
850	2.35	2.8	2.2
950	2.60	2.7	2.4
1050	2.54	1.9	1.7
1150	2.29	2.1	2.0
		(A)	(A)

Böyle bir simülatörde , değişik güç sistem iletkenleri arasında bulunan elektromagnetik ve elektrik alan kuplajlarının dikkate alınması gerekmektedir. Bununla beraber, toprak ve ray-toprak geçiş direncindeki değişimlerin sistemdeki toprak kaçak akımlarının belirlenmesi için, hesaba katılması zorunlu olmaktadır. Son olarak , sistemdeki ray bağlantıları , trafolar , filtreler ve cer yüklerinin toplu parametreler ile gösterilmesi de gereklidir.

Temel olarak simülatör , 50 kV 'luk güç devresi çözümüyle , düğüm denklemlerinin , hat akımlarının ve kol akımlarının belirli bir frekans durumundaki çözümlerini vermek amacıyla kullanılmıştır. Temel frekansın dışındaki çözümler için sistem uyarım kaynakları , lokomotif kontrolunda kullanılan tristör dönüştürücüleri ile birlikte

akım generatörleri olarak modellenmiştir. Bu çözümlerin tümünün birleşimiyle , temel yük akışının ve çer sisteminin yarattığı etkiler elde edilmiş olmaktadır.

#### 7.4.6 Pratik test programı

NZRC yetkilileri tarafından bir seri pratik deney yapılmıştır. Aşağıda her bir eleman ile ilgili olarak yapılmış olan uygunluk testleri verilmiştir.

##### Lokomotif :

- Harmonik spekturum ,
- Psöfometrik ( Gürültü ) akım ,
- Güç faktörü ,
- Faydalı frenlemedeki enerji transferi ,
- 25 kV beslemedeki gerilim bozulması.

##### Yardımcı İstasyonlar :

- Ortak bağlantı noktasındaki harmonik gerilim bozulması ,
- Yardımcı istasyondaki harmonik akımlar ,
- Sistem güç faktörü .

##### Sinyalizasyon :

- Ray devrelerindeki bozulma etkileri ,
- Hat kablolarında oluşan gerilimler.

##### Haberleşme :

- Hat kablolarındaki gürültü gerilimi ,
- Bakır kablolarda oluşan gerilim.

Örneğimizde , lokomotif için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

Bu örnekte , bilgisayar temelli bir işlem donanımıyla



Y. Zelanda 'daki tren şebekesinin uyumluluk testleri gerçekleştirilmiştir. Palmerston North 'da kurulan bu düzenek yardımıyla , bir gece boyunca deney kayıtları işlenmiştir. Bu düzende , Fourier dönüşümünün anlık zaman domeni incelemeleri 0.2 s ile 1800 s arasında değişmektedir. Sistem hem grafik hem de tablolama şeklinde çıkışlar verebilmektedir. Sistem etkilerinin incelenmesi için çok kullanılan zaman tabanlı tipik bir örnek , Şekil 7.8 'de gösterilmektedir.

#### 7.4.7 Lokomotif için alınan test sonuçları

##### 7.4.7.1 Harmonik spektrum

Değişik tren hızları ve yük koşullarında farklı yüklenme durumları için , bir çok deney yapılmış ve tüm güç sistem harmonikleri hesaplanmıştır. Yaklaşık olarak 140 A ( Motor çalışma ) sabit bir primer akımı ve tepe gücünde 80 A 'lik ( Fren çalışma ) bir frenleme akımı ile çalışan tek bir lokomotif için , 23. harmoniğin ölçülen tepe akımları Tablo 7.1 'de gösterilmiştir. Bu değerler , izin verilen değerler ile karşılaştırılır.

##### 7.4.7.2 Psfometrik ( Gürültü ) akım

DeneySEL sonuçlardan lokomotifin psfometrik akım gereksinimini karşıladığı görülmüştür. Tüm deneylerde ölçülen tepe akım değeri 9.7 A 'dir. Lokomotif normal çalışma devrinde yaklaşık 50 dk. çalıştığında , ölçülen psfometrik akımdaki değişimler , Şekil 7.9 'da gösterilmektedir.

##### 7.4.7.3 Güç katsayısı

Şekil 7.10 ' da 50 dakikalık aynı test periyodu için ölçülen güç katsayısı ve buna ilişkin güç (motor ve frenleme olarak) görülmektedir. Verilen örnekteki şirketler, normal olarak diğer alıcılardan istediği 0.95 güç katsayısını 23.00 ve 07.00 saatleri arasında, elektrikli

ulaşım sisteminden talep etmemektedirler. Şekil 7.10 'dan görüldüğü gibi , motor ve frenleme tepe güçleri için, kabul edilen güç faktörü , sırasıyla 0.9 ve 0.7 'dir.

#### 7.4.7.4 Faydalı frenleme sırasındaki enerji transferi

Pratik testler esnasında , motor ve fren modunda çalışan trenler arasında enerji transferinin gerçekleştiği kanıtlanmıştır.

#### 7.4.7.5 Gerilim bozulması

Pantograf gerilimindeki ölçümlerden , dönüştürücü çalışma durumunda , bozulmanın öngörülen sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Tablo 7.2 'de normal çalışma modunda çalışırken , en düşük harmonikler için ölçülen maksimum harmonik gerilimlerin tipik değerleri verilmiştir. Bununla beraber öngörülen geniş gerilim çalışma aralığında ( 17.5 kV - 30 kV ) maksimum evirici gecikme açısının ölçülen kaynak geriliminin bir fonksiyonu olarak ayarlanması sağlanmış ve elektriksel fren gücünün maksimum kullanımı gerçekleştirilmiştir.

18

Tablo 7.2. Normal alışma çevrim testi sırasında pantografda ölçülmüş olan harmonik gerilimler

HARMONİK FREKANSI (Hz)	Harmonik Gerilimlerin Maksimum Değerı (rms)			
	MOTOR ALIşMA		FRENLEME	
150	1.1	3.8	0.95	3.3
250	1.0	3.4	0.6	2.0
350	0.46	1.6	0.3	1.0
	(kV)	(%)	(kV)	(%)

#### 7.4.8 Yardımcı istasyonlar için test sonuçları

##### 7.4.8.1 Harmonik gerilimler

Tek sayılı harmoniklerin değerleri , nominal 55 kV bara

geriliminin bir yüzdesi olarak Tablo 7.3 'de verilmektedir. Bu ölçümler sonucunda , harmonik gerilimlerin 220 kV 'luk üst gerilim şebekesine olan etkileri , en kötü koşul için dahi kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır.

Tablo<sup>18</sup> 7.3. 55 kV gerilim seviyesinde ölçülmüş olan gerilim harmonik bozulması

n	55 kV BARASINDAKİ HARMONİK GERİLİMLER ( % )					55 kV ÖLÇÜM NOKTASINDA MÜSAADE EDİLEN MAKSİMUM HARMONİK GERİLİM
	TEK TREN TESTİ		ÇİFT TREN TESTİ		NORMAL ÇALIŞMA ÇEVİRİM TESTİ	
	MAKSİMUM	TAM İLETME	MAKSİMUM	TAM İLETME		
3	4.0	2.5	0.4	4.2	3.1	21.4
5	2.4	1.5	4.0	3.0	2.7	12.8
7	1.1	0.5	2.2	1.5	0.9	9.2
9	3.0	1.8	5.0	4.0	4.0	7.1
11	4.7	1.8	7.5	4.5	4.2	5.8
13	4.2	1.3	4.9	2.9	3.1	4.9
15	1.5	0.7	3.8	1.2	1.3	4.3

Tabloda , n harmonik derecesini gösterir. 220 kV gerilim seviyesine dönüştürmek , kaynak endüktansları ve transformator empedanslarını hesaba katmak için , 0.105 'lik bir çarpan gerekmektedir.

#### 7.4.8.2 Harmonik akımlar

220 kV 'luk sisteme dahil edilen harmonik akımların değişik çalışma koşulları için değerleri Tablo 7.4 'de verilmiştir. Bu akımlar , 55 kV barasındaki besleme akımı , ray ve filtre akımlarının aynı gerilim bazına indirgenmesiyle hesaplanmıştır. Bazı tepe değerleri izin verilen değerleri aşırsa dahi , bunlar herhangi 20 ms. 'lik periyotlarda oluşan mutlak maksimum değerlerdir.

18  
Tablo 7.4. 55 kV gerilim seviyesinde ölçülmüş olan harmonik akımlar

n	55 kV BARASINDAKİ HARMONİK AKIMLAR (A)				NORMAL ÇALIŞMA ÇEVİRİM TESTİ	ŞİRKET LİMİTLERİNE GÖRE ,220 kV SEVİYESİNDE MÜSAADE EDİLEN MAKSİMUM AKIM (A)
	Tek Tren		iki Tren			
	Tepe Değeri	Ort. Değeri	Tepe Değeri	Ort. Değeri		
3	4.8	2.8	7.6	5.4	3.3	5.7
5	2.3	1.4	3.2	2.2	2.7	3.4
7	1.3	0.7	2.3	1.8	0.9	2.5
9	1.7	0.8	2.4	2.0	1.2	1.9
11	1.9	0.2	2.7	1.7	1.2	1.6
13	1.4	0.5	1.8	1.0	0.7	1.4
15	0.6	0.2	1.1	0.4	0.3	1.2

#### 7.4.8.3 Sistem güç faktörü

Harmonik filtrelerin güç katsayısı düzeltme etkisi ve diğer etkiler de dahil olmak üzere tüm cer sisteminin güç katsayısı , 55 kV barasında ölçülmüştür. Sonuçlar aşağıda sıra ile verilmiştir.

1 ) Bir trenin 3.5 MW 'lık güçle motor olarak çalışması durumunda , sistemin güç katsayısı 0.96 geri , lokomotifin güç katsayısı ise 0.9 geri olarak ölçülmüştür.

2 ) İki tren yaklaşık olarak , herbiri 3.5 MW 'lık güçle çalıştığında sistem güç faktörü 0.89 geri olmaktadır.

3 ) Bir trenin yaklaşık 2 MW 'lık güçle frenlenmesi halinde lokomotif güç katsayısı 0.65 geri , sistem güç katsayısı ise 0.885 geri olmaktadır.

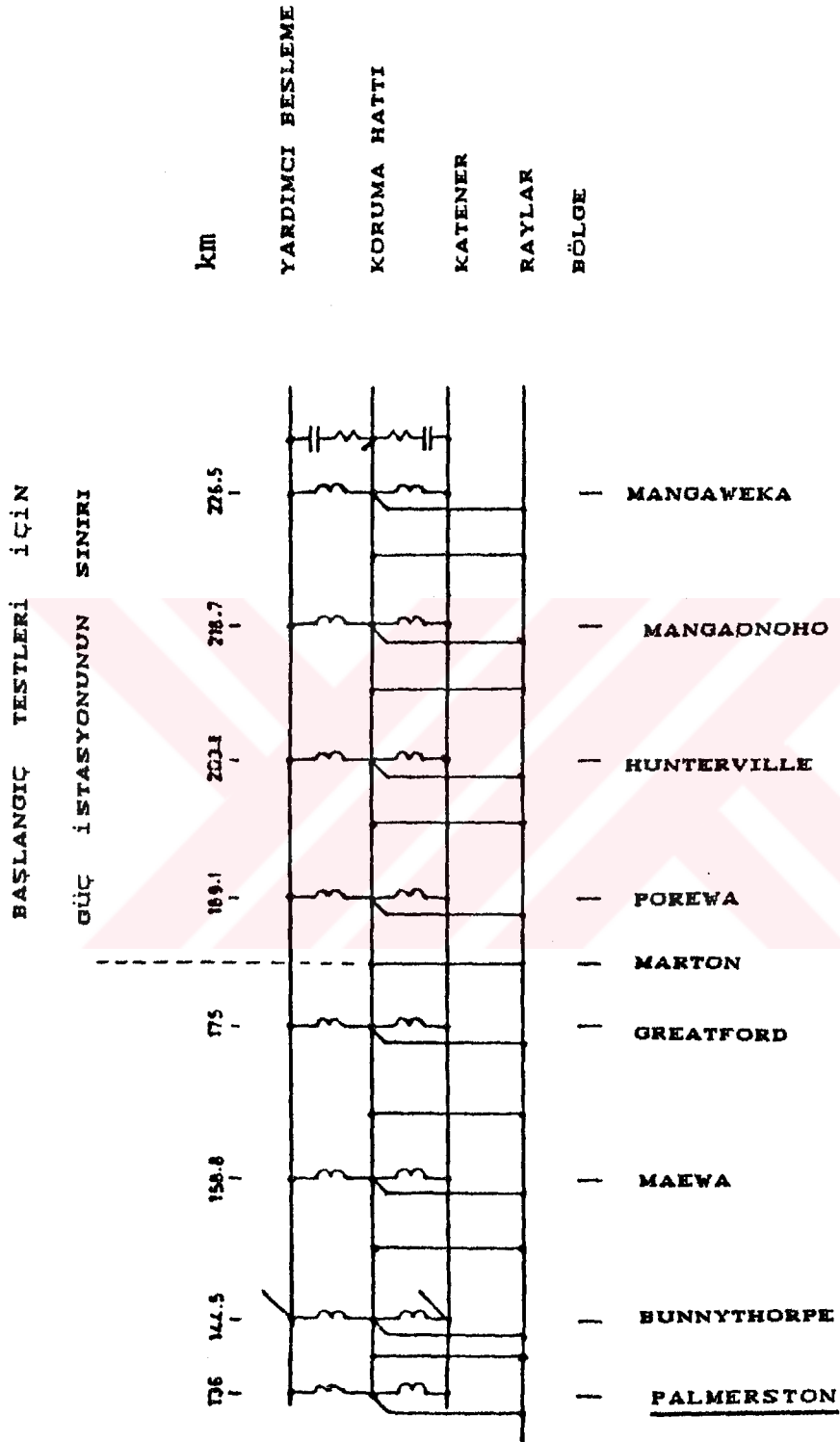
4 ) Her iki trende 2 MW 'lık güçle frenlendiğinde, sistem güç katsayısı 0.71 geri olarak ölçülmüştür.

5 ) Bir tren , motor (3.5 MW) diğer tren de fren (2 MW) modunda çalıştığı zaman , sistemin güç katsayısı yaklaşık 0.64 endüktif değerindedir.

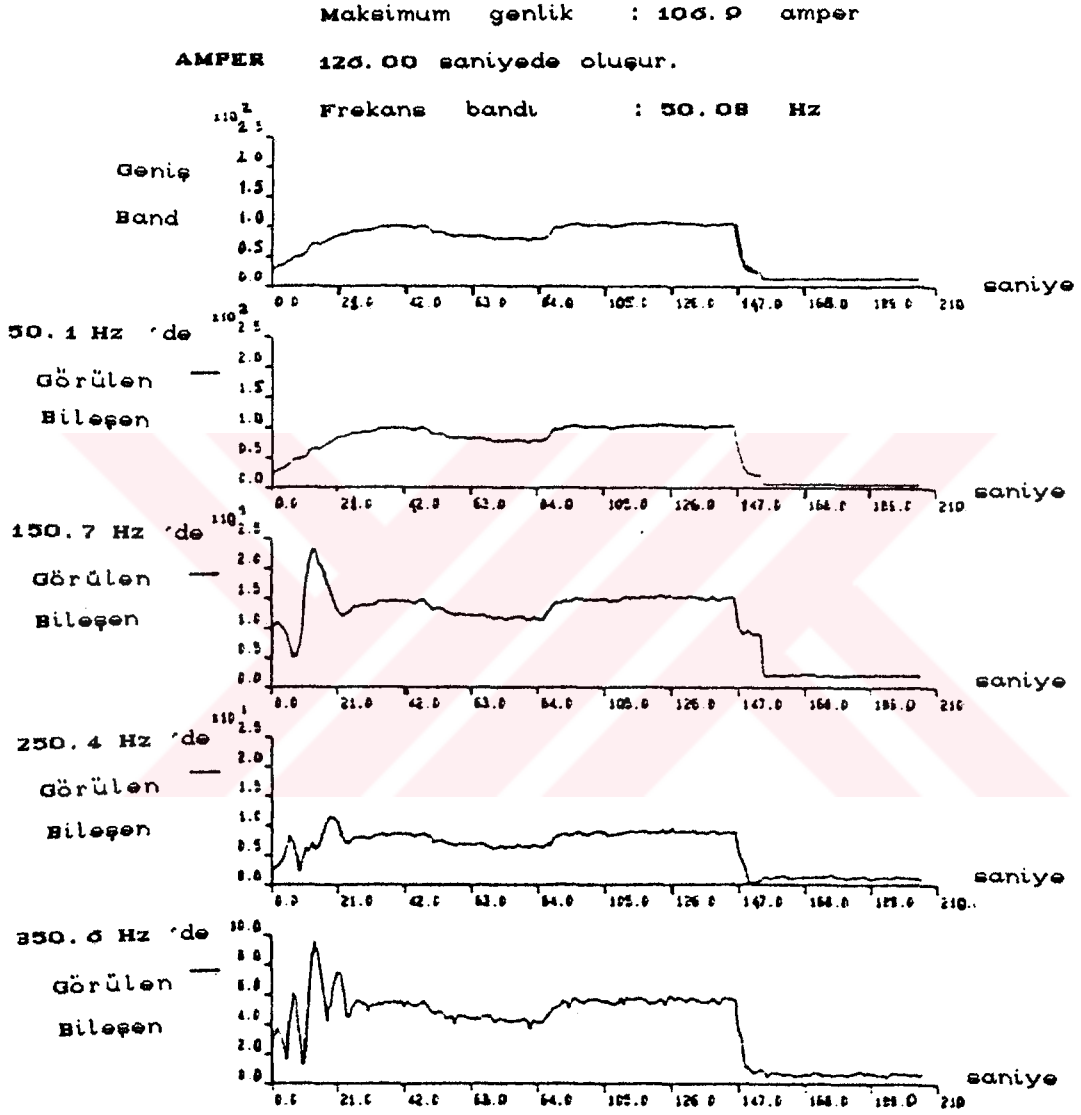
---

<sup>18</sup>

MELLITT , B. et al ALLAN , J. , SHAO , Z. Y. , JOHNSTON, W. B. , HOOPER , A. , DENLEY , M. R. , 1989. Harmonic Characteristics of Traction Loads on New Zealand 's Newly Electrified North Island Line , vol. 5 , p.392-396 , U.K.

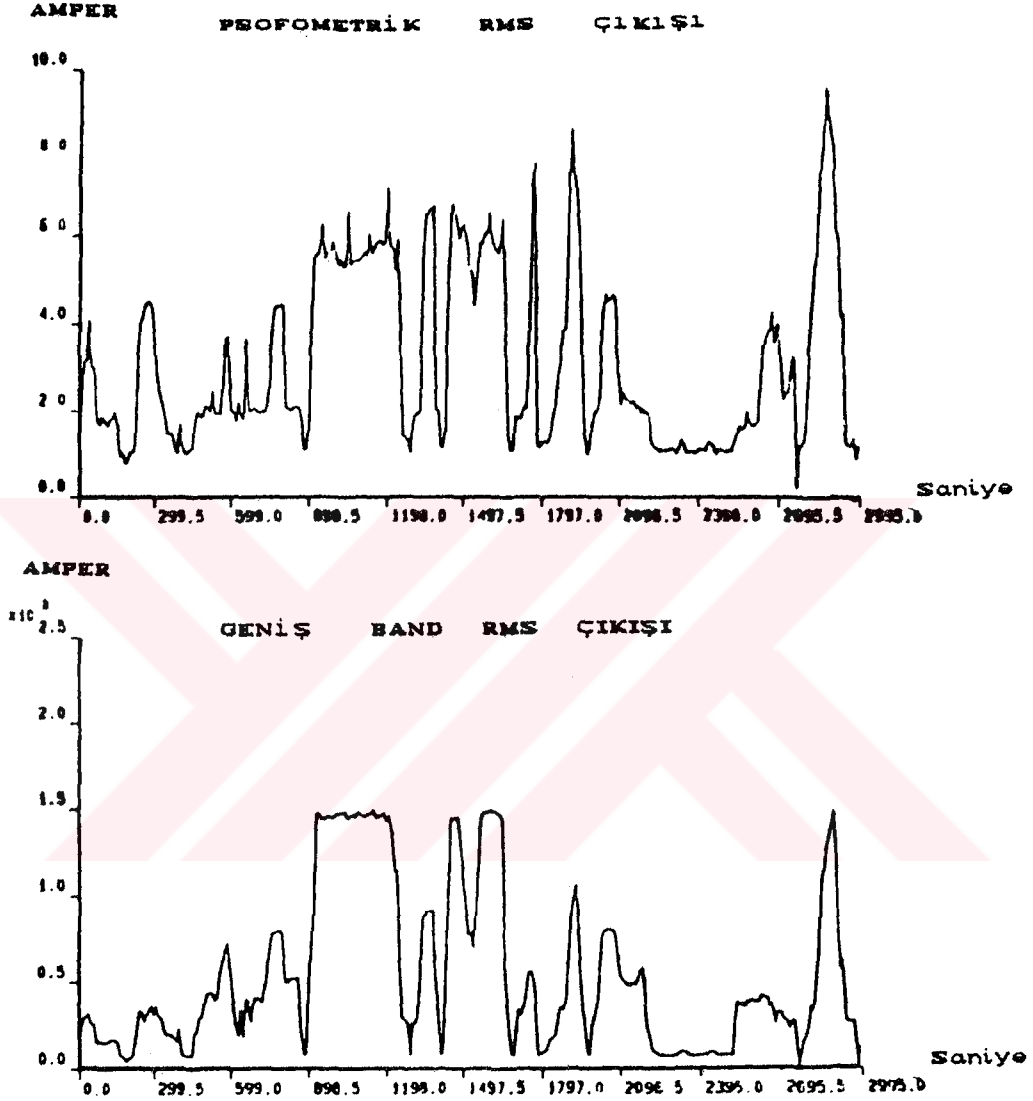


1B Şekil 7.7. Test kısmı için besleme düzenlemeleri



AKIM TRAFOSUYLA ÖLÇÜLMÜŞ LOKOMOTİV PRİMER AKIMI  
 Şekil<sup>1B</sup> 7.8. Lokomotif çer akım harmonikleri

Maksimum genlik : 9.52 amper  
2800.00 saniyede olur.



Testin ayrıntıları :

FFT hesaplaması 256 örneğe göre yapılmıştır.

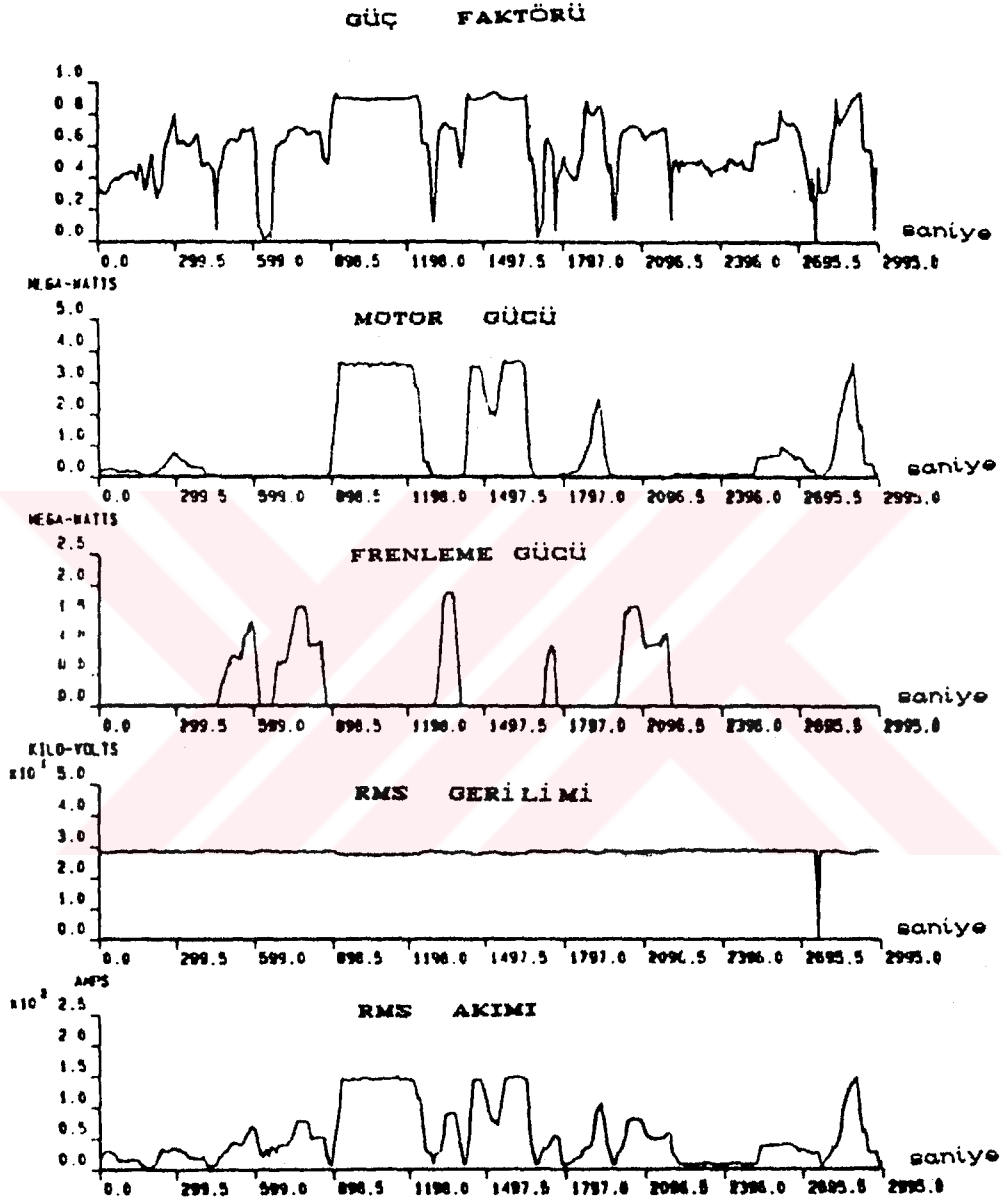
Frekans çözümü 48.8 Hz 'dir.

Test günü : 26. Ağustos 1987

18

Şekil 7.9. Lokomotif psfometrik akımı





Testin ayrıntıları :

Test günü : 26 Ağustos 1987

Transdüser kalibrasyonu : gerilim LVT

akım LCT

Şekil <sup>18</sup> 7.10. Lokomotif güç faktörü

## BÖLÜM 8

### İDEALTEPE TRAFİ İSTASYONUNDA YAPILAN ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRMELER

#### 8.1 Giriş

Bu bölümde son olarak , Haydarpaşa - Çayırova arası 37 km 'lik hattın 12. kilometresinde kurulmuş olan İdealtepe trafo merkezinde , 21.4.1993 tarihinde , 06 :13 ile 08 : 20 saatleri arasında birer dakika ara ile alınmış değerler tablolar halinde verilmiştir. Yük sürekli olarak artmakta ve trafolar aşırı yük altında kalmaktadır.Farklı günlerde güç dağılımı her dakika aynı olmamaktadır. Çünkü ana hat trenleri , banliyö bölgesine her gün aynı saatte girmediğinden , yapılan ölçümlerde güç ve akım karakteristikleri değişmektedir.

Haydarpaşa - Gebze - Haydarpaşa arasında üçlü diziler halinde banliyö trenlerinin ve E.43000 tipi lokomotiflerinin Haydarpaşa - Adapazarı hattında çalışması sonucu İdealtepe trafo merkezinde çekilen akım , çıkış kesicilerinin gücünü aşmakta ve sık sık açmaya neden olmaktadır. 1979 yılında iki trafo, 1985 yılında bir trafo yanmıştır. Tüm bu bilgiler , TCDD işletmesinden elde edilmiştir. Bu nedenle en yüklü hat olarak İdealtepe trafo merkezi ele alınmaktadır.

#### 8.2 İdealtepe Besleme Merkezi

Bu yardımcı istasyonda , 2 adet 7.5 MVA gücünde , 154 ± 2 x 5 % / 27.5 kV gerilimli tek fazlı , yağ

soğutmalı ,  $u_k = 6.32 \%$  etiket değerlerine sahip , indirici transformatörler , doğu ve batı yönüne doğru dört katener hattını beslerler.

### 8.2.1 Güç trafolarının karakteristikleri

S	: 7500 kVA	$I_1$	: 48.7 A
$U_1$	: 154 kV	$I_2$	: 272 A
$U_2$	: 27.5 kV	$u_k$	: 6.32 %
Boştaki kayıplar	: 11.8 KW		
Tam yükteki kayıplar	: 33.23 KW		
Soğutma sistemi	: ON AF		
Empedans	: j 5.29 ohm		

Güç trafoları , 05:30 - 09:00 ve 17:00 - 21:00 saatleri arasında paralel çalışmakta , diğer zamanlarda ise tek değişimli olarak çalışmaktadırlar. İstasyonda , 154 kV , 600 A , 1500 MVA gücünde ve 27.5 kV , 600 A , 250 MVA gücünde yağlı kesiciler bulunmaktadır.

Trafo merkezindeki , akım trafolarının çevirme oranları ve ayarlı bulunduğu değerler , Tablo 8.1 ' de verilir.

Tablo 8.1. Mevcut olan akım trafolarının çevirme oranları ve ayarlı bulunduğu değerler

NO	ÇEVİRME ORANLARI	AYARLI ORANLAR	TOPLAM MİKTARI	DÜŞÜNCELER
1	150/5 A 300/5 A 600/5 A	150/5 A	1	154 kV TRAFOLAR GİRİŞİNDE
2	600/5 A	600/5 A	2	25 kV ÇIKIŞLARDA
3	1000/5 A	1000/5 A	1	TRAFOLAR DÖNÜŞ AKIMI AKIM TRAFOSU
4	200/1 A	200/1 A	2	TANK KORUMA

Tablo 8.2 'de ise , aşırı akım röle tipleri ve ayarlı olduğu değerler gösterilir.

Tablo 8.2. Mevcut olan aşırı akım röle tipleri ve ayarlı bulunduğu değerler

NO	RÖLE TİPİ	AYAR ALANI	BULUNDUĞU AYAR	DÜŞÜNCELER
1	RSA - 100	12 A 10 s	6 A , 4 s	AKIM TRAFOSU 150/5 A
2	RSA - 100	12 A 10 s	5 A , 6 s	AKIM TRAFOSU 600/5 A
3	IA - 11	0 - 6 A	5 A	AKIM TRAFOSU 600/5 A
4	IA-10-10	0 -1.2 A	0.5 A	AKIM TRAFOSU 200/1 A
5	IA - 11	0 - 3 A	2.2 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A
6	IA - 11	0 - 3 A	2.5 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A
7	IA - 11	0 - 3 A	3 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A
8	RMC -160	-	1.8 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A
9	RMC -160	-	2 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A
10	RMC -160	-	2.7 A	AKIM TRAFOSU 1000/5 A

### 8.2.2 Hatta çalışan elektrikli trenlerin karakteristikleri

14000 'lik banliyo dizileri için ;

İşletme gerilimi	: Nominal 25 kV tek faz Maksimum 27.5 kV Minumum 19 kV
Kumanda sistemi	: Tristör-diyot
Frekans	: 50 Hz
Ana transformatörün nominal gücü	: 1620 kVA
Cer devre gücü	: 1405 kVA
Isıtma devre gücü	: 165 kVA
Yardımcı devre gücü	: 50 kVA
Kısa devre gerilimi	: % 7

Cer motorları için ;

Bir ünite de iki adet cer motoru vardır.

Devamlı nominal gücü : 520 KW

Devamlı nominal akımı : 740 A

Devamlı nominal gerilimi: 750 V

1 Saatlik nominal gücü : 555 KW

1 Saatlik nominal akımı : 790 A

Kesici özellikleri ;

Brown Boweri imalatı ,

Tipi : DBTF 30 i 250

Nominal gerilimi : 25 kV

Nominal akımı : 400 A

Kesme gücü : 200 MVA

4000 'lik lokomotifler ;

İmalatçısı : Alsthom

Tipi : Çekirdek

Nominal gücü : 4340 kVA

Isıtma devre gücü : 630 kVA

Aydınlatma devre gücü : 10 kVA

Isıtma gücü : 630 kVA ( Marşandiz trenleri için gerekli olan 7 kVA 'lık güç 630 kVA 'lık ısıtma sar-  
gısından alınacak ve yardımcı devre trafosundan 72 V 'a düşürülecektir. )

43000 'lik lokomotifler ;

İmalatçısı : Toshiba

Tipi : Monofaze tristör kontrollü

Nominal gücü : 3180 KW ( 4325 HP )

Isıtma devre gücü : 600 KW

Aydınlatma devre gücü : 10 KW

Katener gerilim sınırları : 17.5 kV ( Kesici açtırır. )

18 kV (Loko. sıcakta kalıyor  
cer çalışmıyor .)

29.5 kV ( Kesici açıyor ,

28 kV ' da çalışıyor. )

Çer motoru için ,  
 Sürekli kapasite : 530 KW  
 Gerilim : 900 V  
 Akım : 635 A

Havai hattın katöner özellikleri ;  
 Haydarpaşa - Idealtepe : 12 km - 219 m çift hat  
 Idealtepe - Fendik : 14 km - 81 m çift hat  
 25 kV 'luk hattın  
 kısa devre gücü : 250 MVA  
 Hattın empedansı :  $0.009 + j 0.28$  ohm/km

Idéaltepe trafo merkezinin 25 kV tarafı için temel ızalasyon seviyesi değerleri ;

1.2/50  $\mu$ sn darbe dayanım gerilimi (tepe değeri) : 190 kV  
 1 dk. süreli güç frekansı dayanım gerilimi (rms) : 81 kV

### 8.3 Yapılan Ölçümler ve Değerlendirmeler

21.4.1993 günü saat 08:13 ile 08:20 arasında micro-vip cihazı yardımıyla trafoların gerilim , akım , aktif, reaktif güç , enerji ve  $\cos \phi$  değerleri ölçülmüştür. Bu değerler , Tablo 8.3 ve 8.4 ' de gösterilmektedir

Tablolardan da görüleceği gibi , 21.4.1993 günü ilk tepe değeri saat 07:03 'de 705 amper , 19331 kVA olmakta daha sonra saat 07:41 'de 772.8 amper , 23116 kVA ve 07:47 'de 873.8 amper , 22500 kVA değerlerine çıkmaktadır.

Gerilim ve akım değerleri zaman eksenine göre Şekil 8.1 ve 8.2 'de verilir. Fakat alınan bu ölçüm değerleri ile anlık değişimleri görmek mümkün değildir. Bu saatler arasında hatta çalışan trenler gözönüne alınarak , saat 08:50 'den itibaren çekilen akım 550 amperi güç ise 15 MVA ' yı aşmakta ve yaklaşık iki saat süreyle trafolar aşırı yüklenmektedir. Tüm bu aşırı yüklenmeler şebekele-ri olumsuz yönde etkilemektedir.

Ölçülen akım ve gerilim değerleri dikkate alınarak , bu değerlere göre harmonik analiz çalışması yapılmıştır. FFT hesaplamaları ve çizimler MCAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FFT sonuçları Ek. B 'de verilmiş olup , akım değerlerinin FFT hesaplamaları frekansa bağlı olarak Şekil 8.3 ' de gösterilmiştir. Bilgisayar düzenekli bir sistem yardımıyla ölçüm yapma imkanı olmadığı için, bu sonuçları değerlendirmek zor olmaktadır. Özellikle elektrikli ulaşım sistemlerimizdeki yüklü hatlarda , harmonik simülasyon çalışmalarına daha çok yer verilmeli ve bunlara göre gereken önlemler alınmalıdır.



Tablo 8.3. Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler  
( Gerilim , akım , P ( kW ) , S ( kVA ) )

NO	SAAT	GERİLİM ( kV )	AKIM ( A )	P ( kW )	S ( kVA )
1	06:13	150.750	320.8	9075	12505
2	06:14	151.500	319.2	6300	7875
3	06:15	151.500	302.4	5175	6993
4	06:16	151.500	302.4	9225	11980
5	06:17	151.500	252.0	4725	6385
6	06:18	151.500	396.6	7425	10034
7	06:19	151.500	218.4	4350	6690
8	06:20	150.750	352.8	7425	9900
9	06:21	150.750	302.4	6750	9000
10	06:22	150.750	336.0	6975	9178
11	06:23	151.500	386.4	7875	10227
12	06:24	152.250	201.6	4725	6217
13	06:25	151.500	396.6	6525	9062
14	06:26	150.750	386.4	7875	9843
15	06:27	152.250	184.8	3600	4805
16	06:28	151.500	369.6	6525	8817
17	06:29	150.750	352.8	6525	8055
18	06:30	150.750	218.4	3825	5544
19	06:31	150.750	319.2	5850	8013
20	06:32	150.750	184.8	3825	4722
21	06:33	150.750	302.4	5850	7597
22	06:34	151.500	184.8	2700	3970
23	06:35	151.500	268.8	4950	6875
24	06:36	150.750	302.4	8100	10253
25	06:37	151.500	134.4	1350	2812
26	06:38	150.750	487.2	8550	11400
27	06:39	151.500	184.8	3375	4891
28	06:40	150.750	319.2	6975	8611
29	06:41	150.750	235.2	3825	5885
30	06:42	150.750	336.0	6525	8700
31	06:43	151.500	285.6	6075	8437
32	06:44	151.500	396.6	6975	9426
33	06:45	150.750	453.6	9000	12000



Tablo 8.3. (Devam) İdealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( Gerilim , akım , P (kW) , S (kVA) )

NO	SAAT	GERİLİM ( kV )	AKIM ( A )	P ( kW )	S ( kVA )
34	06:46	152.250	252.0	6300	8181
35	06:47	151.500	268.8	4950	6875
36	06:48	150.750	436.8	8775	12020
37	06:49	150.750	386.4	7650	10200
38	06:50	151.500	184.8	3375	4441
39	06:51	150.750	520.8	8325	11725
40	06:52	151.500	201.6	3150	4846
41	06:53	150.750	554.4	11250	14240
42	06:54	150.750	268.8	4500	6716
43	06:55	150.750	436.0	8325	10954
44	06:56	150.750	286.0	5625	7211
45	06:57	150.750	319.0	6075	8437
46	06:58	150.750	319.0	6300	8400
47	06:59	150.750	353.0	7200	10000
48	07:00	150.750	521.0	10850	13618
49	07:01	150.750	386.0	7650	10479
50	07:02	151.500	319.0	6525	9321
51	07:03	150.000	705.0	13725	19331
52	07:04	151.500	285.0	5175	7500
53	07:05	150.000	638.0	11925	16562
54	07:06	150.750	201.0	4950	7071
55	07:07	150.750	319.0	7425	10760
56	07:08	149.250	672.0	11700	16479
57	07:09	150.750	521.0	9900	13944
58	07:10	150.750	487.0	9225	12637
59	07:11	150.750	588.0	11025	15312
60	07:12	150.750	286.0	4500	7758.6
61	07:13	150.750	504.0	9900	13750
62	07:14	150.000	504.0	9675	13253
63	07:15	150.750	520.0	9900	13378
64	07:16	150.000	403.0	7425	11082
65	07:17	150.000	605.0	12825	17100
66	07:18	150.000	538.0	9675	13627

Tablo 8.3. (Devam) İdealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( Gerilim , akım , P (kW) , S (kVA) )

NO	SAAT	GERİLİM ( kV )	AKIM ( A )	P ( kW )	S ( kVA )
67	07:19	150.000	420.0	6975	10257
68	07:20	150.750	403.0	7650	10338
69	07:21	150.000	487.0	9225	12637
70	07:22	150.000	386.0	7200	10140
71	07:23	148.500	588.0	11925	16796
72	07:24	149.250	454.0	6750	9643
73	07:25	149.250	403.0	10575	14687
74	07:26	149.250	554.0	13050	17877
75	07:27	150.000	621.0	12150	16875
76	07:28	149.250	588.0	10350	15000
77	07:29	150.750	336.0	9000	11688
78	07:30	149.250	504.0	11250	15411
79	07:31	150.000	554.0	13725	18059
80	07:32	150.000	504.0	11475	15719
81	07:33	150.000	504.0	9450	13500
82	07:34	150.000	487.0	8775	11546
83	07:35	149.250	453.0	9450	13125
84	07:36	150.000	520.0	9225	12993
85	07:37	150.000	588.0	11700	15600
86	07:38	150.750	403.0	6975	10410
87	07:39	149.250	554.0	10350	15220
88	07:40	150.000	370.0	6750	9507
89	07:41	149.250	772.8	16875	23116
90	07:42	150.750	184.8	2700	4090
91	07:43	150.000	604.8	14625	20312.5
92	07:44	150.750	504.0	9225	13768
93	07:45	149.250	588.0	12150	16875
94	07:46	150.000	386.4	7425	10033
95	07:47	147.750	873.6	15750	22500
96	07:48	149.250	537.6	11025	14318
97	07:49	150.000	453.6	7875	11091
98	07:50	150.000	772.8	12600	17260
99	07:51	150.750	504.0	9000	12328

Tablo 8.3. (Devam) Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( Gerilim , akım , P (kW) , S (kVA) )

NO	SAAT	GERİLİM ( kV )	AKIM ( A )	P ( kW )	S ( kVA )
100	07:52	150.750	487.2	9675	13074
101	07:53	150.000	655.2	12375	16950
102	07:54	150.750	436.8	6975	10568
103	07:55	150.750	336.0	7200	10140
104	07:56	150.750	520.8	10350	13800
105	07:57	150.750	369.6	7200	9729
106	07:58	150.000	386.4	6075	8678
107	07:59	151.500	386.4	6975	10410
108	08:00	151.500	453.6	7200	10434
109	08:01	151.500	285.6	5625	7812
110	08:02	150.750	537.6	9000	11842
111	08:03	150.000	588.0	12600	17027
112	08:04	150.000	588.0	10800	15000
113	08:05	149.250	520.8	9450	13125
114	08:06	149.250	672.0	10800	15428
115	08:07	150.000	571.2	10575	13386
116	08:08	149.250	319.2	5850	8239
117	08:09	149.250	554.4	11025	14318
118	08:10	150.750	218.4	4050	6044
119	08:11	150.000	420.0	6750	10227
120	08:12	150.000	285.6	7200	10285
121	08:13	149.250	470.0	8325	10673
122	08:14	149.250	285.6	4500	6818
123	08:15	158.500	655.2	11700	16250
124	08:16	150.000	285.2	4500	6338
125	08:17	149.250	369.6	6300	9130
126	08:18	149.250	352.8	7200	8888
127	08:19	149.250	420.0	7200	9600
128	08:20	149.250	571.2	12150	16200

Tablo 8.4. Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler  
( kVarh , kWh ve Cos  $\varphi$  )

NO	SAAT	kVarh	kWh	Cos $\varphi$
1	06:13	20745	19282.5	0.77
2	06:14	20835	19395	0.80
3	06:15	20902.5	19462.5	0.74
4	06:16	21015	19597.5	0.77
5	06:17	21105	19687.5	0.74
6	06:18	21217.5	19822.5	0.74
7	06:19	21307.5	19935	0.65
8	06:20	21397.5	20025	0.75
9	06:21	21510	20160	0.75
10	06:22	21600	20250	0.76
11	06:23	21712.5	20385	0.77
12	06:24	21780	20475	0.76
13	06:25	21847.5	20542.5	0.72
14	06:26	21960	20677.5	0.80
15	06:27	22027.5	20767.5	0.74
16	06:28	22095	20835	0.74
17	06:29	22207.5	20970	0.81
18	06:30	22275	20037.5	0.69
19	06:31	22342.5	21105	0.73
20	06:32	22410	21217.5	0.81
21	06:33	22275	21285	0.77
22	06:34	22545	21375	0.68
23	06:35	22635	21442.5	0.72
24	06:36	22747.5	21577.5	0.79
25	06:37	22792.5	21645	0.48
26	06:38	22905	21757.5	0.75
27	06:39	22995	21847.5	0.69
28	06:40	23107.5	21982.5	0.81
29	06:41	23152.5	22050	0.65
30	06:42	23287.5	22185	0.75
31	06:43	23377.5	22297.5	0.72
32	06:44	23490	22410	0.74
33	06:45	23625	22545	0.75

Tablo 8.4. (Devam) Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( kVarh , kWh ve Cos  $\phi$  )

NO	SAAT	kVarh	kWh	Cos $\phi$
34	06:46	23737.5	22702.5	0.77
35	06:47	23850	22815	0.72
36	06:48	23962.5	22927.5	0.73
37	06:49	24075	23085	0.75
38	06:50	24142.5	23152.5	0.76
39	06:51	24232.5	23242.5	0.71
40	06:52	24345	23355	0.65
41	06:53	24457.5	23490	0.79
42	06:54	24547.5	23602.5	0.67
43	06:55	24637	23692	0.76
44	06:56	24772	23827	0.78
45	06:57	24840	23917	0.72
46	06:58	24952	24030	0.75
47	06:59	25042	24120	0.72
48	07:00	25200	24277	0.76
49	07:01	25312	24412	0.73
50	07:02	25425	24525	0.70
51	07:03	22605	24705	0.71
52	07:04	25717	24862	0.69
53	07:05	25897	25020	0.72
54	07:06	26032	25155	0.70
55	07:07	26122	25402	0.69
56	07:08	26257	25402	0.71
57	07:09	26415	25560	0.71
58	07:10	26572	25717	0.73
59	07:11	26752	25920	0.72
60	07:12	26865	26055	0.58
61	07:13	27000	26190	0.72
62	07:14	27157	26347	0.73
63	07:15	27292	26482	0.74
64	07:16	27450	26640	0.67
65	07:17	27630	26820	0.75
66	07:18	27765	26977	0.71

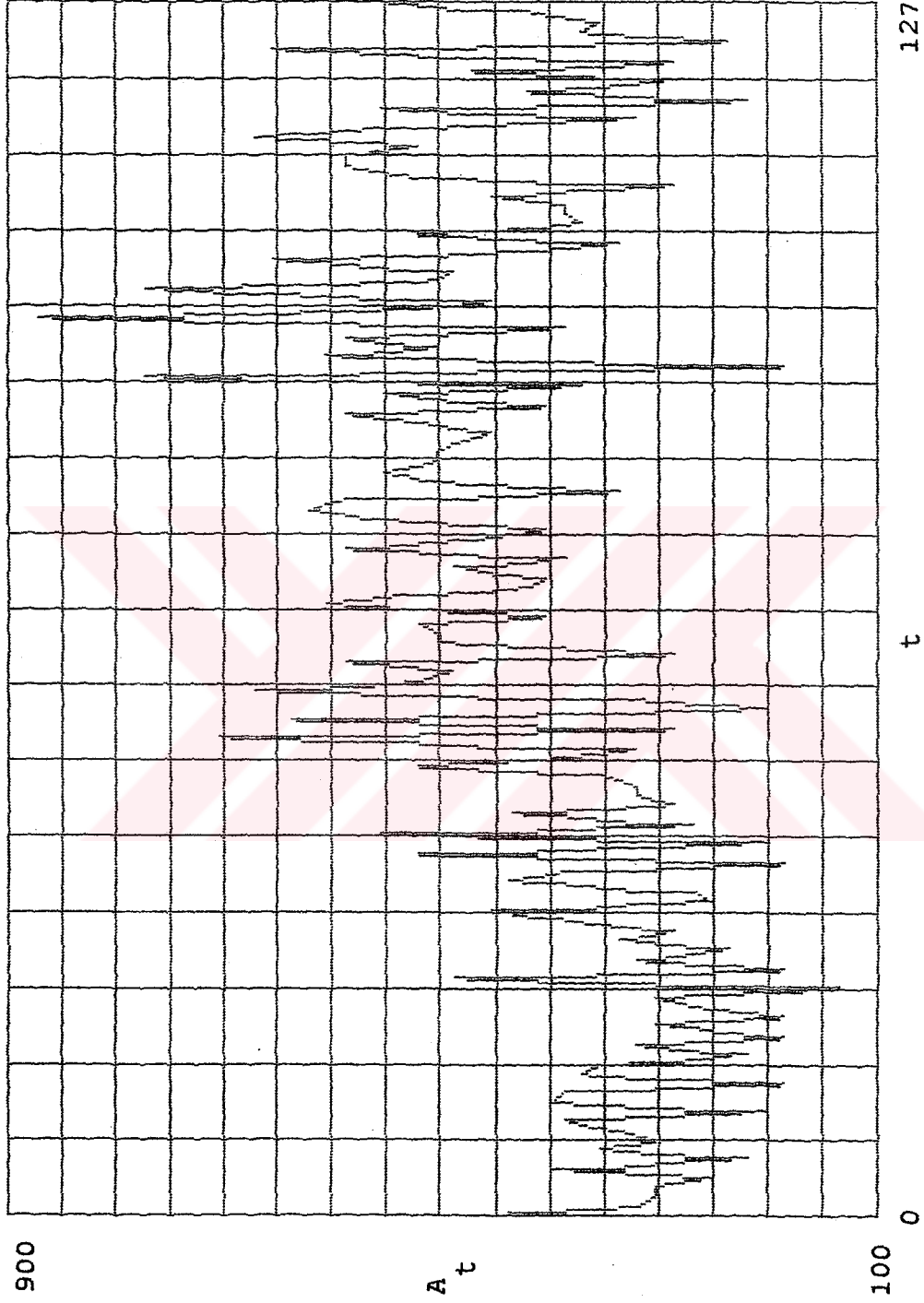
Tablo 8.4. (Devam) Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( kVarh , kWh ve Cos  $\varphi$  )

NO	SAAT	kVarh	kWh	Cos $\varphi$
67	07:19	27922	27135	0.68
68	07:20	28080	27292	0.74
69	07:21	28215	24427	0.73
70	07:22	28372	27585	0.71
71	07:23	28507	27742	0.71
72	07:24	28687	27922	0.70
73	07:25	28845	28102	0.72
74	07:26	29002	28260	0.73
75	07:27	29160	28417	0.72
76	07:28	29340	28597	0.69
77	07:29	29542	28800	0.77
78	07:30	29677	28935	0.73
79	07:31	29835	29137	0.76
80	07:32	29992	29272	0.73
81	07:33	30127	29407	0.70
82	07:34	30307	29587	0.76
83	07:35	30465	29745	0.72
84	07:36	30622	29925	0.71
85	07:37	30780	30060	0.75
86	07:38	30892	30195	0.67
87	07:39	31072	30352	0.68
88	07:40	31230	30510	0.71
89	07:41	31432.5	30735	0.73
90	07:42	31522.5	30828	0.66
91	07:43	31600	30960	0.72
92	07:44	31815	31117.5	0.67
93	07:45	31995	31297.5	0.72
94	07:46	32130	31432.5	0.74
95	07:47	32287	31590	0.70
96	07:48	32535	31837.5	0.77
97	07:49	32647.5	31950	0.71
98	07:50	32827.5	32152.5	0.73
99	07:51	32985	32310	0.73

Tablo 8.4. (Devam) Idealtepe trafo merkezinde ölçülen değerler ( kVarh , kWh ve Cos  $\varphi$  )

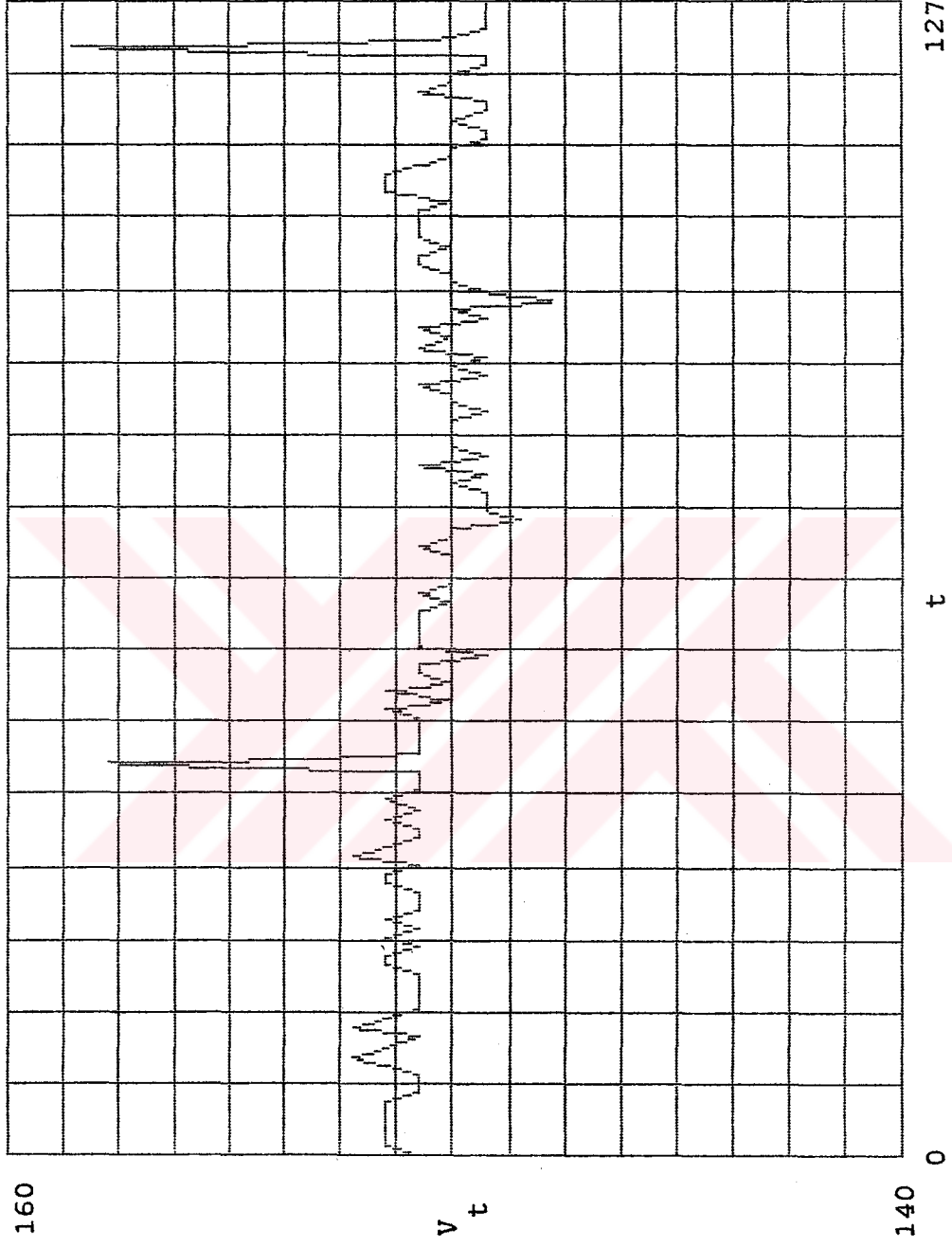
NO	SAAT	kVarh	kWh	Cos $\varphi$
100	07:52	33142.5	32490	0.74
101	07:53	33345	32692.5	0.73
102	07:54	33457.5	32782.5	0.66
103	07:55	33705	32940	0.71
104	07:56	33705	33052.5	0.75
105	07:57	33802.5	33232.5	0.74
106	07:58	33975	33345	0.70
107	07:59	34132.5	33502.5	0.67
108	08:00	34245	33615	0.69
109	08:01	34402.5	33772.5	0.72
110	08:02	34515	33885	0.76
111	08:03	34650	33975	0.74
112	08:04	34875	34267.5	0.72
113	08:05	35032.5	34447.5	0.72
114	08:06	35167.5	34605	0.70
115	08:07	35347.5	34807.5	0.79
116	08:08	35460	34942.5	0.71
117	08:09	35535	35077.5	0.77
118	08:10	35730	35235	0.67
119	08:11	35820	35235	0.66
120	08:12	35842.5	35482.5	0.70
121	08:13	36067.5	34470	0.78
122	08:14	36180	34560	0.66
123	08:15	36315	35842.5	0.72
124	08:16	36427.5	35777.5	0.71
125	08:17	36517.5	36067.5	0.69
126	08:18	36652.5	36225	0.81
127	08:19	36787.5	36360	0.75
128	08:20	36900	36495	0.75



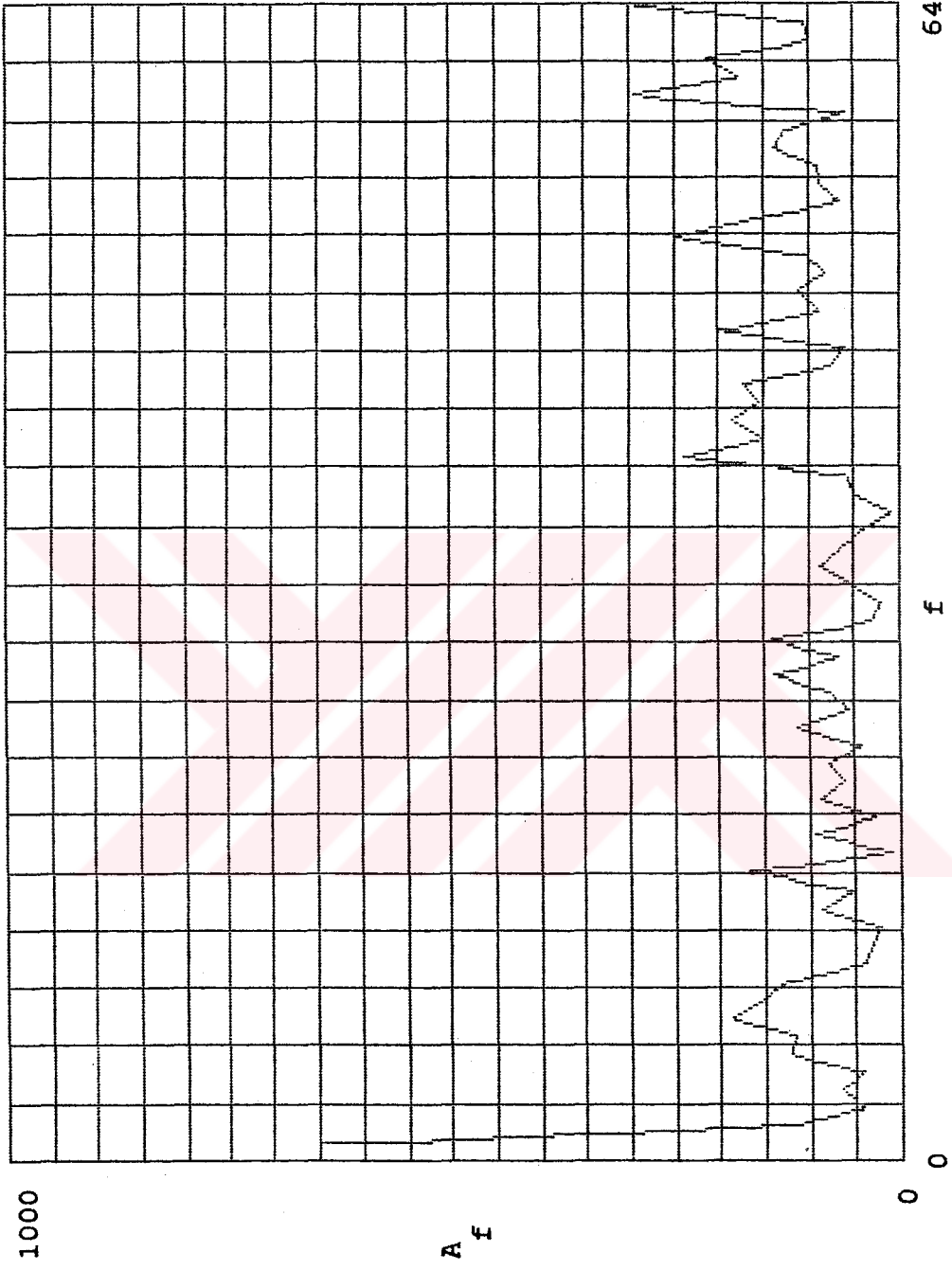


Şekil 8.1. Akım değerlerinin zamana göre değişimi





Şekil 8.2. Gerilim değerlerinin zamana göre değişimi



Şekil 8.3. FFT akım sonuçlarının frekansa bağlı değişimi

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin , sabit genlikli gerilim seviyelerinde , tek ve sabit frekanslı olması istenilen bir durumdur. Ancak bu koşulların pratikte gerçekleşmesi çok güçtür. Lineer olmayan devre elemanları olarak tanımlanan , şebekelerdeki birtakım yükler ve bağlantı elemanları , doğrusal olmayan akım ve gerilim karakteristiklerinden dolayı harmonikli akım ve gerilimleri üretirler. Giriş güçlerini sistemden aldıkları halde , kendi ürettikleri harmonikleri de sisteme kattıklarından , şebekelerde bir çok problemlere neden olurlar.

Tezin birinci bölümünde , harmonik tanımına yer verilmiş ve harmonik üreten kaynaklar özet olarak belirtilmiştir. Bilindiği gibi harmonikler , temel bileşen frekansının integral katsayılarındaki frekanslara sahip , periyodik bir dalganın sinüs biçimindeki bileşeni olarak tanımlanabilirler. Harmonikler , temel frekansın bazı katsayılarındaki bir elektriki sistemde mevcut olan akımlar ve gerilimler olarak da ifade edilebilirler. 50 Hz 'lik bir sistem için , tipik harmonikler , 5. ( 250 Hz ) , 7. ( 350 Hz ) ve 11. ( 550 Hz ) gibi gösterilebilir. Harmoniklerin temel ve harmonikli bileşenlerinin dereceleri, genlikleriyle ters orantılı olarak değişmektedirler.

Harmoniklere neden olan ve zamanla değişen lineer olmayan yükler ; anahtarlama ve ark prensibi ile çalışan donanımlar ve elektromagnetik aygıtlar olmak üzere üç grupta toplanabilirler. Harmonik oluşturan güç elektroniği devreleri ; doğrultucular , eviriciler , direkt frekans dönüştürücüler ve alternatif akım kıyıcılarıdır. Elektromagnetik aygıtlar ise ; generatörler , transformatörler ve elektrik makinalarıdır. Ayrıca ark prensibine göre çalışan aygıtlar ; ark fırınları , civa ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri olarak sayılabilir.

Ark fırınları , ergitme aşamasında elektrotlar arasında oluşan arkların lineer olmayan akım gerilim karakteristiğine sahip olması nedeniyle , sürekli harmonik üretmektedirler. Fırın elektrotları arasında dengesiz yüklenmeye bağlı olarak tek harmonikler , histeresiz ve doyma sonucu daha çok çift harmonikler ve bunun yanında da araharmonikler görülmektedir. Diğer bütün harmonik üreten yüklerde olduğu gibi ark fırınlarının da sisteme verdikleri harmonikler incelenirken , sadece ark fırınlarının değil tüketicinin tüm yükünün bir bütün olarak düşünülmesi gereklidir. Harmoniğin hangi kaynak tarafından üretildiğinden çok , büyüklüğü önemlidir.

Sözü edilen kaynakların oluşturduğu harmoniklerin frekans bandı , 100 Hz ile 50 Hz arasında geniş bir aralığa yayılıdır. 5 kHz ' e kadar olan düşük harmonikler güç donanımı ve makinalarda etkili olurlar , şebekelerdeki değerlendirmelerin ise 40. harmoniğe ( 2 kHz ) kadar yapılması yeterli olmaktadır. 5 kHz 'in üzerindeki harmonikler , iletişim sistemlerinde sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle , elektriki sistemlerde sorun olan problemlerin , tek tek harmonik gerilimlere ve akımlara göre analiz edilmesi gerekir.

Tezin ikinci bölümünde , harmoniklerin analizi ve bu analiz yöntemleri incelenmiştir. En basit durumda bozulmuş periyodik bir dalga şeklinin harmoniği Fourier serisi ile açıklanabilir. Bu bölümde Fourier , Ayrık Fourier ve Hızlı Fourier yöntemleri değerlendirilmiştir. Herhangi bir fonksiyonu frekans domeninde temsil edebilmek için , mutlaka Fourier analizi gerekmektedir.

Bilgisayarların gelişmesi ve buna bağlı olarak yazılım ve donanımdaki ilerlemeler , sistemlerin analizinde verilerin elde edilmesi konusunda gelişmelere olanak tanımıştır. Bu tip sistemler , harmoniklerle ilgili problemlerin incelenmesinin daha güvenilir ve hızlı olmasını sağlamaktadırlar. Sistemle ilgili veriler , analog/dijital,

giriş / çıkış uçları olan bir bilgisayar yoluyla ve buna uygun yazılım sayesinde otomatik olarak elde edilmektedir. Veriler , önceden hazırlanmış bir program ile yüklenmekte ve harmonik analizi FFT yazılımı ile yapılmaktadır. Bu tip ölçümlerde , veri kazanç kütüklerindeki dalga şekilleri bilgisi , zaman domeninden frekans domenine dönüştürülür. Bu şekildeki bir ölçüm metodu ile çeşitli gerilim ve akım değerlerinin frekans spektrumu elde edilmektedir. Ölçümlerin kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi için FFT algoritmaları kullanılmaktadır. FFT hesaplamalarında , örnekleme oranı , sızıntı , girişim, çit etkisi , Nyquist kriteri gibi terimlere çokça rastlanmaktadır. Bu terimler , FFT algoritmalarının kullanımında gerekli olan etkenleri belirtmektedirler. Bu nedenle tezde , çok fazla ayrıntıya girmeden bilgi amacıyla bu konulara da yer verilmiştir.

Örnekleme oranı , " girişim " olarak bilinen problemden kaçınmak için , Nyquist oranı üzerinde yeterince yüksek seçilmelidir. Nyquist kriteri , ilgili olan en yüksek frekansın iki katında bir örnekleme oranı gerektirir. " Girişim " uygun olmayan bir örnekleme oranından dolayı , daha alçak bir frekansa benzeyen daha yüksek bir frekansdaki olaydır. Hem yüksek hem de alçak frekans sinyalleri aynı örnekleme noktasını paylaşırlar. Sızıntı etkisi ise çeşitli pencereleme fonksiyonları ( Hanning , Hamming, Kaiser gibi ) ile azaltılmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde , harmoniklerin sınırlandırılması ve uygunluk seviyeleri göz önüne alınmıştır. Güç sistemlerinde lineer veya lineer olmayan yüklerin değişiminde kabul edilmiş herhangi bir referans bulunmamaktadır. Harmoniklerin sınırlandırılmasında çeşitli ülkelerin standartları farklı olmaktadır. Bu konudaki tablolar Bölüm 3 ' de ülkelere göre ayrı ayrı ele alınmıştır.

Türkiye koşullarındaki sınırlandırmalar , gerilim harmoniklerine bağlı olarak Tablo 3.17 ' de , akım

harmoniklerine göre Tablo 3.18 'de verilmektedir.

Tezin dördüncü bölümünde , harmonik oluşturan güç elektroniği donanımların tanıtımı ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca darbe genlik modülasyonu ve harmonik yoketme yöntemi incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise , şimdiye kadar değinilen kaynakların etkileri değerlendirilmiştir. Generatörlerde , sinüs şeklinde olmayan eğriler , tek sayılı sinüslü terimlerin toplamına eşit olduklarından , endüklenen emk ' da aynı dereceli harmonikleri içermektedirler. Transformatörlerdeki harmonikler ise , histeresiz ve fuko akım kayıplarını , yalıtım gerilmelerini ve bakır kayıplarını artırırlar. Miknatıslama akımının etkisini azaltmak için, magnetik endüksiyon düşük tutulmakta ve transformatörler dizayn edilirken harmoniklerin etkileri göz önüne alınmaktadır. Elektrik makinalarında ise harmonikler, ısınmaya , titreşimlere ve alternatif akımda mekanik rezonanslara neden olmaktadırlar. Kablo ile taşımada, harmonikli bir akım akışı ek bir ısınma meydana getirmekte ve harmonikli gerilimler dielektrik gerilmeleri artırarak kablonun yararlı ömrünü kısaltmakta ve bundan dolayı da arızalara neden olmaktadırlar.

Ayrıca güç sistemlerinde kondansatörlerin kullanılması, bir harmonik rezonans durumu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle sistemlerde , hem seri hem de paralel rezonans oluşabilir. Rezonans noktası , sistemin harmonik kaynaklar tarafından ürettiği frekanslardan birinin yakınında oluşursa , aşırı miktarda harmonik akım akmasına ve aşırı harmonik gerilimlere neden olacaktır. Rezonans etkilerinden dolayı oluşan hataları engellemek için , dalgalılık kontrolü yapılmakta ve filtreler kullanılmaktadır. Harmonikli bir gerilim altında kondansatörün çektiği akım, normal bir şekilde çektiği akımdan büyük olmaktadır. Nominal gerilim altında kondansatör akımı , nominal akımın 1.3 katını aşmadığı sürece kondansatör akım

harmonikleri aşırı yüklenmiş olmamaktadır. Ayrıca harmoniklerin etkilerine , haberleşme sistemlerindeki parazitler , güç sistemlerindeki ölçüm hataları , ateşleme anları sıfır geçişlerine göre ayarlanmış devrelerde kararsız çalışmalar vs. ilave edilebilir.

Tezin altıncı bölümünde , modelleme ve simülasyon konusu incelenmiştir. Elektrik şebekelerinde , harmonik dağılımını hesaplayabilmek için güç sistemi modelinin tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Modelleme teknikleri, fiziksel modeller ve dijital bilgisayar modelleri olarak ikiye ayrılırlar. Fiziksel modeller , fiziksel olarak ayarlanmış ve elektriki olarak eşdeğer modeller şeklinde, dijital bilgisayar modelleri ise dinamik zaman domeni modelleri , frekans domeni modelleri , hareketli dalga teorisi modelleri olarak gruplandırılmaktadır. Bu modelleme teknikleri , simülasyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Bir sistemin modeli oluşturulduktan sonra , bu modele harmonik üreten elemanların modelleri de eklenmektedir. Daha sonra sistemdeki harmonik akımlar ve gerilimler , çeşitli hesaplama algoritmaları ile çözülmektedirler. Güç sisteminde harmonik yayılma analizinde, başlıca üç yöntem kullanılmaktadır. Bunlar ; direkt admittans matrisi yöntemi ile frekans domeninde analiz , lineer olmayan frekans domeninde analiz ve lineer olmayan zaman domeninde analiz şeklindedir. Bilindiği gibi bu tür analizlerde , iterative yöntemler gerekmekte ve hesaplamalar bilgisayar ile hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.  $Y_{bara}$  matris yöntemiyle güç sistemindeki L, C ve R değerleri  $\pi$  eşdeğer devre modeli kullanılarak, matris haline getirilmektedir. Sisteme harmonik üreten kaynaklar ise , akım kaynağı olarak eklenmekte ve her baradaki harmonik gerilimler ,

$$\left| V_n \right| = \left| Y_n \right|^{-1} \cdot \left| I_n \right|$$

matris yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bilindiği gibi şebekeye harmonik üreten kaynaklar ; doğrultucular,



eviriciler , ark fırınları , transformatörler , direkt frekans dönüştürücüleri gibi kaynaklardır. Dengesiz çalışma durumunda , üç faz modellenme kullanılmakta ve simetrik bileşenler yöntemiyle her fazın harmonik değeri ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Tezin yedinci bölümünde ise , elektrikli ulaşım yüklerinin harmonik karakteristikleri örnek olarak ele alınmıştır. Lokomotif tahrik sistemleri güç elektronik düzenekli donanımlardan meydana geldiği için , büyük harmonik akımlar ve rezonans aşırı gerilimleri oluşturmaktadırlar. Bu bölümde , ototransformatörlü cer sistemleri örnek olarak incelenmiştir. Avustralya ' da gerçekleştirilmiş olan örnekte ; düzgün kaskadlama algoritması kullanılarak , frekans domeninde bir modellenme yapılmış , hattaki akım gerilim dalga şekilleri , pantograf gerilimi , dc motor akımı ve lokomotif ateşleme açıları kaydedilmiştir. Test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Örnek olarak alınan hat , 50 Hz 'lik 132 kV ' luk üç faz sisteminden beslenmekte ve 30 MVA 'lık 132 / 50 kV ' luk tek fazlı transformatörler ise AT sisteme enerji sağlamaktadırlar. 10 MVA 'lık 50 / 25 / 25 kV 'luk ototransformatörler ise yaklaşık 10 km 'lik aralıklarda , katener/bağlantı sistemi ile besleme hattı arasına bağlanmıştır.

ABCD parametreleri ile tanımlanmış olan çok uçlu şebekeleri kullanmak için , frekans domeninde yaklaşımlar yapılmıştır. Tüm sistem için eşdeğer bir ABCD modeli oluşturulmuş ve alt sistemler kaskad bağlanmıştır. Daha sonra problemi çözmek için , parametre matrislerinden biri veya ABCD matrisi ters çevrilmiştir. Bu şekilde düzgün kaskad algoritması uygulanarak , gerilim ve akım seviyeleri sistemdeki herhangi bir yerde belirlenebilmektedir. Sonra bir harmonik yayılma programı kullanılarak elde edilen sonuçlardan dalga şekilleri oluşturulmuş ve kararlı duruma geçilmiştir. En son olarak gerçek testler yapılmış ve simüle edilmiş dalga şekilleri ile



ile karşılaştırılmıştır. Onuncu ve onbirinci harmonikler arasında rezonans frekansının olabilirliği ortaya çıkmış, ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçlarına eşit olduğu görülmüştür.

İkinci bir örnek ise , Yeni Zelanda ' dan alınmıştır. Buradaki demiryolu hattı , nominal gerilimi 25 kV olan üç fazlı bir ototransformatör kullanılarak , 50 kV 'luk şebekeden beslenmektedir. Ana dağıtım şebekesi 220 veya 110 kV 'da , alt dağıtımda 66 kV seviyesinde olmaktadır. Üretim 600 MW 'lık HVDC hattı ile sağlanmaktadır. Demiryolunun sadece 4 alt istasyon ile çalışabileceği kabul edilmiştir. 25-0-25 kV ' luk nominal değerlere sahip olan üç fazlı bir çer kaynağını sağlayabilmek için, 220/66 kV 'luk bir alt istasyon kullanılmıştır. Sistemdeki lokomotifler , 3 MW 'lık sürekli bir güce sahip olup, ortalama 105 km/h hızındadırlar. ( 106.5 ton ağırlığında ve maksimum çekme kapasitesi 300 kN 'dur. )

Bu uygulamada lokomotif dinamik frenleme modunda çalıştığı zaman , evirici modunda çalışan tristör dönüştürücülerinin hat gerilim komütasyonu gerektiğinden , bu çeşit bozulmalar problem oluşturmaktadır. Bu tip sistem etkilerinin esnek olarak belirtilebileceği bir model, 50 kV 'luk devre elemanlarıyla birlikte düşünülmüştür. Ayrıca frekans domeninde bir güç sistem simülatörü geliştirilmiş , lokomotif ve yardımcı istasyonlar için, bir gece boyunca deney kayıtları yapılmıştır. Bu sistemde Fourier dönüşümünün anlık zaman domeni incelemeleri 0.2 s ile 1800 s arasında değişmektedir. Bu örnekte yapılan ölçümler ile elde edilen simülasyon sonuçlarının belirtilen sınırlamalar içinde kaldığı görülmüştür.

Tezin sekizinci bölümünde ise , Haydarpaşa-Çayırova arası 37 km 'lik hattın 12. kilometresinde kurulmuş olan İdealtepe trafo merkezinde 21.4.1993 tarihinde , 06 : 13 ile 08 : 20 saatleri arasında VIP cihazından akım , gerilim ve güç değerleri alınmıştır. Gerilim ve akım değerlerinin

akım değerlerinin FFT hesaplamaları Mcad yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve eklerde verilmiştir. Ancak llen bu değerler ani değişimleri içermemektedirler. Bilgisayar temelli bir ölçüm yapma imkanımız olmamıştır fakat bu konudaki çalışmalarımız devam etmektedir. Sistemlerimizde simülasyon çalışmalarına daha çok yer verilmeli ve buna göre harmonikleri yoketmek için gerekli önlemler alınmalıdır. Ayrıca sistemlerdeki harmoniklerin ölçülmesi ve denetilmesi şarttır. Ölçümler , gerilim harmonikleri bakımından faz-toprak bağlı gerilim trafoları üzerinden , akım harmonikleri bakımından da denetimi yapılacak bozucuya ait akımı lcek şekilde bağlı akım trafosu üzerinden doğrudan veya harmonik ölçüm cihazının durumuna göre , akım trafosunun çıkışına bağlı olarak direnç üzerinden alınacak gerilim değerleri ile de yapılabilir. Ölçümlerin yapılma zamanı , cihazın bağlı kalma süresi ve lme sayısı ile cihaz tipi TEK tarafından belirlenmektedir. Ölçümlerden elde edilen sonuçlarla ilgili olarak ;

- 1) Herhangi bir harmonik sırası için , bulunan akım ve gerilim harmoniklerinin 3 s süreli ortalama değerlerinin ,
- 2) Akım ve gerilim harmoniklerinin 3 s süreli toplam bozulma faktörlerinin ,
- 3) Akım ve gerilim bozulmasının ölçülen en büyük % 5 değerinin atılarak geri kalan harmonik oranlarının ,

TEK tarafından kabul edilen seviyelerin üzerine çıkmadığı görülmeli ve bu koşullar bütün olarak sağlanmalıdır.

Harmoniklerin olumsuz etkilerinden kurtulmak için, taşıtlara şebeke filtreleri monte edilmektedir. nknn üretilen harmonikler , sinyalizasyon sistemini etkilemektedirler. Bu tip etkiler ulaşım sisteminin emniyeti açısından çok tehlikeli olabilir. Bu etkiler , g elektronik düzenekli tahrik sistemlerinde daha da çok görülmektedir.

Harmoniklerin yok edilmesi için , klasik anlamda pasif filtreler kullanılmaktadır. Bu tip sistemler , hareket halindeki bir aracın üzerine monte edilemeyecek kadar ağırdır ve büyüktür. Bu nedenle , yüksek seviyeli harmoniklerin yokedilebilmesinin yanında , reaktif güç kompanzasyonu yapabilecek hafif ve esnek bir sistem olan aktif filtreler tercih edilmelidir.

Aktif bir filtre kullanarak pasif filtre tümüyle yokedilemez , ancak önemli ölçüde küçülmesi sağlanabilir. Filtre dönüştürücüsü ile düşük frekanslı harmonikleri yok etmek mümkündür. Fakat daha yüksek frekanslı harmonikler bir aktif ve pasif filtreden oluşmuş yeni bir filtre sistemi kullanılarak yok edilir. Aktif filtre sistemindeki harmoniklerin genlik ve frekansında ancak zıt fazda harmonikler üretilerek , sisteme dahil edilir ve bu şekilde harmoniklerin yok edilmesi sağlanır.

Bu tip çalışmalar , İtalyan demiryollarında yapılmış, elektronik lokomotif için tasarlanan aktif filtrenin, pasif filtreden 10 kat daha küçük olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak , bu çalışmada öncelikle güç sistemlerindeki harmonikler genel olarak ele alınmış , daha sonra elektrikli ulaşım sistemlerindeki durumları incelenmiş, simülasyon ve modelleme detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Bu tip bir çalışma demiryollarımız için teknik ve bilimsel olarak ilk defa ortaya konulmuş ve daha ayrıntılı çalışmalar için başlangıç oluşturulmuştur.

## KAYNAKLAR

- 1 - ARRILLIAGA , J. et al BRADLEY, D. A., BODGER ,P. S.,1985.  
Power System Harmonics. John Wiley and Sons.
- 2 - BARNES , R. and WONG , K. T. , March 1991. Unbalance  
and Harmonic Studies for the Channel Tunnel  
Railway System. IEE Proceedings - B , vol.138,  
no. 2 , p. 41-50.
- 3 -BAYRAM , M., Eylül 1984 . Harmoniklerin Kompanzasyon  
Tesislerindeki Etkileri , Elektrik Müh. Konf.,  
İTÜ İSTANBUL .
- 4 -BECKER , V.W. et al GAUL H., MÜLLER-HELLMANN A.,1983.  
Einflüsse Von Schaltungsparametern auf den  
Störstrom Stromrichter gespeister  
Triebfahrzeuge Electriche Bahnen 81., heftz 3,  
p.72-77 , MÜNCHEN .
- 5 -BOSE ,B.K. , 1985. Power Electronics and AC Drives.  
Prentice - Hall a Division of Simon and  
Schuster. AMERIKA.
- 6 -BROWN , P.J. , January 1990. Computerized Simulation  
and Measurement of Power System Harmonics,  
Ph. D. Thesis , Istanbul Technical University.
- 7 -CHRISTOFORIDIS , G. P. and SAKIS MELIOPOULOS , A. P.,  
October 1991.Parameters Affecting the Harmonic  
Distortion in a Converter Substation . IEEE  
Transactions on Power Delivery , vol.8,no.4,  
p. 1727-1733.

- 8-ÇAKIR , H. ,1986. Elektrik Güç Sistemleri Analizi, Nesil Matbaacılık Yayıncılık San. Tic. A.Ş., ISTANBUL.
- 9-DEWAN ,S.B. et al SLEMON , G.R. , STRAUGHEN, A.,1984. Power Semiconductors Drives. A Wiley - Interscience Publication John Willey and Sons, AMERIKA.
- 10-DİNLER , S. , Ekim 1991. Yeni bir Gerilim Ara Devreli Evirici ile , Derin Kafesli Çelik Rotorlu Asenkron Motorun Modellenmesi ve Denenmesi. Doktora Tezi. I.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü. ISTANBUL .
- 11-DUFFY , C.K. and STRATFORD, R.P. ,November / December 1989. Update of Harmonic Standart IEEE -519 : IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.IEEE Transactions on Industry Apply. , vol. 25, no. 6 , p. 1025-1034 .
- 12-FUNABIKI , S. , 1989 . A Control Strategy of Three-Phase PWM Inverter with Fluctuating Input Voltage . IEEE IAS Conf.Rec. , p.1170-1175.
- 13-GEORGE , Timothy A. and BONES , D. , April 1991. Harmonic Power Flow Determination Using The Fast Fourier Transform . IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 6 , no. 2 , p. 530-535.
- 14-GHIARA , T. et al MARCHESONI , M. , SCIUTTO , G. , POZZOBON , P. , 13-15 November 1990. Active Power Filter for Harmonic Reduction in Traction Line.Power Quality, 1990 Proceedings p. 347-356 , PARIS .

- 15 - GRIFFITHS , P. T. , 22-25 September 1987. A Frequency Domain Model of an Autotransformer Traction System for Harmonic Penetration and Resonant Overvoltage Studies. Intern. Conf. on Electric Railway Systems for a New Century ( IEE), p.109-113 , LONDON , UK.
- 16 - GROTZBACH , M. and DRAXLER , B. , 1991. Effect of DC Ripple and Commutation on the Line Harmonics of Current-Controlled AC/DC Converters .IEEE Transactions on Industry Applications, p.49-56.
- 17 - GRUZS , T. M. , july / August 1991. Uncertainties in Compliance with Harmonic Current Distortion Limits in Electric Power Systems . IEEE Transactions on Industry Applications, vol.27, no.4 ,p. 680-685.
- 18 - HANNA , R .A. , September/October 1989. Harmonics and Technical Barriers in Adjustable Speed Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25 , no. 5 ,p. 894-900.
- 19 - HOLTZ , J.and KLEIN, H-J.,April 1989.The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-Fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System.IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 4 , no. 2 , p. 168-173.
- 20 - HOLTZ , J. and KRAH. WUPPERTAL ,J. O. , May 31,1990. On - Line Identification of The Resonance Conditions in The Overhead Supply Line of Electric Railways. Archiv für Electrotechnik 74 , p. 99-106 , Springer-Verlag.
- 21 - HOLTZ , J. and KRAH , J. O. , January 1992. Adaptive Optimal Pulse-Width Modulation for The Line-Side Converter of Electric Locomotives . IEEE

Transactions on Power Electronics , vol. 7,  
no. 1 , p. 205 - 211.

22 -IEEE Committee Report , September 1985. The Effects  
of Power System Harmonics on Power System  
Equipment and Loads . IEEE Transactions Power  
Applications Systems , vol. PAS - 104 , no.9,  
p. 2555-2583.

23 -JOSEPH , S. et al SUBJAK , J. R., MCQUILKIN JOHN S. ,  
1990. Harmonics-Causes, effects, measurements,  
and analysis : an update. IEEE Transactions On  
Industry Applications , vol. 26, no.6,p. 1034-  
1041 .

24 -KAYNAK , O. , Agustus 1988. Güç Elektronigi : Elemanlar,  
Devreler ve Sistemler .Bogaziçi Üniversitesi  
Yayınları No : 446 . Bebek-İSTANBUL.

25 -KEY , T. and LAI , J - S. , 1991. Comparasion of  
Standarts Limiting Harmonic Distortion in  
Power Systems. IEEE Power Electronics Apply.  
Center, p. 57-62.

26 -KING , R. J. , October 1989. A Fourier Analysis for  
a Fast Simulation Algorithm.IEEE Transactions  
on Power Electronics, vol.4 , no.4 ,p.434-441.

27 -LANDER , C.W , 1981. Power Electronics .McGRAW -HILL  
Book Company (UK) Limited .

28 -LEE , J.Y. and SUN , Y.Y. , February 1986. Adaptive  
Harmonic Control in PWM Inverters with  
Fluctuating Input Voltage .IEEE Transactions  
on Industrial Electronics , vol. 1E-33 , no.1.

29 -LUDBROOK , A. , September/October 1988. Harmonic Filters  
for Notch Reduction . IEEE Transactions on

Industry Applications , vol.24 , no.5, p.947-954.

- 30 - MELLIT** , B. et al ALLAN , J., SHAO , Z.Y., JOHNSTON , W. B. , HOOPER , A. , DENLEY , M. R. , 1989. Harmonic Characteristics of Traction Loads on New Zealand 's Newly Electrified North Island Line , vol .5 , p. 392-398 , United Kingdom.
- 31 - PATEL** , H. S. and HOTT , R. G. , 1973 . Generalized Technique of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters. IEEE Transac. on Industry Applications, vol.1A-19, p.310-317.
- 32 - PELLY** , B . R . 1971 . Thyristor Phase - Controlled Converters and Cycloconverters ; Operation, Control and Performance . NEWYORK : Wiley.
- 33 - PENALVER** , C.M. et al MARTINEZ , J.P., MARTINEZ ,P. M. , August 1985. Microprocessor Control of DC/AC Static Converters . IEEE Transactions on Industrial Electronics , vol. IF 32 , no.3 .
- 34 - PURKAYASTHA**, I. and SAVOIE , P. J. , September/October 1990.Effect of Harmonics on Power Measurement. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.28 , no.5 , p. 944-946.
- 35 - RICE** ,D.E. , January/February 1986.Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics - Their Effect on Power Systems Components . IEEE Transactions on Industry Applications, vol.IA-22 , no.1 , p. 161-177.
- 36 - SARIOĞLU** , K. vd ÖZKAYA , M. , ILICETO , F., Haziran 1992. Müşterilerin Sebep Olduğu Bozucu Etkilerin Belirlenmesine İlişkin İncelemeler. TEK Yayınları , ANKARA.



- 37 - SAKAUI , M. and FUJITA , H. , February 1992. Harmonic Analysis of a Capacitor-Filtered Three-Phase Diode - Bridge Rectifier with Complex Source Impedance . IEEE Transactions on Industrial Electronics , vol.39 , no.1 , p. 80-81.
- 38 - SCHWARZENAU, R. , 1978. Störstrombelastung in Bahnnetzen. AEG - TELEFUNKEN , BERLIN .
- 39 - SEGUER , G.C Translated by GRIFFIN, E.J, 1986. Power Electronic Converters Ac - Dc Conversion . English translation 1986 North Oxford Academic Publishers Ltd.
- 40 - STRATFORD , R. P. , 1981 . Analysis and Control of Harmonic Current in Systems with Static Power Converters. IEEE Transactions on Industry App. , vol. IA-17 , no. 1 , p. 71-81.
- 41 - TALEP , M. and ORTMEYER , T. H. , January 1992. Examination of The Current Injection Technique. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7 , no. 1 , p. 442-447.
- 42 - TUNÇAY , R. N. , Eylül 1984. Elektrik Şebekesinde ve İşletmesinde Harmonikler. Elektrik Fakültesi 50. Yıl Sempozyumu , İTÜ - İSTANBUL .
- 43 - TUNÇAY , R. ve BROWN , P. J. , 7-12 Kasım 1988a . Güç Sisteminde Harmonikler .Bursa II. Elektromekanik Sempozyumu 88 , p.65-68 , BURSA.
- 44 - TUNÇAY , R. N. and BROWN , P. J. , June 1-3 1988 b. The Modelling and Simulation of the Nonlinear Loads and Harmonics in Electric Power Networks Proc. European Simulation Multiconference p.81-84 , FRANSA.

- 45 -TUNÇAY , R. N. ve BROWN , P. J. , 25 Eylül - 1 Ekim 1989. Güç Sistemi Harmoniklerinin Bilgisayar Destekli Analizi ve Ölçülmesi . Elektrik Müh. 3. Ulusal Kongresi , s.75-78 , ITU - İSTANBUL.
- 46 -WILSON , W. Xu. , January 1992. A Practical Harmonic Guideline for Adjustable Speed Drive Applications . IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 7 , no. 1, 427-433.
- 47 -WINN , J. K. and CROW , D. R. , July / August 1985. Harmonic Measurements Using a Digital Storage Oscilloscope . IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 25 , no. 4 , p.783-788.



## EK A

```

CLS : SCREEN 9 : COLOR 1 , 10 , DEFDBL A-Z
PI = 3.14159
n = 3
HD = 21
DIM X(n) , Y(n) , DENC(n) , K1(n) , K2(n) , K3(n) , K4(n)
DIM HSBCHD) , HCBCHD)
FOR HO = 1 TO HD
FOR I = 1 TO n : Y(I) = 0 : NEXT I
H = .01
LINE ( 0, 200 ) - (800, 200) , 4
FOR t = 0 TO 2 * PI STEP H : REM 0 'DAN 2* PI 'YE
FONK1 = (SIN(t))
IF FONK1 > .86 THEN FONK1 = 1 ELSE IF FONK1 < - .86
THEN FONK1 = - 1 ELSE FONK1 = 0
FONK2 = SGN(SIN(t))
FONK = FONK2 + FONK1
PSET ( t * 45 , 200 - 50 * FONK )
FOR I = 1 TO n : X (I) = Y(I) : NEXT I
A = 1
GO TO 100
10 FOR I = 1 TO n : K1(I) = H * DENC(I) :
Y1(I) = Y(I) + K1(I) * .5 : X(I) = Y1(I) : NEXT I
A = 2
GO TO 100
20 FOR I = 1 TO n : K2(I) = H * DENC(I) :
Y2(I) = Y(I) + K2(I) * .5 : X(I) = Y2(I) : NEXT I
A = 3
GO TO 100
30 FOR I = 1 TO n : K3(I) = H * DENC(I) :
Y3(I) = Y(I) + K3(I) : X(I) = Y3(I) : NEXT I
A = 4
GO TO 100
40 FOR I = 1 TO n : K4(I) = H * DENC(I) : NEXT I
FOR I = 1 TO n
Y(I) = Y(I) + (K1(I) + 2 * (K2(I) + K3(I)) + K4(I))/8
NEXT I

```

```

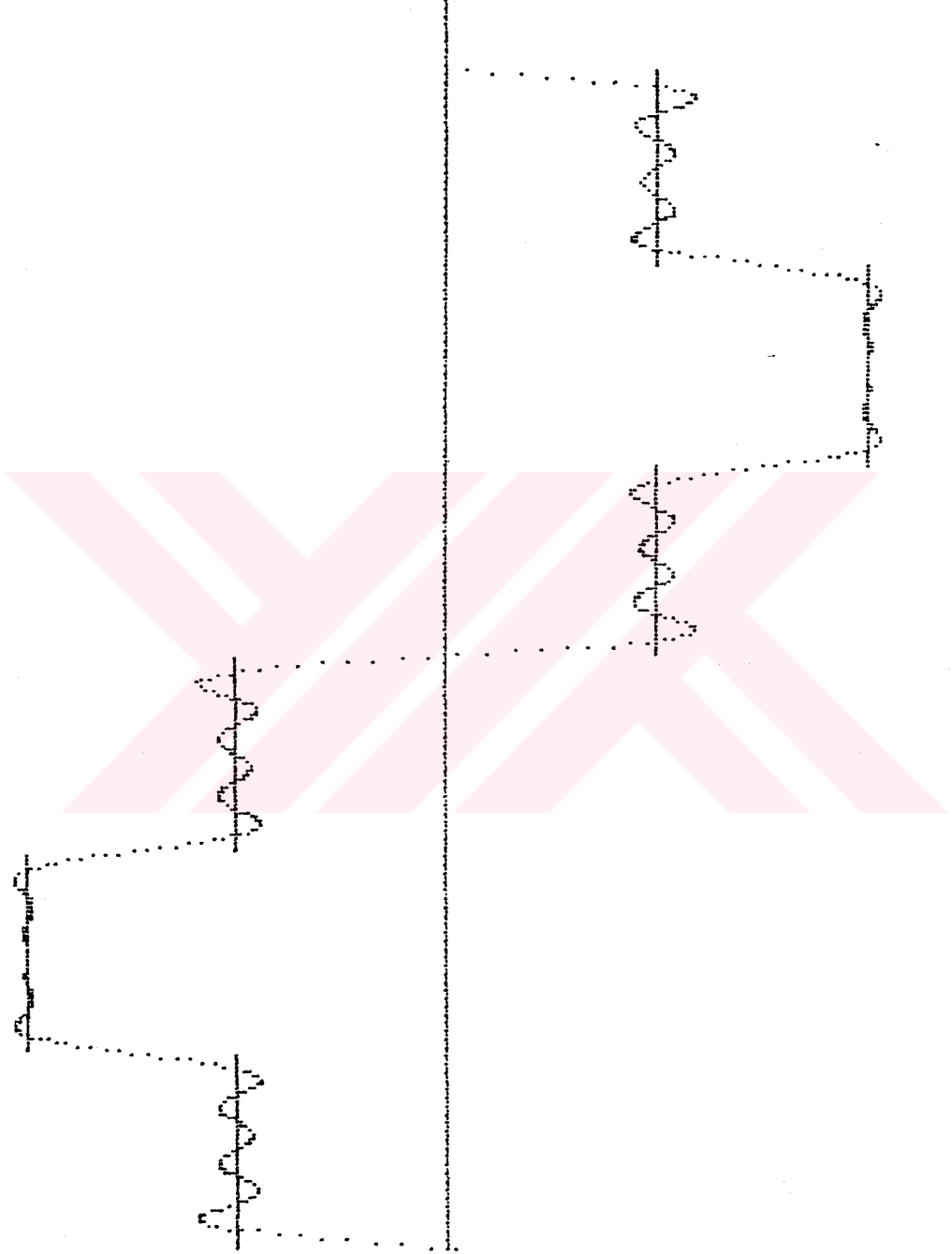
NEXT t
PRINT USING "###.#####" ; Y(1)/(2*PI);Y(2);Y(3);HO
HSBCHO) = Y(2) ; HCBCHO) = Y(3):ORT = Y(1)/(2*PI)
NEXT HO
REM FOR HO = 1 TO HD : PRINT USING "###.#####" ; HO ;
ORT ; HSBCHO) ; HCBCHO) : NEXT HO
FOR t = 0 TO 2 * PI STEP H
FOR HO = 1 TO HD
PY = HSBCHO) * SIN(t*HO) + PY + HCBCHO) * COS(t*HO)
NEXT HO
PSET (t * 45 , 200 - 50 * (ORT + PY)) , 14
PY = 0
NEXT t
END
100 DENC1) = FONK
DENC2) = (1 / (PI) ) * (FONK * SINCHO*t))
DENC3) = (1 / (PI) ) * (FONK * COSCHO*t))
IF A = 1 THEN GOTO 10
IF A = 2 THEN GOTO 20
IF A = 3 THEN GOTO 30
IF A = 4 THEN GOTO 40

```

Program çıkışında elde edilen sonuçlar, aşağıda tablo haline gösterilmiştir.

0.00000	1.92239	-0.00330	1.00000
0.00000	-0.00089	-0.00000	2.00000
0.00000	0.00023	-0.00537	3.00000
0.00000	0.00085	0.00001	4.00000
0.00000	0.36919	-0.00343	5.00000
0.00000	0.00006	0.00000	6.00000
0.00000	0.28510	-0.00319	7.00000
0.00000	-0.00093	-0.00001	8.00000
0.00000	0.00059	-0.00536	9.00000
0.00000	0.00081	0.00001	10.00000
0.00000	0.16061	-0.00355	11.00000
0.00000	0.00013	0.00000	12.00000
0.00000	0.15889	-0.00308	13.00000
0.00000	-0.00096	-0.00002	14.00000
0.00000	0.00115	-0.00534	15.00000
0.00000	0.00076	0.00002	16.00000
0.00000	0.09912	-0.00368	17.00000
0.00000	0.00019	0.00001	18.00000
0.00000	0.11220	-0.00297	19.00000
0.00000	-0.00099	-0.00003	20.00000
0.00000	0.00160	-0.00531	21.00000

Ek A 'da verilen program çıkışında elde edilen dalga şekli ( Toplam harmonik bileşenlerinin frekansa göre değişimi )



## EK B

Tablo B1. Ölçülen akım değerlerine göre FFT sonuçları

NO	FFT SONUÇLARI	NO	FFT SONUÇLARI
1	4.755*10 <sup>3</sup>	33	- 16.67 - 49.179i
2	-335.768-555.137i	34	29.395+ 83.441i
3	27.53 -126.125i	35	- 31.087+ 58.667i
4	23.903+ 36.756i	36	13.547- 40.212i
5	54.589- 35.122i	37	0.547- 8.71 i
6	- 40.114+ 11.592i	38	- 26.495+ 42.93 i
7	-117.545+ 26.269i	39	30.174- 52.394i
8	93.493+ 69.686i	40	-169.718-166.124i
9	179.423- 55.508i	41	44.421+144.929i
10	86.454-126.658i	42	169.043+ 74.705i
11	6.668-126.157i	43	153.293+ 22.254i
12	- 39.481+ 6.619i	44	-109.744-133.943i
13	- 12.109- 28.463i	45	68.508+ 35.448i
14	- 18.988+ 12.19 i	46	- 7.068+ 58.603i
15	27.187+ 84.715i	47	34.665-197.521i
16	24.676- 48.995i	48	- 76.24 - 44.932i
17	167.024+ 10.073i	49	- 91.576- 61.025i
18	- 2.294+ 7.139i	50	62.399- 54.141i
19	85.576- 37.761i	51	- 79.641- 63.726i
20	12.519- 25.828i	52	216.137-125.287i
21	30.707- 81.317i	53	- 6.209+158.717i
22	52.434+ 34.958i	54	- 65.978+ 8.659i
23	38.024- 69.359i	55	87.579- 0.705i
24	39.895- 11.409i	56	- 82.754- 39.981i
25	- 26.243-110.814i	57	-102.495- 93.002i
26	46.6 - 34.479i	58	71.044+105.354i
27	38.749+ 64.714i	59	- 14.969+ 58.846i
28	- 51.812-129.969i	60	-266.907+122.092i
29	55.511+ 39.143i	61	- 1.05 +177.51 i
30	- 4.887-142.185i	62	210.257- 30.519i
31	7.912+ 30.995i	63	15.032+ 99.42 i
32	4.268- 18.043i	64	- 95.968+ 41.022i
		65	306.16

Tablo B2. Ölçülen gerilim değerlerine göre FFT sonuçları

NO	FFT SONUÇLARI	NO	FFT SONUÇLARI
1	$1.704 \cdot 10^3$	33	- 1.083 - 0.552i
2	1.731+ 3.873i	34	- 0.741 + 0.066i
3	- 0.829- 0.771i	35	- 1.042 + 0.788i
4	0.484+ 1.014i	36	- 0.103 + 0.3 i
5	- 0.148+ 1.187i	37	0.61 + 1.312i
6	0.192+ 0.494i	38	- 0.561 + 1.003i
7	1.089- 0.874i	39	0.271 + 0.25 i
8	- 1.189- 0.387i	40	0.843 + 1.524i
9	- 0.939- 0.865i	41	- 0.506 + 0.73 i
10	- 0.493+ 0.594i	42	0.383 - 0.467i
11	- 0.734+ 0.701i	43	1.107 + 0.44 i
12	- 0.752+ 0.084i	44	0.649 + 0.644i
13	0.212+ 1.787i	45	0.77 - 0.761i
14	- 0.209+ 1.47 i	46	1.431 - 0.449i
15	- 1.012+ 0.187i	47	- 0.027 + 0.197i
16	- 0.17 + 0.235i	48	0.995 - 1.39 i
17	- 1.152+ 1.915i	49	0.754 - 0.383i
18	0.404+ 0.454i	50	- 1.193 - 0.923i
19	0.709+ 0.915i	51	- 0.274 - 1.044i
20	- 0.005+ 1.02 i	52	- 0.832 + 0.527i
21	0.787+ 0.226i	53	- 0.941 - 0.622i
22	1.633+ 0.348i	54	- 0.666 - 0.669i
23	- 0.233- 0.069i	55	- 0.17 + 0.761i
24	0.718- 0.349i	56	- 1.015 + 0.345i
25	1.193- 0.122i	57	- 0.499 + 0.782i
26	0.403- 0.045i	58	- 0.102 + 0.425i
27	0.539- 1.543i	59	- 0.745 + 1.328i
28	0.801- 0.207i	60	1.078 - 0.102i
29	- 1.233- 0.3 i	61	0.473 + 0.846i
30	- 0.399- 0.926i	62	- 0.932 + 0.82 i
31	- 0.115- 0.357i	63	1.465 - 0.295i
32	- 1.601+ 0.276i	64	1.339 + 0.413i
		65	- 0.398



## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Düzce ' de doğdu. İlk , orta ve lise öğrenimini Adapazarı 'nda tamamladı. 1981 yılında girdiği Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü ' nden 1985 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1988- 1989 öğretim yılında Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalında doktora başladı. 1990 yılında doktora yeterlilik sınavını geçti.

1988 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü ' nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Şu anda Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü 'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.