

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Önder ŞAHİN**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2003

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Önder ŞAHİN
(504001253)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ömer USTA (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Mustafa TURAN (SAÜ)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Elektrik Güç Sistemlerinde harmonik analizinin ve bunun yanında harmoniklerin genel olarak incelendiği bu tezde, örneklenmiş akım ve gerilim değerlerine FFT uygulanarak gerçekleştirilen harmonik analizi için oluşturulan algoritmaya uygun olarak MATLAB paket programında bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır ve çeşitli harmonik sorunların yaşandığı bir sanayi tesisinden ölçümler alınarak bu sistemin harmonik analizi yapılmıştır.

Bu tez çalışmam süresince sonuca gitmemde beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer USTA'ya ve benden desteğini esirgemeyen herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2003

Önder ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. HARMONİK ÜRETEEN ELEMANLAR VE HARMONİKLERİN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	4
2.1. Harmonik Üreten Elemanlar	4
2.1.1. Generatörler	4
2.1.2. Transformatörler	5
2.1.3. Doğrultucular	7
2.1.4. Ark fırınları	8
2.1.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları	8
2.1.6. Diğer harmonik kaynaklar	9
2.2. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri	10
2.2.1. Harmoniklerin yol açtığı rezonans olayları	13
2.2.2. Harmoniklerin kayıplara etkisi	14
2.2.3. Direncin, endüktif ve kapasitif reaktansın harmoniklere bağlı olarak değişimi	15
2.2.4. Kondansatörler üzerindeki etkisi	16
2.2.5. Transformatörler üzerindeki etkiler	18
2.2.6. Döner makineler üzerindeki etkiler	18
2.2.7. Koruma sistemleri (röleler) üzerindeki etkiler	19
2.2.8. Ölçme aygıtları üzerindeki etkiler	19
2.2.9. İletişim hatları üzerindeki etkiler	20
2.2.10. Güç elektroniği elemanları ve anahtarlama elemanı üzerindeki etkileri	20
2.2.11. Güç iletim sistemleri üzerindeki etkiler	20
2.2.12. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi	21
2.2.13. Diğer bazı elemanlar ve küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerindeki etkiler	22
2.3. Harmoniklerin Süzülmesi	23
2.3.1. Tasarımda alınabilecek önlemler	23
2.3.2. Pasif filtre	24
2.3.3. Aktif filtre	24
2.3.4. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması	27
3. HARMONİK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE HARMONİKLERLE İLGİLİ TANIMLAR VE TEMEL BAĞINTILAR.....	28
3.1. Giriş	28
3.2. Harmoniklerin Matematiksel İfadesi	28
3.3. Fourier Katsayılarının Belirlenmesi	29
3.3.1. Analitik yöntem	29
3.3.2. Ölçme yöntemi	30
3.3.3. Grafik yöntemi	31

3.4. Harmonik Analizinde Kullanılan Yöntemler	31
3.4.1. Zaman Domeni Analizi	31
3.4.2. Frekans Domeni Analizi	32
3.5. Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Temel Bağıntılar	36
3.5.1. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalgaları ile ilgili bağıntılar	36
3.5.2. Bir fazlı sistemde güç ifadeleri	38
3.5.3. Üç fazlı dengesiz sistemlerde eşdeğer görünür güç, eşdeğer akım ve gerilim kavramları	39
4. HARMONİK ANALİZİ İÇİN YENİ BİR ALGORİTMA VE YAZILIM TASARIMI	42
4.1. Giriş	42
4.2. Yeni Algoritma ve Akış Diyagramı	42
4.3. Yazılım	45
5. YAZILIM KULLANILARAK YAPILAN HARMONİK ANALİZİ.....	46
5.1. Ölçüm 1 için Harmonik Analizi Sonuçları	46
5.2. Ölçüm 2 için Harmonik Analizi Sonuçları	57
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
ADC	: Analog Dijital Converter (Analog Dijital Çevirici)
ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
APF	: Aktif Güç Filtresi
CF	: Crest Factor (Krest Faktörü)
CF_I	: Akım Krest Faktörü
CF_V	: Gerilim Krest Faktörü
DA	: Doğru Akım
DF	: Distortion Factor (Distorsiyon Faktörü)
DF_I	: Akım için Distorsiyon Faktörü
DF_V	: Gerilim için Distorsiyon Faktörü
DFT	: Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
DPF	: Deplasman Güç Faktörü
DSP	: Digital Signal Processing
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FT	: Fourier Transform (Fourier Dönüşümü)
GTO	: Gate-Turn-Off Thyristor
HVDC	: High Voltage Direct Current
IDFT	: Invers Discrete Fourier Transform (Ters Ayrık Fourier Dönüşümü)
IFFT	: Invers Fast Fourier Transform (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü)
IFT	: Invers Fourier Transform (Ters Fourier Dönüşümü)
IEC	: International Electric Cooperation (Uluslararası Elektroteknik Birliği)
IEE	: Institute of Electrical Engineers (England) (Elektrik Mühendisleri Enstitüsü)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (U.S.A) (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	: Integrated Gate Bipolar Transistor
kVA	: Kilo Volt Amper
kVAr	: Kilo Volt Amper Reaktif
kW	: Kilo Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
MCT	: MOS-Controlled Thyristor
MW	: Mega Watt
PF	: Power Factor (Güç Faktörü)
pu	: Per-unit
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Distorsiyonu)
THD_I	: Akım için Toplam Harmonik Distorsiyonu
THD_V	: Gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu	6
Tablo 2.2 Magnetik balastlı bir fluoresent lamba akımının harmonik spektrumu	9
Tablo 2.3 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	12
Tablo 2.4 Dağıtım sistemleri için akım bozulma limitleri.....	13
Tablo 2.5 Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğeri	16
Tablo 2.6 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması.....	27
Tablo 5.1 Ölçüm 1 için analizde hesaplanan değerler	48
Tablo 5.2 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 1 değerleri.....	49
Tablo 5.3 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 2 değerleri	50
Tablo 5.4 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 3 değerleri.....	51
Tablo 5.5 Ölçüm 2 için analizde hesaplanan değerler	58
Tablo 5.6 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 1 değerleri.....	59
Tablo 5.7 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 2 değerleri.....	60
Tablo 5.8 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 3 değerleri.....	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi	25
Şekil 2.2 : Aktif filtre kullanımı	26
Şekil 4.1 : Harmonik analizi için oluşturulan algoritmanın akış diyagramı..	45
Şekil 5.1 : Ölçüm 1 için üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri ...	52
Şekil 5.2 : Ölçüm 1 için gerilimin harmonik spektrumu	53
Şekil 5.3 : Ölçüm 1 için akımın harmonik spektrumu	54
Şekil 5.4 : Ölçüm 1 için gerilime ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri	55
Şekil 5.5 : Ölçüm 1 için akıma ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri	56
Şekil 5.6 : Ölçüm 2 için üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri ...	62
Şekil 5.7 : Ölçüm 2 için gerilimin harmonik spektrumu	63
Şekil 5.8 : Ölçüm 2 için akımın harmonik spektrumu	64
Şekil 5.9 : Ölçüm 2 için gerilime ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri	65
Şekil 5.10 : Ölçüm 2 için akıma ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri	66

SEMBOL LİSTESİ

π	: 3.14
μ	: Akım distorsiyon faktörü
$(\Delta V)_n$	: n. harmonik akımı için gerilim düşümü
γ_1, γ_h	: Temel ve h. harmonik bileşeni için akımın faz açısı
$\delta(t)$	: İdeal örnekleyici
δ_1, δ_h	: Temel ve h. harmonik bileşeni için gerilimin faz açısı
ϕ_1, ϕ_n	: Fourier serisi için 1. ve n. bileşen faz açısı
ϕ_n	: n. harmonik için manyetik akı
ω	: Açısal frekans
ω_0	: Temel açısal frekansı, frekans seçicilik
ω_{max}	: Maksimum açısal frekans
ω_n	: n. harmonik için açısal frekans
ω_s	: Örnekleme açısal frekansı
σ_x^2	: Varyans
a_0, a_n, b_n	: Fourier serisi katsayıları
C	: Kapasite
c_0, c_1, c_n	: Fourier serisi doğru, 1. ve n. bileşen katsayısı
C_m	: Makinaların yapısı ile ilgili bir sabit
$\cos\phi$	: Güç faktörü
$\cos\psi_1$	: Deplasman güç faktörü
D	: Distorsiyon gücü
f, f_1	: Frekans, temel frekans
f_0	: Temel frekans
f_s	: Örnekleme frekansı
$f(.)$	: Fonksiyon
$F\{.\}$	: Fourier Transformu
$F^{-1}\{.\}$	: Ters Fourier Transformu
h	: Harmonik mertebesi
I	: Akımın efektif değeri
I_μ	: Mıknatıslanma akımı
I_0	: Akımın doğru bileşeni
I_0	: Nötr akımı
I_1	: Temel bileşen akımının efektif değeri
I_a, I_b, I_c	: Üç fazlı dengesiz sistemde efektif faz akımları
I_e	: Üç fazlı dengesiz sistemde eşdeğer akım
I_{m1}, I_{mn}	: Akımın 1. ve n. bileşen maksimum değeri
I_n	: n. harmonik akımının efektif değeri
I_{rms}	: Akımın efektif değeri
I_{sc}	: Transformatörün sekonder kısadevre akımı
I_L	: Yük akımı
$i(t)$	: Ani akım

k_n	: n. harmoniğin sargı faktörü
L	: Endüktans
n	: Harmonik mertebesi
N	: Maksimum harmonik derecesi
N	: Örnekleme sayısı
N_s	: Bir faz sargı sarım sayısı
P	: Aktif güç
p	: Tristörlü konverterde darbe sayısı
$p(t)$	: Ani aktif güç
P_{Ck}	: Harmonikli gerilim uygulanan kapasite elemanındaki kayıp
P_{Cka}	: Kondansatörlerde harmoniklerden kanaklanan kayıp artışı
P_{Fe}	: Demir kayıpları
P_{kEK}	: Harmonik akım bileşenlerinin oluşturduğu ek kayıp güç
P_k	: Kayıp güç
P_u	: Dengesiz güç
Q, Q_L, Q_C	: Reaktif güç, Endüktans kVAr ı, Kondansatör kVAr ı
Q_s	: Kısadevre gücü
R	: Direnç
R_1, R_n	: Temel frekans ve n. harmonik frekansı için omik direnç
S	: Görünür güç
S_e	: Eşdeğer görünür güç
t	: Zaman
T	: Periyot
T_0	: Temel periyot, segment süresi
T_s	: Örnekleme periyodu
$\tan\delta$	: Kayıp faktörü
U_h	: Endüklenen h. harmonik gerilimi
$\dot{u}_h$	: Bir katsayı
$v(t)$	: Ani gerilim
V	: Gerilimin efektif değeri
$V_{a h}, V_{b h}, V_{c h}$	: Üç fazlı dengesiz sistemde faz nötr efektif gerilimleri
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	: Üç fazlı dengesiz sistemde faz arası efektif gerilimleri
V_e	: Üç fazlı dengesiz sistemde eşdeğer gerilim
V_n	: n. harmonik için gerilimin efektif değeri
V_o	: Gerilimin doğru bileşeni
V_{rms}	: Gerilimin efektif değeri
X	: Reaktans
$X^*(\omega)$	: $X(\omega)$ ' nin örneklenmiş değeri
$x^*(t)$	: $x(t)$ ' nin örneklenmiş değeri
X_C	: Kapasitif reaktans
$X_C^{(1)}$	: Temel frekanstaki kapasitif reaktans
$X_L^{(1)}$	: Temel frekanstaki endüktif reaktans
Y	: Admitans
Z	: Empedans
Z_n	: n. harmonik için empedans

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZİ

ÖZET

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin belirlenmiş bir gerilim seviyesinde sabit frekanslı ve genlikli olması istenir. Fakat bunlar pratikte tam olarak sağlanamaz. Elektrik güç sistemlerinde gerilim-akım karakteristiği lineer olmayan elemanlar nedeniyle gerilim ve akım dalga şekli bozularak sinüs formundan uzaklaşmaktadır. Harmonikler sinüzoidal dalga biçiminin bozulması ile ortaya çıkar. Enerji sistemlerinde lineer olmayan yükler, doğrultucular, eviriciler, ark fırınları gibi sistemler tipik harmonik kaynağı örnekleridir. Harmoniklerin elektrik güç sistemleri üzerindeki etkileri ise ek kayıplar ve aşırı ısınma, gerilim düşümleri, rezonans olayları, dielektrik zorlanması, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması vb. şeklinde özetlenebilir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde genel bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde harmonik kaynakları, harmoniklerin güç sistemleri üzerindeki etkileri ve harmoniklerin süzülmesi hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde harmonik analizinde kullanılan FFT yöntemine değinilmiş ve harmoniklerle ilgili tanımlar ve temel bağıntılara yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde harmonik analizi için geliştirilen algoritma ve akış diyagramı açıklanmış ve kullanılan yazılımdan bahsedilmiştir. Bu algortitma ve yazılım örneklenmiş gerilim ve akım değerleri üzerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak üç faza ait gerilim ve akım için harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları, THD, DF, P, Q, S, D, PF, DPF, CF ve P_u gibi bir harmonik analizi için gerekli elektriksel parametrelerin ve tanımların hesaplanmasına ve gerekli grafiklerin çizdirilmesine dayanmaktadır.

Beşinci bölümde ise MATLAB paket programı ile oluşturulan harmonik analizi yazılımı ile bir sanayi tesisinin alınan iki ölçüm sonucuna göre harmonik analizi yapılmış ve bu analiz sonuçları yorumlanmıştır. Altıncı sonuçlar ve tartışma bölümünde tez çalışması sunucunda elde edilen sonuçlar sıralanmış ve çeşitli önerilere yer verilmiştir.

HARMONIC ANALYSIS IN ELECTRICAL POWER SYSTEM

SUMMARY

In electric power system, energy is kept on predefined voltage level with constant frequency and amplitude however; it is not always possible precisely. Due to nonlinear factors, voltage and current waveform becomes nonsinusoidal, therefore harmonics appear on the power systems. Nonlinear load, rectifiers, inverters are the common examples creating harmonics affect on power system such as additional power loss, heating, inconstant voltage level, resonance, dielectric constrained, failure of control, safe and measurement systems.

First section of this study describes the basics of harmonics. Second section contains some knowledge about harmonic sources, affects of harmonics on power systems and filtering of harmonics. FFT methods are discussed in the third section and basic equations related to harmonic are given.

Section four consists of an algorithm its flow chart developed for harmonic analysis. This algorithm based on FFT and use 3-phase voltage and current sampled values to calculate basic parameters such as harmonics elements, amplitude, phase angle, THD, DF, P, S, Q, D, PF, DPF, CF, P_u .

In section five, an example is given and analyzed by the script written in MATLAB. Example has measurements value taken from the industry factory and algorithm is applied to those values. Some proposals and result of thesis are given in last section, 6th.

1. GİRİŞ

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sinüzoidal olup belirli gerilim seviyesinde ve sabit frekansta yapıldığı için böyle bir sistemde gerilim ve akım dalga şekli tam sinüs şeklinde olması beklenir. Bununla beraber pratikte bu tür enerjinin elde edilmesinde birtakım zorluklarla karşılaşılabilir. Bunların başında da senkron generatörlerin yapısı ve güç sistemine bağlanan lineer olmayan elemanlar ile bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüzoidal dalga şeklinde sapmalar olabilmektedir. Sinüzoidal dalga şeklinde sapma, genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir. Şebekenin manyetik ve elektrik devrelerindeki lineer olmayan durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu lineersizliklere sebep, bobin, transformatör, generatör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesi ve ayrıca yarıiletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalganın bazı kısımlarının kırılmasıdır. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur.

Sinüzoidal olmayan, bozulmuş sinüs formundaki akım veya gerilim dalgaları Fourier Serisine açıldığında (varsa) bir doğru bileşen ile frekansı temel frekansa denk olan bir temel bileşen ve frekansı temel frekansın tam katları olan “harmonikler” olarak tanımlanan bileşenlerin toplamı ile ifade edilebilir [6].

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi aşamasında harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenen bir durum değildir, fakat çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması (örneğin ark fırınları) kaçınılmazdır. Nonlineer yükler sebebiyle oluşan ve şebekeye yayılan harmonik akım bileşenleri devrelerini sistemdeki diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak harmonik gerilimlerini meydana getirirler. Gerilimdeki harmonikler, nonlineer yükün meydana getirdiği harmonik akımlarına, sistemdeki diğer yüklere ve şebeke parametrelerine doğrudan bağlıdır. Lineer olmayan elemanlar veya yükler tarafından üretilen harmonikler şebeke ve alıcılar için ciddi problemlere sebep olurlar. Bu problemlere örnek olarak; aşırı yüklenme ve ek kayıplar, cihaz veya sistem ölçümlerinde hatalar,

anahtarlama elemanları ve motorlarda aşırı ısınmalar, elektronik cihazların kontrollerinde bozulmalar sayılabilir. Bununla birlikte şebeke ağında oluşabilecek rezonanstan dolayı aşırı gerilim ve akım yükselmeleri olup güç faktörü düzeltici kondansatörler zarar görebilir ve bunun yanında işletmenin devamı imkansız hale gelebilir. Bunun dışında harmonikler kondansatörlerde dielektrik zorlanması, döner alan makinalarında moment salınımları gibi birçok problemlere sebep olmaktadır [41].

Şebeke harmoniklerinin olumsuz etkilerini sınırlı tutmak amacıyla bazı ölçütler geliştirilmiştir. Bunların en önemlisi hem gerilim hem de akım harmonikleri için geliştirilmiş “Toplam Harmonik Distorsiyonu” (THD) kavramıdır. Bazı ülkelerde, şebeke kısa devre gücüne göre sınırlamalarda getirilmektedir. Mevcut harmoniklerin tek tek ifadesi ise genelde temel bileşenin yüzdesi cinsinden verilmektedir.

Harmoniklerin güç sistemlerinde neden oldukları problemlerden dolayı harmoniklerin meydana gelmemesi için, ilk aşama olarak cihaz ve sistemler için koruma tedbirleri düşünülüp ona göre tasarım veya tesis yapılır. Ancak işletmede meydana gelen harmonikleri etkisiz hale getirme ve güç faktörünü iyileştirme işlemi ikinci aşamada uygun filtre sistemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Lineer olmayan yükler içeren elektrik sistemlerindeki problemleri çözmek için bir çok araştırma yürütülmüştür. Harmonikleri azaltmak ve güç faktörünü arttırmak için geleneksel olarak pasif LC filtreleri kullanılmıştır. Pasif filtrelerin sadece ayarlanmış bir frekansta harmoniği kompanze etmesi, şebeke empedansı ile rezonans oluşturma risklerinin olması ve boyutlarının büyük olmasından dolayı, araştırma alanları bu tür sakıncalardan kurtulmak için yeni bir eliminasyon sistemi üzerine kaymıştır.

Temel prensipleri 1970’lerde sunulan Aktif Güç Filtreleri (APF) üzerinde bir çok araştırma ve pratik çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde aktif filtreleme teknolojisi şebekedeki harmoniklerin, reaktif gücün ve nötr hattı akımlarının kompanzasyonunda kullanılmaktadır. Son çeyrek yüzyılda çeşitli APF konfigürasyonları ve kontrol yöntemleri sunulmuştur. APF’ler ayrıca gerilim regülasyonu ve gerilim dalgalanmalarını bastırmak içinde kullanılmaktadır.

Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin neden oldukları sorunları gidermek için öncelikle harmonik analizinin yapılarak bu analiz sonuçlarına göre ortaya bir çözüm konulması gerekmektedir. Harmonik analizi için enerji analizörleri ve bu

analizörlerin yazılımları kullanılmaktadır. Enerji analizörleri dengeli veya dengesiz her türlü sistemde sağlıklı ölçüm almak amacıyla dört gerilim ve üç akım girişine sahiptirler ve istenen zaman aralıklarında tüm fazlardan akım ve gerilim örneklemeleri alarak bu değerleri kaydederler. Analizör yazılımları ise bu kaydedilen örneklenmiş akım ve gerilim değerlerini kullanarak tüm parametrelerin faz, toplam ve ortalama değerlerini ve analiz için gerekli olan tanımlanmış büyüklükleri hesaplamaktadır. Yazılımlar, kayıtları yapılmış tüm ölçüm parametrelerini ve hesaplanan değerleri dalga formları, grafikler ve tablolar şeklinde kullanıcıya sunarlar. Bir harmonik analizi yazılımı kaydedilen örneklenmiş değerlere Hızlı Fourier Transformı (FFT) uygulanarak her bir akım ve gerilim için harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının belirlenerek gerekli hesaplamaların yapılması esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada da bir harmonik analizi yazılımı oluşturulmuş ve bu yazılım kullanılarak çeşitli harmonik sorunların yaşandığı bir sanayi tesisinin harmonik analizi yapılmıştır.

2. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR VE HARMONİKLERİN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

2.1. Harmonik Üreten Elemanlar

Elektrik üreten ve dağıtan firmalar ile elektriği kullanan müşteriler elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını isterler. Ancak bazı yükler yapıları gereği bazı yükler ise tasarım ve kontrol özellikleri bakımından besleme gerilimini ve akımını bozarlar yani harmonik üretirler. Bunun en belirgin nedeni uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntının lineer olmadığı yüklerdir. Bu tür yükler, genel olarak ark prensibine göre çalışan düzenler, gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri, demir çekirdekli sargı bulunduran makineler, elektronik veya yarıiletken teknolojisine göre tasarlanmış sistemler şeklinde sınıflandırılabilir. Sanayide, ticarethanelerde ve evlerde kullanılan harmonik üreten cihazlara her geçen gün yenileri eklenmektedir. Elektrik makinelerinin ve cihazlarının tasarım ve kontrol ilkelerinde meydana gelen değişiklikler ve güç elektroniğinin hızla ilerlemesi ve modern hayata bir çok yararlar getirirken beraberinde bir çok olumsuzlukları da getirmektedir. Örneğin generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren elemanlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akım üretirler. Ark fırınları ve kaynak makineleri gibi düzeneklerde normal işletmeleri gereği bir arkın oluşturması sonucunda harmonik üretirler. Tristörler, GTO'lar (Gate-Turn-Off Thyristor), MCT'ler (MOS-Controlled Thyristor) veya IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) sinüs biçimli akımı keserken yine harmonikler oluştururlar [18].

Yukarıda bahsedilen harmonik kaynakların bazıları aşağıda incelenecektir.

2.1.1. Generatörler

Makina hızına ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak döner makineler akım harmonikleri üretirler. Endüklenen elektromotor kuvveti alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir; yani 1., 3., 5., 7., 9., vb gibi tek bileşenleri vardır. Harmonik mertebesi arttıkça genlikleri azalır, harmonik frekansı ise artar ($h.f_1$), h . harmonik gerilimi,

$$U_h = 4,44 \cdot h \cdot f_1 \cdot N_s \cdot k_n \cdot \phi_n \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, üç ve üçün katı frekanslı harmonikler sadece faz-nötr gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yükün yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, üç ve üçün katı harmonikli akımlar geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yük ise, faz iletkenlerinden üç ve üçün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3 \cdot I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde üç ve üçün katlarında bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda üçün katı frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olurlar [2].

2.1.2. Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler [41].

Bilindiği gibi transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinüs formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, anma akımının %1'i seviyesindedir [29]. Elektronik güç konverteri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20' sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir [6]. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu gözönüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Tablo 2.1' de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak

verilmiştir [28]. Burada I_{μ} transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımdır.

Tablo 2.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	(%) $\frac{I_n}{I_{\mu}}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve Tablo 2.1’ de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur.

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüzoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen “K-Faktörü” tanımlanmıştır. K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. Bu faktör,

$$\text{K-Faktörü} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır [25]. Bu bağtıda n harmonik mertebesi, I_n ise baz değer olarak transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n. harmonik akım bileşeninin per-unit değeridir. K-Faktörü anma gücü 500 kVA’ın altındaki transformatörle için tanımlanmıştır.

Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde; her üç faza ait dengeli temel bileşen akımlarının toplamının sıfır olması sebebiyle nötr iletkeninden geçen akım sıfır olur. Bu durum üç ve üçün katı harmonikler dışındaki tüm dengeli

harmonik akım bileşenleri için geçerlidir. Her üç fazın üç ve üçün katı harmonik akımının üç katı nötr iletkeninden geçer ve nötr iletkeni bu akım nedeniyle aşırı ısınabilir. Bu nedenle nötr iletkeninin kesitinin belirlenmesinde 3. harmonik akımının da gözönüne alınması gereklidir. Transformatörün sekonderi üçgen bağlı ise üçgen bağlantının her bir düğümünde akım toplamının sıfır olması nedeniyle şebekeye üç ve üçün katı harmonik akımları geçmez. Bu özellikten yararlanarak şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmesini önlemek için transformatörün yıldız/üçgen (nonlineer yük tarafının yıldız ve şebeke tarafının üçgen) bağlı olması tavsiye edilir. Transformatörün yıldız-topraklı / yıldız-topraklı bağlı olması halinde üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer [6].

Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer [2].

2.1.3. Doğrultucular

Günümüzdeki ana harmonik kaynaklarından birisi de şebeke denetimli çeviricilerdir. DA iletim sistemleri, akü ve fotovoltaiik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. p darbeleri bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi,

$$h = k.p \pm 1 \quad (2.3)$$

$k=1,2,3,\dots$ olmaktadır. Çeviricilerde darbe sayısı $p= 6,12,18$ veya 36 olabilir. Harmonik akımı,

$$I_h = I_1 \cdot \left(\frac{\ddot{u}_h}{h} \right) \quad (2.4)$$

olup $\ddot{u}_h=1$ ' den küçük bir katsayıdır. Çeşitli harmonik değerlerinde çeviricilerin kumandasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Komütasyon süresi ihmal edildiği hallerde $\ddot{u}_h=1$ alınabilir. Bu durumda $I_h = I_1 / h$ elde edilir. Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile arttırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılabilir.

Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (Kontrollu doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin

üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir [6]. Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır.

2.1.4. Ark fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile elektrik güç sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklardan biri olarak önemli yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim güç iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle ark fırınları harmonik üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırabilen ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür [6]. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur [3]. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir.

2.1.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlineer akım gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler [6]. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve yol aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresant lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üçüncü harmonik ve üçüncü harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur [2].

Ayrıca floresant lambalara bağlanan balastların da bir manyetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini

elimine etmek mümkündür. Tablo 2.2’de magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir [6,41].

Tablo 2.2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu

	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$(\%) \frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

2.1.6. Diğer harmonik kaynaklar

Yukarıda açıklanan belli başlı bu harmonik kaynaklarına ilaveten diğer harmonik kaynaklardan da kısaca bahsedilebilir [18];

- Elektrik makinalarındaki diş ve oluklar
- Çıkık kutuplu senkron makinalarda hava aralığındaki relüktans değişimi
- Senkron makinalarda hava aralığı döner alanı
- Senkron makinalarda ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar
- Transformatörlerin ilk enerjilenmesi ve motorların kalkış akımları
- Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürmede kullanılan elektronik kontrol düzenleri
- Özellikle çimento ve maden sanayinde kullanılan lineer motorları süreklilik için kullanılan frekans dönüştürücüler
- İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler
- Kaynak makinaları
- Yarı iletken kontrollü cihazlar (motor hız kontrol düzenleri, ısıtıcılarda ısı regülasyon düzenleri, elektronik termosifonlar vb.)
- Başta teyp, portatif tv adaptörleri, ütü, traş makinası ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler

- Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemlerde tristör anahtarlama statik VAR kompanzasyonu
- Kesintisiz güç kaynakları ve Anahtarlama güç kaynakları
- Bilgisayar/network sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri
- Doğru Akım ile Enerji İletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar
- Elektrikli trenler ve tek-raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucuları, universal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, Elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri
- Konutlarda kullanılmaya başlanan fuzzy kontrollu çamaşır ve bulaşık makineleri, özellikle çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikrodalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler ve hava düzenleyiciler (klimalar)
- Elektro kimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya sprelerinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında özellikle ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi.

2.2. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik akımların frekansları 50 Hz' in tam katları olduğundan, bu akımların generatörler, transformatörler ve hat reaktansları üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümleri artar. Şebeke geriliminin frekansından farklı frekanstaki bu gerilim düşümleri, temel şebeke gerilimi üzerine binerek sinüzoidal gerilim biçimini bozarlar.

Bir tüketici tarafından üretilip şebekeye verilen harmonikler şebekede dağıtılarak başka bir tüketiciye ulaşırlar. Eğer harmonikler ulaştığı tüketicinin yükleri sadece lineer ise zararlı tüketicinin hesabı ikinci tüketicinin üstüne biner. Bu durum tüketici haklarına yeni bir kavram getirmiştir. Bu nedenle üretilen harmoniklerin ölçümünde kullanılmak üzere yeni elektronik sayaçlar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Bu tür sayaçlar “50 Hz’lik enerjiyi” ve “harmonik enerjiyi” ayıracak şekilde programlanabilir. Burada, elektrik idarelerinin tüketicilerden kullandıkları harmonik

enerji için mi yoksa şebekeye verdikleri harmonikler için mi fatura kesecekleri bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [18].

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüzoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir [16,20];

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmalar.
- Koruma ve Kontrol sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması.
- İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- Yüksek harmoniklerin bulunduğu bir şebekede toprak kısa devre akımlarının daha büyük efektif değerlere yükselmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması.

Elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmonik akım bileşenleri omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. Harmonikler sebebiyle oluşan ek kayıpları azaltmak için harmonik kaynağı durumundaki nonlinear yüklerin filtreler ile donatılması, konverterler gibi güç elektroniği devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek tutulması ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenir.

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin bu harmonik etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Bu amaçla, nonlinear yüklerin toplam harmonik distorsiyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır. Çeşitli ülkeler tarafından harmonikler için tanımlanmış sınır değerleri Tablo 2.3’ de verilmiştir [2,20].

Tablo 2.3 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	(THD) _v (%)	V _h /V ₁ (Tek)	V _h /V ₁ (Çift)
A.B.D.	Genel 2.4-69 115 ≤ Özel 2.4-69	5 1.5 8		
Avustralya	Dağıtım 33 ≥ İletim 22, 33, 66 110 ≤	5 3 1.5	4 2 1	2 1 0.5
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6	1	0.6
İngiltere	0.415 6.6, 11 33, 66 132	5 4 3 1.5	4 3 2 1	2 1.75 1 0.5
İsveç	0.43/0.25 3.3-24 84 ≥	4 3 1		

Tablo 2.4’de IEEE (519-1992) ‘nin dağıtım sistemleri için akım bozulma limitleri verilmiştir. Burada I_{sc} yükün şebekeye bağlantı noktasındaki kısadevre akımı, I_L yük akımı ve h harmonik derecesidir.

Tablo 2.4 Dağıtım sistemleri için akım bozulma limitleri

GENEL DAĞITIM SİSTEMİNDE AKIM BOZULMA SINIRLARI (120 V - 69.000 V)						
I_{sc} / I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.2.1. Harmoniklerin yol açtığı rezonans olayları

Bilindiği gibi endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artmasına rağmen, kapasitif reaktans frekans ile ters olarak azalır. Rezonans frekansında endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olur. Sistem rezonansı, harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkaracaktır. Sistemdeki rezonans durumları, harmonik seviyelerini etkileyen çok önemli bir etkidir. Seri rezonans harmonik akım akışı için düşük bir empedans göstermesine rağmen, paralel rezonans yüksek empedans gösterir. Rezonans durumları bir sorun oluşturmadığında sistem önemli seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir. Bu nedenle, sistemin cevap karakteristiklerini analiz etmek ve sistem rezonans sorunlarını gidermek çok önemlidir [38].

Paralel rezonans olayı en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör zarar görebilir. Bu durum endüstriyel sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Seri rezonans, rezonans frekansıyla uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar; böylece harmonik akımlarda bir büyüme söz konusu değildir. Ancak harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir: (a) Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir [12], (b) Rezonans kolundaki harmonik akımlar nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir ve bobin sargılarının izolasyonu zorlanır. Kondansatör uçlarındaki gerilim şebeke geriliminin X_c/R katına çıkar [39].

Rezonansların oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Harmonik rezonansının etkisi sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıftır. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar [2].

2.2.2. Harmoniklerin kayıplara etkisi

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

$$P_k = R I^2 \quad (2.5)$$

olarak tanımlanır. Bir nonlinear yükün akımının efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (2.6)$$

bağıntısı ile hesaplandığına göre, bu durumda R_1 iletkenin temel frekans direnci ve R_n iletkenin n . harmonik frekansındaki direnci olmak üzere iletkenindeki güç kaybı,

$$P_k = P_{k_1} + P_{k_{EK}} = R_1 I_1^2 + R_n \sum_{n=2}^N I_n^2 \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır [37,42]. Bu eşitlikte görüldüğü gibi harmonik akımların genliği arttıkça akımın harmonik bileşenleri nedeniyle oluşan ek kayıplar da artmaktadır.

Yukarıda güç sisteminde nonsinüzoidal akıma bağlı kayıplar ifade edildi. Sistemde gerilime bağlı olarak oluşan kayıplar ise elektrik makinalarının demir kayıpları ile kondansatörlerin dielektrik kayıplarıdır. Gerilimin nonsinüzoidal olması halinde de harmonikler nedeniyle ek kayıplar oluşur. Magnetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör, self bobin vb.) meydana gelen demir (nüve) kayıpları şöyle belirlenebilir; böyle bir elemana uygulanan gerilimin efektif değeri,

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (2.8)$$

olmak üzere meydana gelen demir kayıpları,

$$P_{Fe} \cong C_m \cdot V^2 = C_m \cdot \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (2.9)$$

olarak tanımlanır [20]. Burada C_m makinaların yapısı ile ilgili bir sabittir. Harmonikli gerilim uygulanan bir kapasite elemanındaki kayıplar ise,

$$P_{C_k} = \sum_{n=1}^N C_k \cdot (\tan \delta) \cdot \omega_n \cdot V_n^2 \quad (2.10)$$

olarak hesaplanabilir [2]. Bu eşitlikte $\tan \delta$,

$$\tan \delta = 1 / R\omega C \quad (2.11)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. f_1 temel frekans olmak üzere, $\omega_n = 2\pi n f_1$ ile hesaplanan n. harmonik için açısal frekans olup V_n ise n. harmonik geriliminin efektif değeridir.

2.2.3. Direncin, endüktif ve kapasitif reaktansın harmoniklere bağlı olarak değişimi

Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebiyle iletken yüzeyinde homojen dağılmaması yüzünden iletken direncinin değişmesi “deri etkisi” olarak tanımlanır. Frekans yükseldikçe akım iletkenin dış yüzeyine yakın bölgelerden akma eğilimi gösterirler. Bu nedenle iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. Deri etkisi olayının sonucu; iletkenin direncinin artması ve endüktansının azalmasıdır. Endüktif deri etkisi nedeniyle iletkenin endüktansındaki değişim genellikle ihmal edilebilir [2].

Harmonik mertebesi ile frekansın orantılı artması, direncin değerindeki harmonik bağımlı değişimi dikkate almayı zorunlu kılmaktadır. Literatürde deri etkisi nedeniyle direnç artışının hesaplanmasını sağlayan, deneysel çalışmalara dayalı birçok ampirik bağıntı verilmiştir.

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

$$\left. \begin{aligned} X_L^{(n)} &= nX_L^{(1)} \\ X_C^{(n)} &= \frac{X_C^{(1)}}{n} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

eşitlikleri ile bulunur. Bu eşitliklerde bobinin endüktansının (L) ve kondansatörün kapasitesinin (C) frekans ile değişmediği kabul edilmiştir. R, L ve C elemanlarının empedans ve admitanslarının temel bileşen değeri ve temel bileşen ile harmonik eşdeğeri arasındaki ilişki Tablo 2.5’ de verilmiştir [20].

Tablo 2.5 Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğeri

Eleman (*)	Model	Parametre	Temel Bileşen Değeri	Harmonik Değeri
Direnç	Empedans	R	R	$R+R_h$
	Admitans	G	$1/R$	$1/(R+R_h)$
Endüktans	Empedans	X_L	X_L	nX_L
	Admitans	Y_L	Y_L	Y_L/n
Kapasite	Empedans	X_C	X_C	X_C/n
	Admitans	Y_C	Y_C	nY_C

(*) Elemanların ideal ve lineer oldukları kabul edilmiştir.

2.2.4. Kondansatörler üzerindeki etkisi

Yüksek harmoniklerin neden olduğu gerilim distorsiyonundan en çok etkilenen eleman güç faktörü denetiminde kullanılan kondansatör üniteleridir. Gerçekte bir harmonik probleminin ilk belirtilerinden biri kondansatör ünitelerinde oluşan arızalardır. Bu elemanlarda en önemli problem aşırı etkin akımlardır ve buna bağlı olarak kayıpların artmasıdır. Diğer bir problemde tepe geriliminin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır.

Gerilim sinüzoidalden ayrılması kapasiteler üzerinde ek kayıplara yol açar; n harmonik derecesini, C kondansatör kapasitesini, $\tan\delta = R(1/\omega C)$ kayıp faktörünü; $\omega_n=2\pi f.n$ harmonik frekansı, V_n n. harmoniğe ilişkin efektif gerilim değerini göstermek üzere kondansatörlerdeki ek dielektrik kayıpları yani kondansatörde harmoniklerden kaynaklanan kayıp artışı [18],

$$P_{C_{ka}} = \sum_{n=2}^{\infty} C . (\tan\delta) \omega_n . V_n^2 \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Gerilim ve güç faktörünü düzeltmek için şönt kondansatörlerin kullanımı harmonik seviyeler üzerinde önemli bir etki meydana getirir. Kondansatörler harmonik üretmezler ancak olası rezonans şartlarını oluşturan şebeke çevrimini sağlarlar. Kondansatörlerin ilavesi ile sistem, yük akımı veya sistem geriliminde var olan harmonik frekans civarında rezonansa gelebilir. Kondansatör tesisi bulunan alçak gerilimli bir sistemin rezonans frekansı,

$$n = \sqrt{(Q_s / Q_c)} \quad (2.14)$$

ifadesinden bulunabilir. Burada, n rezonansın oluşturabileceği harmonik derecesi, Q_s mevcut kısa devre gücü kVA, Q_c kondansatör tesisinin kVAr değeridir.

Frekansın artmasıyla kapasitif empedans azalır. Kondansatör akımı,

$$I_n = n (V_n) \quad (2.15)$$

olacaktır. Burada; I_n yüzde harmonik akımı, n harmonik derecesi, V_n uygulanan yüzde harmonik gerilimidir.

Örneğin, kondansatör gerilimi %15 yedinci harmonik gerilimi içeriyorsa, kondansatör akımı %105 olacaktır. Bu durum, sigortaların beklenmedik şekilde atmasının nedenini oluşturur. Orta gerilim kondansatör ünitelerinde, nominal akım değerlerinin %125 ile %165'i arasında sigorta değeri kullanıldığından dolayı akım sınırı, standartlarda %180 olmasına karşın daha düşük olabilir. Alçak gerilim kondansatörleri, genelde nominal değerlerin %200 katı değerinde sigorta ile korunur [40].

Filtre devrelerindeki kondansatörler güç faktörünü düzeltme görevinin yanı sıra harmonik distorsiyon kontrolünü de sağlamalıdır. Reaktörün ilavesi gerçekte kondansatör gerilimini arttırır; çünkü reaktör üzerindeki görülen küçük gerilim düşümü göz önüne alınmaz. Sonuç olarak filtre devrelerindeki kondansatörler, gerilim bakımından nominal sistem geriliminden en az %10 daha fazla olmalıdır.

Güç kondansatörlerinin, TSE 804' e göre sürekli olarak güçlerinin %135'i kadar yüklenmesine izin verilir. Eğer sürekli çalışma akımı harmonikler nedeniyle bu sınırın üzerine çıkarsa kondansatörün ömrü kısacaktır. Örneğin harmoniklerden dolayı akımın %10 artması nedeniyle, bir kondansatör grubunun ömrü %30 düşer [26].

2.2.5. Transformatörler üzerindeki etkiler

Harmonikler, transformatörlere iki şekilde etki ederler. Akım harmonikleri bakır sargı kayıplarında (I^2R) ve kaçak akı kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise eddy ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve mekanik yalıtımın zorlanmasına (sargı ve nüve sacında) neden olur [2]. Her iki durumda da transformatörlerde ek ısınmalar oluşur ve transformatör sargılarının aşırı ısınmaları işletme ömürlerini düşürür [9].

Başlıca kayıp bileşenleri, I^2R sargı kayıpları, sargı eddy-akım kayıpları ve sargılar, nüve, bağlantı noktaları gibi alanlardaki manyetik akıdan dolayı oluşan kaçak akı kayıplarıdır. I^2R bileşeninden kaynaklanan kayıplar, deri etkisi ve iletken ısınmasından dolayıdır. Sargı eddy-akım kayıpları, yük akımının ve frekansın karesiyle artar. Diğer kaçak kayıplar da ilk iki kayba göre daha az olmakla beraber frekansla artar. Yani frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir [18].

Standartlar, transformatör aşırı gerilim değerlerini belirlemiştir. Buna göre maksimum aşırı gerilim nominal yükte %5, yüksüz halde %10' dur. Bu sınırlar harmonik dalga şeklinin bozulması durumunu da içine alır [40].

Diğer bir sorun ise transformatör endüktansı ile transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitesi arasında rezonans meydana gelebilir. Transformatörün dengesiz bir yükü beslemesi de bir sorun olarak düşünülebilir. Yük akımı, d.a. (doğru akım) bileşeni içeriyorsa, transformatör manyetik devresinin doymasının sonucu a.a. (alternatif akım) uyarma akımına ait tüm harmonik bileşenlerin seviyesi önemli ölçüde artacaktır. Harmoniklerin güç transformatörlerindeki etkilerinden biri de üçgen bağlı sargılarda sıfır bileşen akımların dolaşmasıdır. Tasarım sırasında bu akımlara gerekli önem verilmediği zaman sargılardan aşırı akımlar geçebilir [2].

2.2.6. Döner makinalar üzerindeki etkiler

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makinalar üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu etkilerden biri, harmonik kayıplardır. Harmoniklerin varlığı diğer elemanlarda olduğu gibi stator sargılarında, rotor devresinde, stator ve rotor saçlarında ek kayıplara yol açar. Stator ve rotor uç sargılarında harmonik akımlarının

oluşturduğu kaçak alanlar da ek kayıplar üretir. Harmoniklerin varlığı makina kayıplarını yaklaşık olarak %10-12,5 arttırır. Harmoniklerin yol açtığı diğer bir olay da, harmonik momentleridir. Sinüzoidal olmayan gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur; motor verimi yaklaşık olarak %2 düşer [33]. Harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi çoğu zaman ihmal edilebilir, ancak önemli sayılabilecek moment salınımlarına yol açabilir [2]. Diğer taraftan harmoniklerin motor ömründe azalmaya neden olduğu da vurgulanmıştır.

Standartlar, motorlar için kesin gerilim veya akım harmonik standartları vermemesine rağmen, endüksiyon motorları için %5' lik bir gerilim harmoniği sınırlaması kabul edilebilir [2].

2.2.7. Koruma sistemleri (röleler) üzerindeki etkiler

Bilindiği gibi koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik distorsiyondan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Dalga şeklinin bozulması koruma rölelerinin performansını etkiler; ya gerektiğinde çalışmamasına ya da uygun olmayan yerde çalışmasına neden olurlar. Faz açısının gerilim veya akım dalga şeklinin temel bileşen ile harmonik bileşenler arasında değişmesi, rölenin cevabını önemli ölçüde etkiler [14].

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Özellikle sayısal mesafe koruma rölelerinde büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına yol açabilmektedir [27]. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerindeki yapılan testlerden, %10-20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerden fazla bir işletme problemi oluşmadığı gözlenmiştir [34].

2.2.8. Ölçme aygıtları üzerindeki etkiler

Ölçü aletleri, tam sinüzoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesiyle orantılı dönme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Elektrik saatleri ve aşırı akım röleleri gibi endüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşenlere göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akımın ve diskte endüklenen eddy akımının çarpımına eşittir. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalırlar. Bu da elektrik saatinin temel

frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik distorsiyonunun oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvaksiyonel sayaçların (kWh sayaçlarda) harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür [2].

2.2.9. İletişim hatları üzerindeki etkiler

İletişim ve telefon hatlarının yan yana bulunması, telefon haberleşmesi ile parazit oluşturur. Güç devresindeki akım akışı, yakınındaki iletişim devresi iletkenlerinde akım/gerilim endükleyecek bir manyetik/elektrostatik alan oluşturabilir. Parazitlerin miktarı akım/gerilim genliğine ve frekansa bağlıdır. Haberleşme devrelerindeki gürültü, iletim kalitesini azaltır; iletilen sinyalle girişim yapabilir veya gönderilen bilgide kayba neden olabilir [19].

2.2.10. Güç elektroniği elemanları ve anahtarlama elemanı üzerindeki etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra harmonik distorsiyona çok duyarlıdır. Bu elemanların doğru çalışması gerilim sıfır geçişlerinin doğru saptanmasına bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilim sıfır geçişlerini kaydırır. Bu durum birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Bu kayma nedeniyle oluşan komütasyon hataları elemanların çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Yarı-iletken elemanlarda delinme etkileri ve ek ısınma etkileri görülür. Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarında harmoniklerin bir takım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örneğin tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, ateşleme anlarının değişmesi vb. sayılabilir [40].

Harmonik bileşenler anahtarın akım kesme yeteneğini de etkileyebilir. Yani harmonik bileşenler akım sıfır geçişlerinde yüksek di/dt değerine neden olabilirler ve akım kesme işlemini zorlaştırabilirler [40].

2.2.11. Güç iletim sistemleri üzerindeki etkiler

Güç iletim sistemleri (hava hattı veya yer altı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi akım bileşenlerinin oluşturduğu I^2R kayıplarıdır. Bu kayıplar:

$$P_{k_{EK}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.16)$$

şeklinde verilebilir. Deri etkisi ihmal edilirse $R_n \rightarrow R$ (hattın omik direnci) yazılabilir.

Diğer taraftan harmonik akımların hat boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n. akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü

$$(\Delta V)_n = I_n \cdot Z_n \quad (2.17)$$

olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değeriyle orantılı olarak dielektrik zorlanmayı artırır. Bu da kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda arıza sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını artırır. Aşırı gerilimler nedeniyle yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir [18].

Harmoniklerin korona başlangıç ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır [34].

2.2.12. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

Bilindiği gibi güç faktörü ($\cos \phi$) çalışan bir sistemden sürekli enerji çalmakta ve sistemi sürekli büyümeye zorlamaktadır. Fakat bunun yanında fazlararası ya da faz toprak arasına yerleştirilen yüksek frekanslı akımlara ihtiyaçları olan nonlineer yükler de sistem kapasitesinden çalan yeni bir hırsız olarak karşımıza çıkmaktadır.

Harmonik akımlara ihtiyaç gösteren yeni cihazlar devreye alındığında güç faktörü 0.88'lerden 0.70'lere düşmektedir.

Lineer olamayan yükleri içeren tesislerde kapasite değeri ne kadar büyük olursa olsun güç faktörü belli bir değere kadar yükselmekte daha sonra düşüş göstermektedir. Bu durum pratikte ne kadar gereksiz yere kapasite kullanımı olduğunu gösterir. Bu bakımdan güç faktörünü istenen değere çıkartmak için harmoniklerin mutlaka filtre edilmesi zorunluluğu vardır [17].

2.2.13. Diğer bazı elemanlar ve küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerindeki etkiler

Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir [2,16,18,40];

- Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesini bozabilir.
- Flouresant ve civa buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada, balastın yanısıra kondansatörler de kullanılır. Devrenin endüktansı ile kondansatörler bir rezonans devresi oluşturabilir. Eğer harmonik frekansı bu devrenin rezonans frekansına eşit olursa aşırı ısınma ve arızalar oluşur. Akkor flamanlı lambaların kullanıldığı aydınlatma tertibatında yaşlanma etkileri görülür. Örneğin anma efektif geriliminin %105 değerinde sürekli işletmede lamba ömrünün %47 oranında azaldığı gözlenmiştir.
- Kontrol ve kumanda sistemlerinde harmoniklerden kaynaklanan istenmeyen etkiler oluşabilir. Uzaktan anahtarlama ve yük kontrolünü gerçekleştiren sistemin yanlış çalışmasına neden olan güç hattı taşıyıcı sistemler ile ripple (dalgalanma) kontrolü arasında girişim oluşturur.
- Harmoniklerin oluşturduğu gürültü, kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına neden olur. Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültü oluştururlar.
- Bir paralel kondansatör ünitesindeki sigortanın atması aşırı harmonik seviyelerinin ilk göstergesidir. Büyük harmonik akım seviyeleri, sigortaların akım-zaman karakteristiklerinde kaymalara ve dolayısıyla istenmeyen çalışma biçimlerine neden olabilirler. Harmonikler, minimum erime zamanlarını da azaltabilirler.
- Sistemdeki harmonik aşırı gerilim sonucu yalıtılmış kabloların dielektrik delinmesi söz konusu olabilir. İletkenlerde frekansın artması nedeniyle deri etkisi de artar. Diğer taraftan özellikle ticari binalarda harmonik üreten tek fazlı yükleri besleyen 3 fazlı 4 telli sistemlerde nötr akımından da akım geçer. Bu akım veri işleme merkezlerinde büyük önem taşır.

Yukarıda sayılan bu etkiler harmonik kaynağına ve güç sisteminde bulunduğu yere ve tabii ki harmonik yayılmayı belirleyen şebeke karakteristiğine bağlıdır.

2.3. Harmoniklerin Süzülmesi

Harmoniklerin şebekeler üzerine olan zararlı etkilerini, günümüzde tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa bile, en alt düzeye indirmek çeşitli yöntemlerle mümkün olabilmektedir. Bu yöntemler işletme öncesinde ve sonrasında olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Tasarıma yönelik önlemler yeterli değildir. Buna ek olarak harmonik akımların şebekeye geçmesine engel olan düzenlere gerek vardır. Faz ile nötr arasında bulunan ve istenen harmonik akımın süzülmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir. Filtreleri en genel olarak pasif ve aktif filtreler olarak ikiye ayırabiliriz.

2.3.1. Tasarımda alınabilecek önlemler

Bu tip önlemler, daha önce bahsedilen harmonik kaynakların, ya imalatları ya da şebekelere bağlanmaları esnasında alınır.

Senkron generatörlerde endüvi iletkenlerinden endüklenen elektromotor kuvvet, hava aralığındaki manyetik alana bağlıdır. Bu nedenle elektromotor kuvvetin sinüzoidal olması, ϕ manyetik akısının da sinüzoidal olmasına bağlıdır. Senkron makinada alan eğrisinde belirli harmoniklerin bulunmasına rağmen, endüklenen gerilimde harmoniklerin etkisi çok daha düşüktür. Endüvi sargılarının özel bir şekilde düzenlenmesi ve sargı adımının uygun seçilmesi ile alan eğrisindeki 3., 5., ve 7. harmonikler, gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabilir. Çıkık kutuplu senkron makinalarda alan eğrisi dikdörtgendir, kutuplara uygun şekil verilmesi, endüvi oluklarının belirli bir şekilde düzenlenmesi (olukların yan meyilli yapılması) ve bunun gibi bir takım yapısal çarelere başvurularak gerilim eğrisinin sinüzoidal olması sağlanabilir [36]. Yuvarlak rotorlu senkron makinalarda alan eğrisini sinüs eğrisine yaklaştırmak için, bir kutup taksimatının yalnız $2/3$ ’ ü sarıldığı gibi, ayrıca oluklar arasındaki uzunluklar da birbirinden farklı yapılmak suretiyle aynı amaca ulaşılır.

Dönüştürücülerde darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri o kadar yüksek ve harmonik değerleri de o kadar küçük olur. Böylece bunların zararlı etkileri de o oranda azalır. Bu özellikten dolayı harmonik üreten güç elektroniği aygıtlarında, daha tasarım aşamasında gerekli tedbirler alınarak harmoniklerin şebekedeki etkinlikleri azaltılabilir. Örneğin, bazı tesislerde darbe sayısı 6’dan 12’ye veya

12'den 36'ya çıkartmakta, daha önce görülen olumsuzlukların artık söz konusu olmadığı literatürde kaydedilmiştir [32].

Genellikle büyük transformatörlerde çekirdekten maksimum yararı sağlamak için endüksiyon değeri büyük tutulur. Bu durumda ise mıknatıslanma akım dalga şeklinde harmonikler meydana gelir. Mıknatıslanma akımını düşürmek için en uygun tedbir, manyetik endüksiyonun düşük tutulmasıdır. Modern transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanılarak, manyetik akı ve bunun sonucu olarak mıknatıslanma akımı düşürülür. Bu tip sac kullanılması halinde harmonikler sıcak haddelenmiş saclardakine göre 1/5 değerine düşer. Böylece şebekelerde harmonik tehlikesi büyük oranda önlenir [32].

2.3.2. Pasif filtre

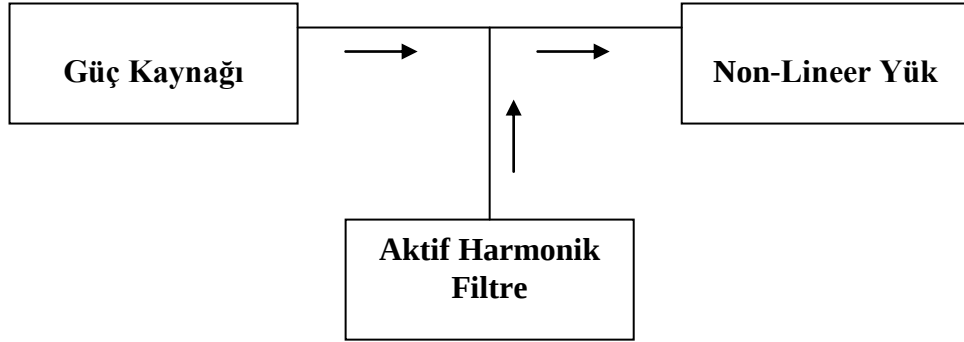
Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan pasif filtre, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör (sığa, C) ve endüktans (bobin, L) bileşimidir. Bazı durumlarda direnç (R) de ilave edilebilir. Burada amaç, yokedilmek istenen harmonik bileşen ile rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gereklidir. Genelde en etkin harmonik bileşenler için tasarım yapılır. Etkisi az olan harmonik bileşenler için zayıflatan bir filtre devresi düşünülebilir. Burada dikkat edilecek bir nokta filtre devrelerinde kullanılan kondansatörlerin normal güç kondansatörlerine göre daha yüksek gerilimlerde çalışabilmeleri gerekir. Bu tür bir tasarım dengeli sistemler için uygundur. Çünkü dengeli sistemlerde çift mertebeden harmonikler (2., 4., 6., 8., ...) gözükmez. Diğer taraftan Üçgen-Yıldız bağlı transformatörlerde 3 ve 3'ün katlarındaki harmonikler (3., 9., 12., 15., ...) ise üçgen sargıda dolaşacaklarından sisteme etkileri dikkate alınmaz. Bu bakımdan dengeli sistemlerde filtre tasarımı tek dereceli harmoniklere göre yapılır. Dengesizliğin olduğu üç fazlı sistemlerde (örneğin ark ocağının bulunduğu tesislerde hem tek hem de çift dereceleri harmonik bileşenlerin filtre edilmesi söz konusudur) filtre tasarımı ayrı bir konudur.

2.3.3. Aktif filtre

Pasif filtrelerin yalnız ayarlanmış belli bir frekanstaki harmoniği süzmesi, işletmede büyük hacim kaplamaları ve şebeke empedansı ile rezonans oluşturma riskleri gibi dezavantajlarının olması çalışmaları aktif filtre üzerine kaydırmıştır. Pasif filtreye

alternatif olarak sunulan aktif filtreler gelişen güç elektroniği teknolojisi ile birlikte 1980’li yılların başlarından itibaren kullanımı pratik bir değer kazanmış ve endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlanmıştır.

Teknik olarak aktif filtrenin çalışma prensibi (Şekil 2.1), nonlinear yükün şebekeden çektiği harmonik içeriğin aktif filtre tarafından sağlanması ve bu şekilde şebeke akımının bozulmamasını sağlamaktadır. Aktif filtre bu şekilde yükün çektiği harmonik bileşenleri karşılamaktadır. Güç elektroniği uygulamaları geliştikçe bu konuda ilerleme göstermiştir. Aslında en büyük harmonik kaynak olarak gösterilen güç elektroniği elemanları ve uygulamalarından kaynaklanan sorun yine aynı yöntemle giderilmeye çalışılmaktadır [18].

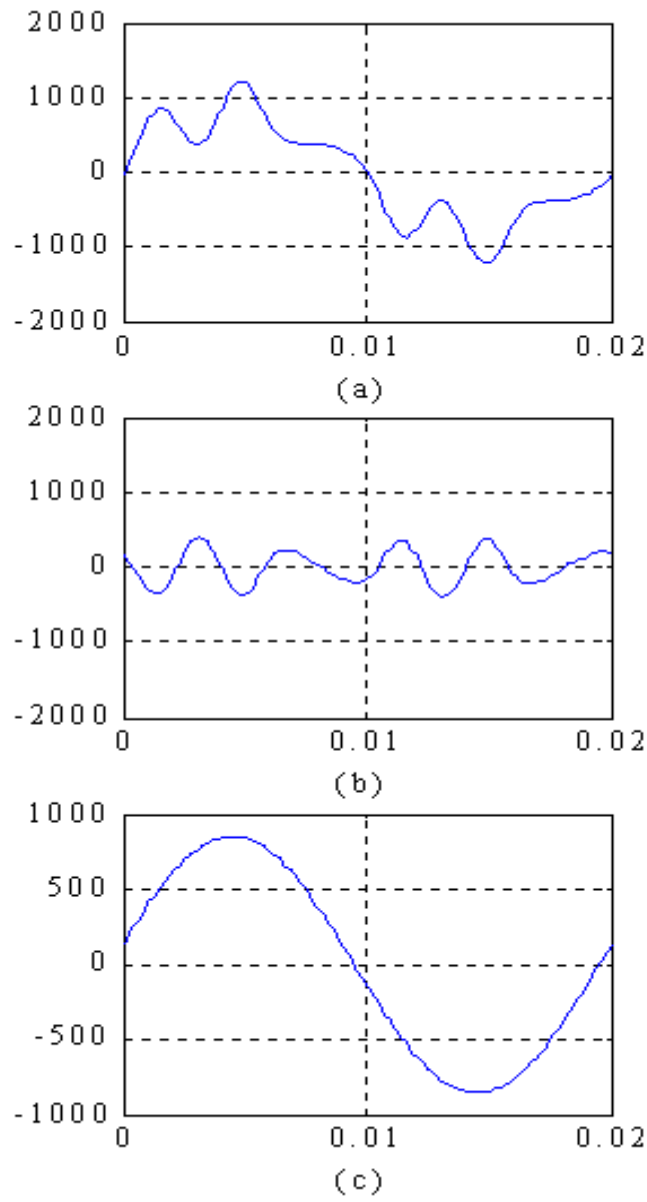


Şekil 2.1 Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi

Son yıllarda harmonikleri elimine etmek ve reaktif güç kompanzasyonu için aktif filtre ideal bir teknoloji olmuştur. Aktif güç filtresi dijital bir kontrol sistemi ve bir PWM inverterden oluşur. Aktif güç filtresi devreye seri veya paralel bağlanabilir. Seri aktif filtre gerilim kaynağı olarak paralel aktif filtre ise akım kaynağı olarak davranır. Paralel aktif filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak çalışarak reaktif güç kompanzasyonunu da gerçekleştirebilir. Ancak bu durumda frekans domeninde kompanzasyon paylaşımı konusunda problem çıkabilmektedir. Aktif filtrenin performansı akım kontrol ünitesi ve harmonik belirleme ünitelerine bağlıdır. Harmonikleri belirlemek için p-q teorisi olarak da bilinen ani reaktif güç metodu veya FFT metodu yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ani güç metodu anlık çalışır ve o anda ölçülen akımı tam sinüs dalgasına tamamlayacak bir kompanzasyon akımı üreten hesaplama devrelerinden oluşur. Hesaplama için yük akımı ve kaynak gerilimi kullanılır. Hesaplama için az sayıda bileşene ihtiyaç duyması ve bütün harmonik bileşenleri kompanze etmesi bu metodun avantajları olarak sayılabilir. FFT metodu fourier analizi ile harmonikli dalga şeklinin periyodikliği prensibine dayanır.

FFT hesaplamalarının performansı için DSP kullanılmaz ise bu metod pratik olmaz. DSP ile bile kontrolün zaman cevabı anlık güç metoduna göre gözle görünür derecede uzun sürer. Bu yüzden FFT metodunu hızlı değişen yükler için optimum olmayacaktır. Bu metod ile seçilmiş harmonikler yok edilebilir. Yük sabit ise harmoniklerin periyodik olması nedeniyle FFT metodunun yavaş cevap etkisi bir faktör değildir.

Aktif filtrenin çeşitli nonlineer yüklere göre çalışma şeklinin örneği Şekil 2.2 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Aktif filtre kullanımı
(a) Yük akımı (b) Aktif filtre akımı (c) Şebeke akımı

2.3.4. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranışları karşılaştırmalı olarak Tablo 2.6 'da verilmiştir [18].

Tablo 2.6 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Harmonik akımların kontrolü	Her frekans için bir filtre ister (çok hacimlidir)	Aynı anda bir çok harmonik akımın kontrolü mümkündür
Frekans değişimi etkisi	Etkinliği azdır	Etkisi yoktur
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkisi yoktur
Akım yükselmesi etkisi	Aşırı yük ve bozulma riski	Aşırı yükleme riski yoktur
Yeni yük eklenmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün
Temel dalga frekans değişimi	Mümkün değil	Ayar ile mümkün
Genel boyutlar ve ağırlık	Harmonik derecesine göre çok değişken	Kompakt çözümler sunar

Yukarıda belirtilen genel karşılaştırmanın yanında aktif harmonik filtrenin diğer üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

i) Adaptasyon (Uyumluluk)

- Her türlü yük (tek-faz veya üç-faz) için uyumlu
- Sisteme bağlantısı kolay (istenirse panoya ve duvara montaj)
- Güncelleştirilmesi (ilave modül ile) kolay ve pratik
- Uzaktan bağlantı kullanıcı arabirim desteği

ii) Performans, Devamlılık ve Çeşitlilik

- Elektrik tesisatı için en doğru ve kesin projelendirme yapılabilir
- Tüm yada seçilen harmoniklerin süzülmesi sağlanabilir
- Şebekeye paralel bağlanır ve aşırı yüklere karşı akım koruması ile devamlılık da sağlar
- Filtreleme kapasitesi artırımı için 4 adede kadar paralel bağlantı yapılabilir.

3. HARMONİK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE HARMONİKLERLE İLGİLİ TANIMLAR VE TEMEL BAĞINTILAR

3.1. Giriş

İdeal olarak, bir elektrik güç sisteminde tüketiciye sabit gerilim ve frekansta enerji verilmeli, gerilim dalga şekli sinüs formunda olmalıdır. Ancak güç sistemlerinde sayıları günden güne artan, gerilim-akım karakteristikleri nedeniyle “nonlinear yükler” olarak tanımlanan; HVDC sistemleri, akü şarj devreleri, kontrollü doğrultucular ve ark fırınları gibi özel karakteristikli yükler şebekeden bozulmuş sinüs formunda (distorsiyonlu) akım çekerler. Bu sinüzoidal olmayan akımlar şebeke geriliminin de dalga şeklini bozarlar ve sonuç olarak nonlinear yük akımları ve şebeke gerilimleri temel bileşen olarak tanımlanan, frekansı (sistemin sinüzoidal sürekli halde kararlı çalışmak üzere dizayn edildiği) temel frekansa denk olan bileşenden başka frekansı temel bileşenin tam katları olan harmonik bileşenleri de içerirler [6,41].

3.2. Harmoniklerin Matematiksel İfadesi

Sinüzoidal olmayan ve $f(x)$ ile ifade edilen herhangi bir periyodik dalga, Fransız matematikçisi Fourier tarafından temel frekanslı bir sinüs bileşeni ile harmonik frekanslı sinüs bileşenlerinin ve varsa doğru bileşenin toplamıyla,

$$y = f(x) = c_0 + c_1 \sin(x + \phi_1) + c_2 \sin(2x + \phi_2) + \dots + c_n \sin(nx + \phi_n) \quad (3.1)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu eşitlikten yararlanarak harmonik bileşenleri içeren bir nonlinear yükün akımı zaman domeninde,

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{m2} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + I_{mn} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.2)$$

ile ifade edilebilir. Burada ω açısal frekans ($\omega=2\pi f$ olup, f temel bileşen frekansıdır), n en yüksek harmonik mertebesi, I_0 akımın doğru bileşeni, h harmonik mertebesi

olmak üzere ($h=1,2, \dots, n$) I_{mh} ve ϕ_h sırasıyla h . harmonik akım bileşeninin maksimum değeri ve faz açısıdır.

Yukarıdaki (3.1) eşitliği zaman domeninde doğru bileşen ile sinüs ve kosinüs bileşenlerinden oluşan ve “Fourier Serisi” olarak adlandırılan bir seri şeklinde,

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nt) + b_n \cos(nt) \quad (3.3)$$

olarak da gösterilebilir. Bu serideki a_0 , a_n ve b_n katsayıları veya Fourier bileşenleri olarak adlandırılır. Aşağıda Fourier katsayılarının elde edilmesi ile ilgili yöntemler kısaca açıklanmıştır.

3.3. Fourier Katsayılarının Belirlenmesi

Harmonik analizi, nonsinüzoidal bir periyodik dalga'nın Fourier katsayılarının ya da başka bir deyişle temel bileşen ve daha yüksek dereceli harmoniklerin genlik ve faz açılarının ve varsa doğru bileşeninin hesaplanması işlemi ile tanımlanabilir [2]. Fourier katsayılarının belirlenmesi için analitik yöntem, ölçme yöntemi, grafik yöntemi ile Ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ve Hızlı Fourier transformu (FFT) gibi nümerik analiz yöntemlerinden yararlanılmakta olup aşağıda bunlardan bir kısmı kısaca açıklanmıştır [41].

3.3.1. Analitik yöntem

Fourier serisindeki terimlerin a_0 , a_n ve b_n katsayıları analitik yöntem kullanılarak,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nt) dt \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. (Bu eşitliklerde işaretin periyodu, 2π olarak alınmıştır). Bu katsayılar elde edildikten sonra (3.3) eşitliği ile verilen Fourier Serisi, $c_0 = a_0$ olmak üzere zaman domeninde,

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(nt + \phi_n) \quad (3.5)$$

olarak da ifade edilebilir. Bu eşitlikte c_n ve ϕ_n ,

$$\left. \begin{aligned} c_n &= (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \\ \phi_n &= \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

eşitlikleri ile hesaplanır [3]. Yukarıdaki (3.5) eşitliği ile tanımlanan Fourier serisinde $c_1 \sin(t + \phi_1)$ terimine $f(t)$ fonksiyonunun temel bileşeni denir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüzoidal değişime karşılık düşen dalgayı belirler [22,23].

Periyodik bir fonksiyonun Fourier bileşenleri fonksiyonun dalga şekline bağlıdır. Fourier analizi sonunda dalganın şekline bağlı olarak bazı bileşenler bulunmayabilir [3]. Bir $f(t)$ fonksiyonu göz önüne alındığında dalga simetrisi nedeniyle seride bulunmayan bileşenler şöyle açıklanabilir;

- i) $f(t) = -f(-t)$ ise $b_n=0$ olur ve seride kosinüslü terimler bulunmaz.
- ii) $f(t) = f(-t)$ ise $a_n=0$ olur ve seride sinüslü terimler bulunmaz.
- iii) $f(t) = f(\pi+t)$ ise seride çift harmonikler bulunmaz.
- iv) $f(t)$ fonksiyonunun grafiğinde negatif ve pozitif yarı dalgaların alanları birbirine eşit ise a_0 sıfır olur ve seride doğru bileşen bulunmaz.

3.3.2. Ölçme yöntemi

Ölçme yöntemi ile harmonik bileşenlerin genlik, faz açısı ve frekanslarını belirlemek için günümüzde Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanan dalga analizörü veya harmonik analizörü adı verilen cihazlardan yararlanılır. Bu cihazlarda sistem gerilimi bir gerilim probu ile akım ise bir pens akım transformatörü yardımıyla örneklenerek cihaz girişine uygulanır ve harmonik bileşenleri gözlenerek ölçülür [5]. Günümüzde, gerçek zamanda sürekli harmonik analizi yapılarak sinüzoidal olmayan akım veya gerilimi bir ekran üzerinde dalga şeklinde veya temel bileşenin yüzdesi cinsinden akım veya gerilim harmonik spektrumu 50. harmonik bileşenine kadar gösterebilen harmonik analizörleri bulunmaktadır [30].

Harmonik ölçme tekniğinde ölçüm sonuçları genelde harmonik akım veya gerilim bileşenlerinin genliğinin efektif (rms) değerinin ölçümüne dayanır. İncelenen sistem için doğru bir harmonik eşdeğer devresi elde edebilmek için genlik ile birlikte faz açısının da ölçümü gereklidir. Ancak doğru eşdeğer devre ile sistemin harmonik seviyelerinde oluşacak değişiklikler önceden tahmin edilebilir, sistemin farklı düğümlerindeki ölçmeler karşılaştırılabilir ve harmonik yük akışı değerlendirilebilir. [41].

3.3.3. Grafik yöntemi

Grafik yöntemi, periyodik dalganın bir fonksiyon ile ifade edilmediği durumlarda kullanılır. Genel olarak osiloskoptan alınan veya bir deneydeki ölçüm sonuçlarına göre elde edilen nonsinüzoidal dalganın grafiği bir periyot içinde q eşit parçaya bölünerek; a_0 , a_n ve b_n katsayıları,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \\ a_n &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \sin\left(r \frac{2\pi n}{q}\right) \\ b_n &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \cos\left(r \frac{2\pi n}{q}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir [11]. Bu eşitliklerde f_r , r dilimine karşılık düşen fonksiyon değeridir.

3.4. Harmonik Analizinde Kullanılan Yöntemler

Genel anlamda, işaret analizi için bir model şekli olan frekans domemine geçişin ve bu yolla işaretin frekans analizinin de, işareti oluşturan sistemin davranışını ve çalışmasını incelemek açısından ayrı bir önemi vardır.

3.4.1. Zaman Domeni Analizi

Bir işaretin, incelenebilecek olan ve işareti karakterize eden, birçok değişik zaman domeni ölçümü veya zaman domeni parametresi vardır. Bunların en önemlileri, işaretin ortalama ve efektif değerleridir. İşaret rastgele ise bu parametreler, işaretin ortalama değeri ile varyansı (veya karekökü olan standart sapması) olmaktadır. Bunlar, $x(n)$ ayrık zaman ve $x(t)$ sürekli zaman işaretleri için, (3.8) eşitliklerindeki

gibi ifade edilirler. Bu eşitliklerde, bilgisayar hesaplama işlemine uygun olan ayrık zaman işaretleri için, sadece $x(n)$ ve $x^2(n)$ toplamalarının kullanıldığına, bunun da tüm parametrelerin hesaplanmasında kolaylık getireceğine dikkat edilmelidir. İşaret analizine başlamadan önce, analizde yapılacak işlemler ve bu işlemlerin geçerliliği açısından, her zaman şu basit soruları sormakta fayda vardır: İşaret rastgele midir? Durağan mıdır? Periyodik midir? İşaretin ortalama ve standart sapması nedir?

$$\begin{aligned}
 \text{Ortalama : } \quad x_0 = \bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) & \bar{x} &= \frac{1}{T} \int_{t=0}^T x(t) dt \\
 \text{Efektif değ. : } \quad x_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)} & x_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T x^2(t) dt} \\
 \text{Varyans : } \quad \sigma_x^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [x(n) - x_0]^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{n=1}^N x^2(n) - N.x_0^2 \right]
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

T (ayrık işaret için N) periyodu ile periyodik olan işaret için, k tamsayı olmak üzere, (3.9) eşitliği geçerlidir.

$$\left. \begin{aligned}
 \text{sürekli : } \quad & x(t + kT) = x(t) \\
 \text{ayn : } \quad & x(n + kN) = x(n)
 \end{aligned} \right\} \tag{3.9}$$

3.4.2. Frekans Domeni Analizi

İşaretler zaman domeninde oluşan işlemlerin sonucu olarak ortaya çıkmalarına karşın, bu işaretlerin analizlerinin frekans domeninde yapılması bazı durumlarda daha elverişli olmaktadır.

Zaman domeninde verilen $x(t)$ işaretinin frekans domenine olan dönüşümü $X(\omega)$, genel olarak (3.10) eşitliği ile gösterilen, Fourier Transformu (yada Fourier İntegrali, FT) ile gerçekleştirilmektedir.

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt \tag{3.10}$$

Frekans domeninden zaman domenine olan ters dönüşüm, Ters Fourier Transformu (IFT) ile (3.11) eşitliğindeki gibi verilir.

$$x(t)=F^{-1}\{X(\omega)\}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}X(\omega).\exp(j\omega t).d\omega \quad (3.11)$$

$x(t)$ Reel olmasına karşılık, $X(\omega)$ karmaşıktır (komplekstir). $X(\omega)$ 'nın elde edilebilmesi için aşağıda belirtilen Dirichlet koşullarının sağlanması gerekir:

a)

$$\int_{-\infty}^{\infty}|x(t)|dt < \infty \quad (3.12)$$

şartı sağlanmalıdır.

b) $x(t)$ 'nin sonlu sayıda süreksizlik noktası ve sonlu aralıkta, sonlu sayıda ekstramum noktası olmalıdır.

Dirichlet koşullarına uymayan, impuls (delta) fonksiyonu, basamak fonksiyonu, sinüs ve kosinüs fonksiyonları gibi matematikte çok kullanılan fonksiyonlar vardır. Bu fonksiyonların Fourier Transformu yoktur, ancak bunların, belli sınırlar içinde transformu alınabilmektedir. Biz bu fonksiyonların, limitlerinin olduğu yerde Fourier Transformundan bahsedebilmekteyiz.

Periyodik işaretler için Dirichlet koşulları sağlanamaz ve bu durumda da Fourier Dönüşümleri alınamaz. Ancak, işaretin sonlu $(-\pi/2, \pi/2)$ zaman aralığında var olduğu kabul edildiğinde, Fourier Dönüşümü alınabilmektedir. Periyodik bir işaretin Fourier Transformunu başka bir yoldan da bulabiliriz. İşaretin kompleks Fourier serisini ele alalım;

$$x(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_n.\exp(jn\omega_0 t) \quad (3.13)$$

Burada $T=2\pi/\omega_0$, işaretin periyodu ve a_n , açılım (Fourier) katsayılarıdır. (3.13) eşitliğinin Fourier Transformu alındığında,

$$X(\omega)=F\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_n.\exp(jn\omega_0 t)\right\}=2\pi\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_n.\delta(\omega-n\omega_0) \quad (3.14)$$

elde edilir. Dolayısıyla periyodik işaretin Fourier Transformu, temel frekans ω_0 'ın harmoniklerine yerleştirilmiş bir impuls fonksiyonunun, Fourier serisinin ilgili katsayıları ve 2π ile çarpımlarının toplamına eşittir.

Ayrık ve Hızlı Fourier Transformu (DFT, FFT)

T_s örnekleme aralığında ($\omega_s=2\pi/T_s$ açısal frekansıyla) örneklenmiş, $x(t)$ işaretini, sonlu örnekleme dizisi $\{x(nT_s), n=0,1,\dots,(N-1)\}$ ile gösterelim. Ayrık Fourier Transformu (DFT), $\{x(nT_s)\}$ dizisi üzerinde lineer operatörler olarak şöyle tanımlanır:

$$X(k\omega_0) = \sum_{n=0}^N x(nT_s) \cdot \exp(-j2\pi knT_s); \quad k=0,1,2,\dots,(N-1) \quad (3.15)$$

bu eşitlikte ω_0 frekansı,

$$\omega_0 = \frac{\omega_s}{N} \quad (3.16)$$

olarak tanımlanır ve Fourier Dönüşümündeki frekans seçiciliği (rezolüsyonu) olarak bilinmektedir. Frekans rezolüsyonunun mümkün olduğu kadar yüksek (ω_0 'ın küçük) olabilmesi için, işaretin gözlemlendiği $T_0=2\pi/\omega_0$ segment süresinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerekir. Yüksek frekans seçiciliği için bazen, kısa gözlem süreli işaretten alınan örneklerin sonuna sıfırlar eklenerek işaretin uzunluğu yapay olarak arttırılmaktadır. (3.15) eşitliğinde görüldüğü gibi, N elemanlı ayrık $x_n=x(n)=x(nT_s)$ dizisinin DFT sonucunda, N elemanlı $X_k=X(k)=X(k\omega_0)$ dizisi elde edilmekte ve bunun için de, N^2 çarpma-toplama işlemi yapmak gerekmektedir.

Kompleks $X(k)$ serisini, $x(n)$ serisine dönüştürecek Ters Ayrık Fourier Transformu (IDFT);

$$\text{IDFT}(X_k)=x_n=x(nT_s)=\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k \frac{\omega_s}{N}) \cdot \exp(2\pi j \frac{k}{N} nT_s); \quad n=0,1,2,\dots,(N-1) \quad (3.17)$$

olarak tanımlanır.

Bu aşamada, örneklenmiş $\{x(nT_s)\}$ dizisi, zamana bağlı $x(t)$ işaretiyle ideal örnekleme $\delta(t)$ 'nin çarpımı olarak ele alalım. Örneklenmiş işareti $x^*(t)$ ile gösterelim:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) \cdot \delta(t - nT_s) \quad (3.18)$$

$x^*(t)$ işaretinin Fourier Transformu FT, $X^*(\omega)$ olarak isimlendirilir ve

$$F\{\delta(t-nT_s)\}=\exp(-jn\omega T_s) \quad (3.19)$$

olarak gözönüne alınırsa,

$$X^*(\omega)=F\{x^*(t)\}=\sum_{n=0}^{N-1}x(nT_s).\exp(-jn\omega T_s) \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilir. (3.20) eşitliğinde $X^*(\omega)$ Fourier Dönüşümü, ω 'nın sürekli bir fonksiyonudur. Ayrıca bu fonksiyon, $\omega T_s=2\pi$ veya $\omega=\omega_s$ frekansı ile periyodiktir.

Ayrık $x(n)$ işaretiyle uğraşıldığı durumlarda, örnekleme frekansı ω_s , işaretin en yüksek frekans bileşeni $\omega_{\max}$ 'ın iki katından büyük olduğu sürece, periyodik FT cevabındaki periyodik parçalar birbirinin içine girmeyeceğinden, başka bir deyişle örtüşme olmayacağından, bilgi kaybı da olmayacaktır. Bu durumda,

$$\omega_s \geq 2.\omega_{\max} \quad (3.21)$$

şartı gerçekleştiğinde, orijinal işaretin $-\omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max}$ frekans bölgesi içindeki bileşenlerinin hepsi uygun bir alçak geçiren filtreden geçirilerek, işaretin gerçek spektrumu elde edilebilecektir. Örnekleme Teoremi adı verilen bu ifadeye göre, örnekleme frekansının en az, işaretin Nyquist frekansı adı verilen en yüksek frekans bileşeninin iki katı frekansında seçilmesi gerekmektedir. Pratikte ise örnekleme frekansı, $2,5.\omega_{\max}$ ile $10.\omega_{\max}$ arasında seçilmelidir.

Ayrık Fourier Transformu örneklerinin $k=0,1,...,N/2$ için olan parçası, Fourier - Transformunun pozitif frekans bölgesine karşı gelmektedir. Geriye kalan $k=(N/2+1),...,N-1$ örnekleri ise, Fourier Transformunun negatif frekanslarının örnekleridir. Fourier Transformu cevabının genliği (modülü), $\omega=0$ eksenine göre simetrik olduğundan, Fourier Dönüşümünün negatif frekans bölgesindeki ve dolayısıyla DFT'nun $k=N/2$ 'den büyük indisli parçaları, ilave bilgi taşımazlar. Başka bir deyişle, N örnekleli Ayrık Fourier Transformu serisinde sadece ilk $N/2+1$ örnek gereklidir, geri kalanlar fazlalıktır.

Ayrık işaret işlemede Ayrık Fourier Transformu, sürekli işaret işlemede Fourier Transformu, aynı sebeplerle çok önemli operatörlerdir. Ayrık Fourier Transformunun direkt hesaplanması yaklaşık N^2 adet karmaşık çarpma ve toplama işlemi gerektirir.

1965 yılında Cooley ve Tukey, Ayrık Fourier Transformunun hesaplanmasında çok verimli bir metot sundular. Bu metoda, Hızlı Fourier Transformu (FFT) denir ve bu yöntem, N , 2 'nin kuvveti olmak şartıyla, $N \log_2 N$ işlem işlem gerektirir. $N=1024$ için, Hızlı Fourier Transformunu almak için gerekli işlem sayısı, direkt hesaplamada (DFT) için gerekli olan işlem sayısından 10 kat daha azdır. FFT ile DFT arasındaki fark, işarete ilişkin N örnek sayısının 2 'nin kuvveti şeklinde olması zorunluluğudur. [21].

3.5. Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Temel Bağlıntılar

Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynağı durumundaki nonlineer yüklerin sayısının ve nominal güçlerinin her geçen gün artması, harmoniklerin etkilerinin gözönüne alınmasını zorunlu hale getirmiş, harmonikleri filtre sistemleriyle elimine etmek ve sınırlandırmak için baz alınan, harmoniklerle ilgili bazı temel büyüklükler tanımlanmıştır. Harmonik bileşenleri bilinen nonsinüzoidal akım ve gerilimler ile ilgili olarak aşağıdaki tanımlar yapılabilir.

3.5.1. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalgaları ile ilgili bağlantılar

Gözönüne alınan bir nonsinüzoidal akım ve gerilim dalgasının ani değerlerinin,

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \gamma_h) \\ v(t) &= V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \delta_h) \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

olarak ifade edilmesi halinde akım ve gerilim efektif değeri,

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right)} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \\ V &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \right)} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

olarak tanımlanabilir [37,15]. Bu eşitliklerde I_0 ve V_0 sırasıyla akım ve gerilim doğru bileşeni, h harmonik mertebesi, I_h ve γ_h h . harmonik akımının efektif değeri ve faz açısı, V_h ve δ_h h . harmonik geriliminin efektif değeri ve faz açısıdır.

Harmoniklerle ilgili tanımlar arasında en yaygın olarak kullanılan, hem akım ve hem de gerilim için verilen “Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)” kavramıdır. IEEE ve ülkeler kabul ettikleri harmonik standartlarında harmonikleri sınırlandırmak için gerilim ve/veya akım için izin verilen en yüksek THD değerlerini vermektedir. N gözönüne alınan en yüksek harmonik derecesi olmak üzere, akım ve gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu sırasıyla,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (3.24)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (3.25)$$

olarak tanımlanır.

Ayrıca akım ve gerilim dalga şeklindeki bozulmanın toplam harmonik distorsiyonundan başka diğer bir göstergesi olarak “Distorsiyon Faktörü (DF)” tanımlanmıştır. Akım ve gerilim için Distorsiyon Faktörü,

$$\left. \begin{aligned} DF_I &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I} \\ DF_V &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V} \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

olarak ifade edilir.

Periyodik olarak değişen nonsinüzoidal dalgalar için tepe faktörü veya krest faktörü (Crest Faktor, CF),

$$CF = \frac{\text{İşaretin Tepe Degeri}}{\text{İşaretin Efektif Degeri}} \quad (3.27)$$

şeklinde belirlenir [6].

3.5.2. Bir fazlı sistemde güç ifadeleri

Bir fazlı sistemde bir nonlinear yükün akım ve geriliminin (3.22) eşitliğindeki gibi ifade edilmesi halinde aktif güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{h=1}^N V_h I_h \cos(\delta_h - \gamma_h) \quad (3.28)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda reaktif güç,

$$Q = \sum_{h=1}^N V_h I_h \sin(\delta_h - \gamma_h) \quad (3.29)$$

olarak tanımlanır. Görünür güç ise,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^N V_n^2 \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{h=0}^N I_h^2 \right)^{1/2} \quad (3.30)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu güç ifadelerinden görüleceği gibi akımın ve gerilimin sinüzoidal olduğu durumdan farklı olarak burada $S^2 \neq P^2 + Q^2$ olmaktadır. Bu nedenle aktif ve reaktif güçten farklı olarak “Distorsiyon Gücü” tanımlanmıştır. Distorsiyon Gücü,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (3.31)$$

olarak ifade edilir [37]. Distorsiyon gücünün fiziksel anlamının tam olarak açıklanamaması sebebiyle literatürde distorsiyon gücünün tanımı, fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi tartışılmakta, aynı frekanstaki akım ve gerilimlerin meydana getirdiği aktif ve reaktif güç dışında kalan farklı frekanstaki akım ve gerilim bileşenlerinin çarpımından oluşan ve distorsiyon gücünü oluşturan terimler için akımın distorsiyon gücü, gerilimin distorsiyon gücü, nonaktif güç, nonreaktif güç vb. tanımlar yapılmış olsa da henüz tam bir görüş birliği sağlanamamıştır [15,8]. Bu konuda tam bir görüş birliği sağlanamaması sebebiyle (3.31) eşitliği ile verilen güç bağıntısı geçerliliğini sürdürmektedir.

Literatürde gözönüne alınan bir yükün lineer ya da nonlinear olmasına ve yük uçlarındaki gerilimin sinüzoidal veya nonsinüzoidal olmasına göre güç faktörü ayrı ayrı tanımlanmış ve bunlara ait bağıntılar verilmiştir [37]. En genel halde gerilimin

nonsinüzoidal ve yükün nonlinear olması halinde, yük uçlarındaki gerilim ve yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Bu durumda gerilim ve akım,

$$\left. \begin{aligned} v &= \sum_1^n \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t + \delta_n) + \sum_1^m \sqrt{2} V_m \sin(m\omega t + \delta_m) \\ i &= \sum_1^n \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \delta_n + \psi_n) + \sum_1^p \sqrt{2} I_p \sin(p\omega t + \delta_p) \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

olarak ifade edilir [2]. Bu durumda T akım ve gerilimin periyodu olmak üzere güç faktörü,

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{VI} = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \psi_n}{\left\{ \left(\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^m V_m^2 \right) \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2 \right) \right\}^{1/2}} \quad (3.33)$$

olarak ifade edilir [2]. Pratikte en çok karşılaşılan durum olan gerilimin sinüzoidal olması yani sadece temel bileşenden ibaret olması ($V=V_1$) halinde yukarıdaki güç faktörü ifadesi,

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \psi_1}{V_1 I} = \frac{I_1}{I} \cos \psi_1 = \mu \cos \psi_1 \quad (3.34)$$

biçiminde daha basit olarak ifade edilebilir. Burada, μ akım distorsiyon faktörü ve $\cos \psi_1$ deplasman güç faktörü olarak tanımlanır [37,2]. $I_1 < I$ olması nedeniyle güç faktörü daima birden küçüktür, sadece gerilimin ve akımın sinüzoidal olması halinde güç faktörünü bir yapmak mümkündür.

3.5.3. Üç fazlı dengesiz sistemlerde eşdeğer görünür güç, eşdeğer akım ve gerilim kavramları

Dengeli üç fazlı sistemlerin modellenmesinde bir faz eşdeğerinin kullanılabilmesi nedeniyle bu sistemler için güç bağıntıları yukarıdaki yaklaşımlar ile elde edilir. Ancak üç fazlı dengesiz sistemler için bazı ilave kabuller gereklidir [15]. Bu konuda dengesiz üç fazlı sistemler için “Sistem görünür gücü” veya “Eşdeğer görünür güç” olarak tanımlanan S_e için literatürde artan bir destek sözkonusudur [7,15]. Eşdeğer görünür güç,

$$S_e = 3V_e I_e \quad (3.35)$$

olarak tanımlanabilir. Bu ifadede V_e ve I_e eşdeğer gerilim ve akım olup aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}} \quad (3.36)$$

Bu eşitlikte V_a , V_b ve V_c nötr hattı olan (dört iletkenli) üç fazlı bir sistemde a, b ve c fazlarının faz-nötr gerilimlerinin efektif değerleridir. Sistem üç iletkenli ise eşdeğer gerilim fazlararası gerilimler yardımıyla hesaplanabilir. Bu durumda eşdeğer gerilim,

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (3.37)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, V_{ab} , V_{bc} ve V_{ca} fazlararası gerilimlerin efektif değerleridir.

Eşdeğer hat akımı,

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (3.38)$$

olarak tanımlanabilir. Bu eşitlikte I_a , I_b ve I_c a, b, c fazlarının hat akımlarının efektif değerleridir.

Dengesiz üç fazlı sistemde gerilim ve akım nonsinüzoidal olup harmonik bileşenler içeriyor ise h harmonik derecesi ve en yüksek harmonik derecesi N olmak üzere eşdeğer gerilim ve akım,

$$V_e = \sqrt{\sum_{h=1}^N \left(\frac{V_{a_h}^2 + V_{b_h}^2 + V_{c_h}^2}{3} \right)} = \sqrt{\sum_{h=1}^N V_{e_h}^2} \quad (3.39)$$

$$I_e = \sqrt{\sum_{h=1}^N \left(\frac{I_{a_h}^2 + I_{b_h}^2 + I_{c_h}^2}{3} \right)} = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{e_h}^2} \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilebilir [15]. Burada verilen eşdeğer gerilim ve eşdeğer akım bağıntılarından yararlanarak akım ve gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu (3.24) ve (3.25) eşitliklerine göre belirlenebilir [41].

Bunun yanısıra üç fazlı bir sistemde toplam ani güç,

$$p = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (3.41)$$

olmak üzere, sistemin dengesizlik derecesini belirleyen bir büyüklük olan Dengesiz güç DFT kullanılarak,

$$P_u = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) e^{-j4\pi n / N} \quad (3.42)$$

şeklinde hesaplanır. Burada N örnekleme sayısı ve n ise ani gücün örnekleme anıdır. Üç fazlı bir sistemde toplam ani güç fourier serisine açıldığında bir dc bileşen ve sinüsoidal bileşenlerden oluşmaktadır. DC bileşen P_a , P_b , P_c aktif güçlerinin toplamına eşittir ve ortalama (gerçek) güç olarak adlandırılır. Sistem tam olarak dengeli ise sinüsoidal terimler gözükmez ve ani güç sadece ortalama güce eşit olur. Fourier serisindeki ikinci bileşeni veren (3.42) eşitliği ile sistemin dengesizlik derecesini belirleyen dengesiz güç hesaplanmaktadır [43].

4. HARMONİK ANALİZİ İÇİN YENİ BİR ALGORİTMA VE YAZILIM TASARIMI

4.1. Giriş

Harmonik analizi için oluşturulan algoritma ve bu algoritmaya göre MATLAB paket programında hazırlanan yazılımın amacı akım ve gerilimin örneklenmiş değerlerini kullanarak harmonik analizi yapan bir analizör yazılımı ortaya koymak ve bunu test etmektir.

Yapılan bu yazılımda mevcut harmonik analizi yazılımlarının ortaya koyduğu analizin yanında her üç faza ait Deplasman Gücü (D), Distorsiyon Faktörü (DF), Krest Faktörü (CF), K-Faktörü, Deplasman Güç Faktörü (DPF) ve Akım Distorsiyon Faktörü'nün de analizde yer alması bir artı olarak karşımıza çıkmaktadır. Üç faza ait toplam ani güce FFT uygulanarak Dengesiz Güç'ün hesaplanıp analizde verilmesi de ayrı bir üstünlük ve orijinallik olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra Aktif filtrenin harmonik belirleme ünitesinin işlevi sayılan filtre çıkışı için akım ve gerilimin bileşenlerinin genlik ve faz açıları da belirlenmekte ve üç faza ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtreleme sonucunda ortaya çıkacak dalga şekillerinin grafikleri de simülasyon olarak analizde yer almaktadır. Harmonik bileşenleri, daha fazlası gereksiz olduğu için, 30. harmoniğe kadar ele alınmıştır fakat istendiği takdirde analizde 50. harmoniğe kadar yer verilebilmektedir.

4.2. Yeni Algoritma ve Akış Diyagramı

Oluşturulan algoritmanın Şekil 4.1 'deki Akış Diyagramı'ndan görülebileceği gibi enerji analizörünün üç faz akım ve gerilimden ölçüm alarak kaydettiği örneklenmiş akım ve gerilim değerlerinin giriş verisi olarak alınıp bu değerlere FFT uygulanması sonucunda her bir fazın akım ve geriliminin harmonik bileşenlerinin genlikleri ve faz açıları hesaplanmaktadır. Ayrık zaman işaretleri bilgisayar hesaplama işlemine daha uygun olması ve parametrelerin hesaplanmasında kolaylık getirmesi nedeniyle örnekleme yapıp bu örneklenen değerler kullanılmaktadır. Hızlı Fourier Dönüşümü

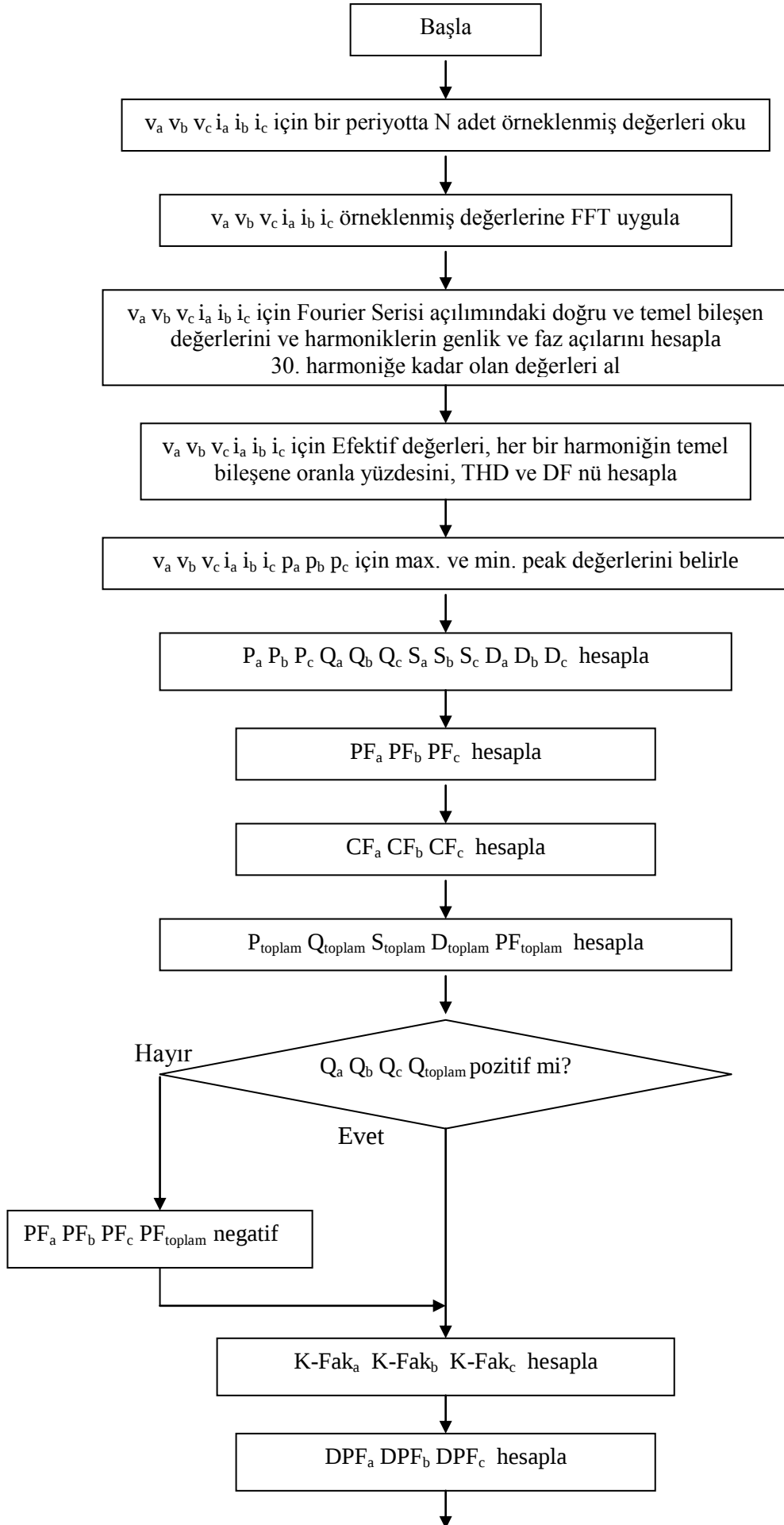
(FFT), Ayrık Fourier Dönüşümünün (DFT) daha hızlı bir yöntemi olup örneklenmiş ayrık değerlere uygulanarak zaman domeninden frekans domenine geçişi sağlar. İşaretlerin analizlerinin frekans domeninde yapılması da daha elverişli olmaktadır.

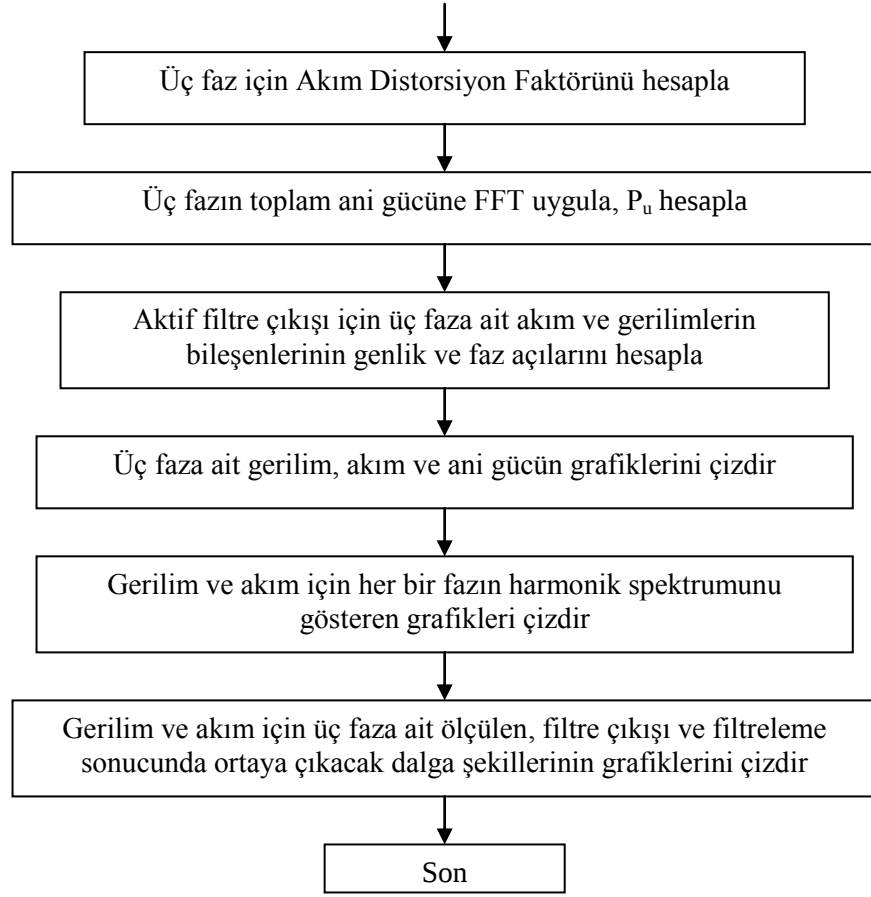
Hızlı Fourier Dönüşümü sonucunda 30. harmonik bileşene kadar olan harmonik değerleri ele alınmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Her bir fazın akım ve geriliminin bu harmonik bileşenlerinin genlik ve faz açıları kullanılarak Bölüm 3' de açıklanan bağıntılar doğrultusunda akış diyagramında gösterilen elektriksel değerler ve tanımlanan büyüklükler hesaplanmıştır. Bunlar THD, DF, P, Q, S, D, PF, CF, K-Fak., DPF gibi tanım ve büyüklüklerdir. Reaktif gücün negatif çıkması durumunda güç faktörü eksi değer almaktadır. Ayrıca üç faza ait toplam ani güce FFT uygulanarak Dengesiz Güç P_u da hesaplanmıştır. Dengesiz güç üç fazlı bir sistemin dengesizlik derecesini belirleyen bir büyüklüktür.

Deplasman Güç Faktörü (DPF) sinüzoidal olan akım ve gerilimli devredeki güç faktörüdür. Akım Distorsiyon Faktörü temel bileşenin efektif değerinin akımın toplam efektif değerine oranıdır. Krest Faktörü (CF) işaretin tepe değerinin efektif değerine oranı olup saf sinüzoidal durumda $\sqrt{2}$ olmaktadır. K-Faktör transformatörlerde nonlineer yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak tanımlanmış ve transformatör imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür.

Aktif filtrenin harmonik belirleme ünitesinin işlevi sayılan filtre çıkışı için akım ve gerilimin bileşenlerinin genlik ve faz açıları da simülasyon amacıyla belirlenmektedir.

Giriş olarak alınan ve hesaplanan veriler yardımıyla, üç faza ait gerilim, akım ve ani gücün grafiklerinin çizdirilmiştir. Gerilim ve akım için harmonik spektrumunu gösteren grafikler çizdirilmiştir. Bu grafiklerde her harmonik için her bir fazın harmonik spektrumu ayrı ayrı grafikte gösterilmektedir. Gerilim ve akım için üç faza ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtreleme sonucunda ortaya çıkacak dalga şekillerinin grafikleri de analizde çizdirilmiştir. Buradaki Aktif filtre çıkışları simülasyon olarak düşünülmüş olup gerilimdeki filtre çıkışı gerilim kaynağı olarak davranan seri Aktif filtrenin çıkışı olup, akımdaki filtre çıkışı akım kaynağı olarak davranan paralel Aktif filtrenin çıkışını vermektedir.





Şekil 4.1 Harmonik analizi için oluşturulan algoritmanın akış diyagramı

4.3. Yazılım

Yazılım olarak kullanılan MATLAB 6.0 paket programı, matris işlemlerini en düşük hata seviyesinde ve yüksek hız ile gerçekleştirebilmektedir. Bugün için farklı alanlarda kullanılabilen çok geniş bir ürün yelpazesine sahip MATLAB, teknik hesaplamalarda kullanılan yüksek başarılı bir dil olarak tanımlanmaktadır. Genel amaçlı bir programlama dili olan MATLAB üzerinde sürekli değişim ve yenilikler yapılmakta ve her geçen gün piyasaya yeni sürümleri sürülmektedir. Fortran, BASIC, Pascal ve C gibi bilgisayar programlama dillerine göre kullanımı daha kolay ve daha gelişkin niteliklere sahip bir programlama dilidir. Güçlü grafik yetenekleri sayesinde verilerin görüntülenmesi ve canlandırılması için zengin bir ortam sağlar. Bunlara ilaveten MATLAB Toolbox'lar adı altında özgün uygulama alanları için problem çözücü araç takımları sunar. Tanımlanmış fonksiyonları ve MATLAB'ın hazır M-dosya paketlerini kullanmak suretiyle programlamayı çok kısa tutmak mümkündür [44]. Harmonik analizi yazılımında da tanımlanmış fonksiyonlar ve oluşturulan M-dosyaları kullanılmıştır.

5. YAZILIM KULLANILARAK YAPILAN HARMONİK ANALİZİ

Bir sanayi tesisin harmonik analizini yapmak amacıyla, sisteminde çeşitli harmonik sorunların yaşandığı Kocaeli MANNESMANN BORU ENDÜSTRİSİ T.A.Ş. tesisinin trafo çıkışlarından Circutor AR-5 marka portatif enerji analizörü ile ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin örneklenmiş değerleri üzerinde, MATLAB paket programı kullanılarak hazırlanan harmonik analizi yazılımı ile harmonik analizi yapılmıştır.

Tesisin 2 numaralı trafosunda 0,4 kV' luk çıkış noktasından alınan ölçümlere göre 2 ayrı ölçüm değerleri için yapılan harmonik analizi sonuçları tablo ve grafik olarak aşağıda verilmiştir.

5.1. Ölçüm 1 için Harmonik Analizi Sonuçları

Analizde hesaplanan şebeke parametreleri ve tanımlanan büyüklükler Tablo 5.1'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında; Toplam Harmonik Distorsiyon (THD) gerilim bazlı olarak % 6,30 ve akım bazlı olarak % 37,81 değerlerinde çıkmıştır. Uluslar arası standartlara göre, IEC (Interantional Electric Cooperation), Toplam Harmonik Distorsiyon için gerekli sınırlar, gerilim bazlı olarak % 3 ve akım bazlı olarak % 6 olması gerekirken sonuçlar bu değerlerin üzerindedir. Bu sonuçlara göre sistem harmonik açısından çok kirli durumdadır.

Ayrıca Güç Faktörü -0,93 mertebelerinde olup sistemde 3 faz için toplam 96 kVAr düzeyinde aşırı kompanzasyon bulunmaktadır. Bu durum kompanzasyonun manuel olarak yapılmasından kaynaklanmaktadır.

Deplasman Güç Faktörü (DPF) sinüsoidal olan akım ve gerilimli devredeki güç faktörüdür ve -0,98 düzeyinde çıkmaktadır. Akım Distorsiyon Faktörü temel bileşenin efektif değerinin akımın toplam efektif değerine oranı olarak % 93 düzeyindedir. Krest Faktörü (CF) işaretin tepe değerinin efektif değerine oranı olup saf sinüzoidal durumda $\sqrt{2}$ olmaktadır. K-Faktör transformatörlerde nonlineer

yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak tanımlanmış ve transformatör imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür.

Tablo 5.2’de Faz 1 için akım ve gerilime ait her bir harmonik bileşenin efektif değeri ve temel bileşene oranla yüzdesi ve faz açısı verilmektedir. Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’ de de yine aynı şekilde Faz 2 ve Faz 3 için bu değerler verilmektedir.

Şekil 5.1’de üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri verilmektedir. Akımın dalga şeklinin sinüs formundan çok daha uzak olduğu görülmektedir. Şekil 5.2’de gerilimin harmonik spektrumu bar grafik olarak verilmiştir. Her harmonik için her bir fazın harmonik spektrumu ayrı ayrı grafikte gösterilmektedir. Spektrumda harmoniklerin temel bileşene oranla yüzdesi verilmiş olup dolayısıyla temel bileşenin oranı %100 olacağından ve harmoniklerin daha iyi incelenmesi amacıyla temel bileşen spektrumda gösterilmemiştir. Şekil 5.3’de akım için aynı harmonik spektrumu bar grafik olarak verilmiştir.

Sistemdeki çalışma düzeneğine göre grafiklerden de görüleceği üzere sistemde 5. harmonik oldukça yüksek durumdadır. Akım için 5. harmonik temel bileşene oranla % 36 mertebesinde olmakta ve değişik zamanlarda bu değerinde üzerine çıkmaktadır. Bunun yanı sıra 7. harmonik % 12 mertebesinde olup yine yüksek değerdedir.

Şekil 5.4’de gerilime ait üç faz için ölçülen, gerilim kaynağı olarak davranan seri Aktif filtre çıkışının ve filtreleme sonucunda oluşacak dalga şekilleri simülasyon amacıyla verilmiştir. Şekil 5.5’de ise akım için aynı grafikler verilmiştir. Burada akım kaynağı olarak davranan paralel Aktif filtre sözkonusudur.

Harmonikler süzülmedikleri takdirde, şebeke ve önemli cihazlar üzerinde zararlara, gerilim düşümü ve kayıpların artmasına, motorlarda ve çeşitli makinalarda aşırı ısınma ve salınımlara, kondansatörlerde güç düşmesine ve sistem kompanzasyonunda problemlere yol açmaktadır. Bunlardan başka rezonans tehlikesi de bulunmaktadır.

Standartlara göre yüksek olan bu harmoniklerin olumsuz etkilerinin önemli ölçüde giderilmesi için bir Pasif filtre ile süzülmesi uygun olacaktır. Harmonik etkileri Aktif filtre ile de giderilebilir fakat kullanılan teknoloji gereği Pasif filtreye göre daha yüksek fiyattadır.

Tablo 5.1 Ölçüm 1 için analizde hesaplanan değerler

	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz III
Gerilim (V)	231,99	232,58	231,95	232,17
V peak max (V)	318,45	344,60	344,60	
V peak min (V)	-318,64	-345,01	-345,01	
Akım (A)	634,50	643,75	643,88	640,71
I peak max (A)	1044,80	1101,30	1259,60	
I peak min (A)	-1029,50	-1113,60	-1260,20	
THD_V (%)	6,37	6,09	6,45	6,30
DF_V (%)	6,36	6,08	6,44	6,29
THD_I (%)	38,58	35,88	38,97	37,81
DF_I (%)	35,99	33,77	36,31	35,36
Güç P (kW)	136,53	139,64	137,86	414,03
Reaktif Güç Q_L (kVAr)	0	0	0	0
Reaktif Güç Q_C (kVAr)	30,05	32,06	34,00	96,11
Görünür Güç S (kVA)	147,20	149,72	149,35	446,27
Distorsiyon Gücü D	46,10	43,45	46,31	135,87
Dengesiz Güç P_u				23,29
Güç Faktörü PF	-0,93	-0,93	-0,92	-0,93
Deplasman Güç Faktörü DPF	-0,98	-0,98	-0,97	
Akım Distorsiyon Faktörü (%)	93	94	93	
Gerilim Krest Faktörü CF_V	1,37	1,48	1,49	
Akım Krest Faktörü CF_I	1,65	1,71	1,96	
K-Faktör	4,41	4,20	4,46	

Tablo 5.2 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 1 değerleri

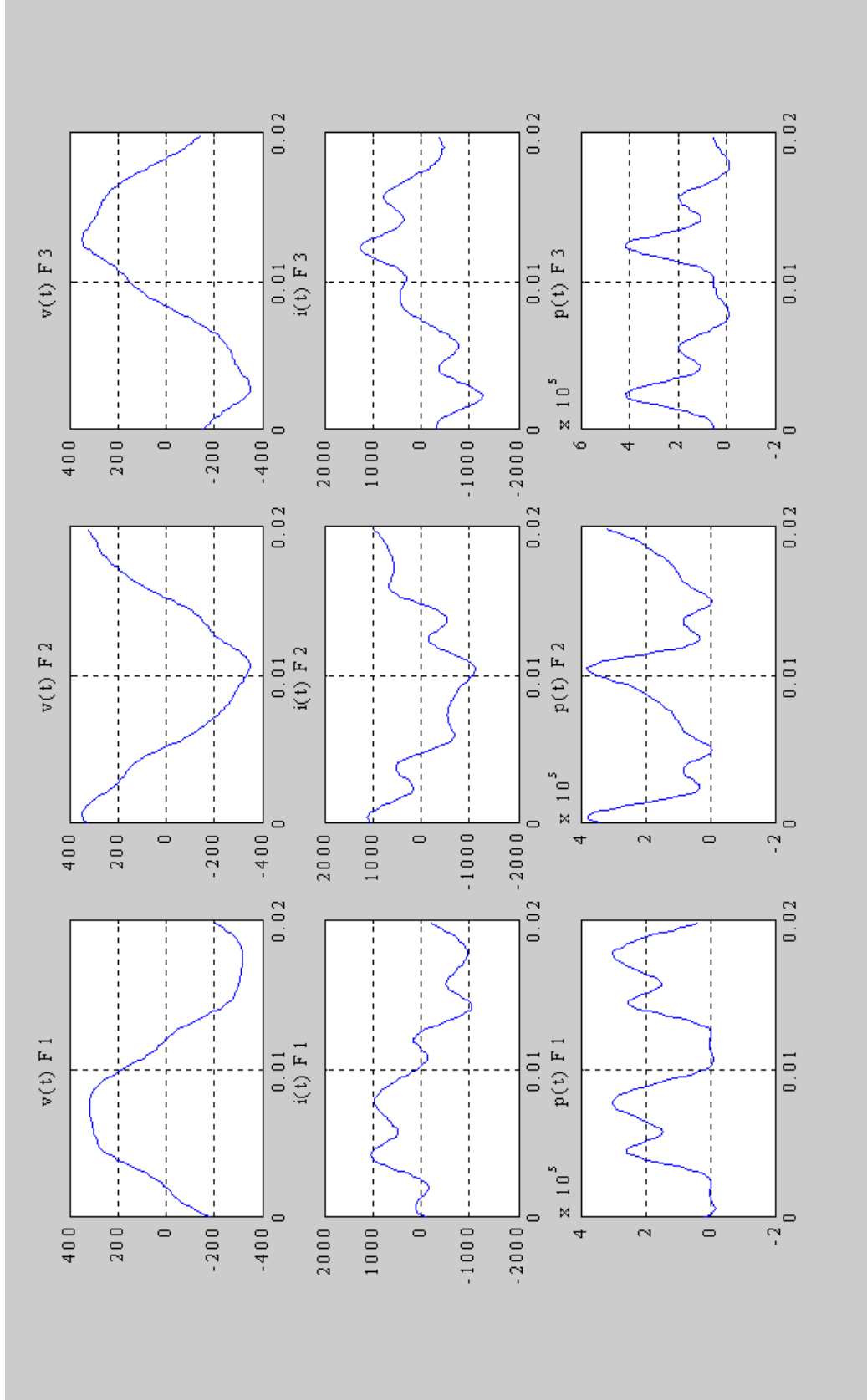
	Faz 1					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=231,99	THD(%)=6,37		Irms(A)=634,50	THD(%)=38,58	
	Vrms1(V)=231,52	Faz açısı1(°)=-124,76		Irms1(A)=591,98	Faz açısı1(°)=-113,14	
Harmonik Mertebesi	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	231,52	100	-124,76	591,98	100	-113,14
2	0,21	0,09	-52	1,18	0,20	-65
3	0,23	0,10	-113	9,83	1,66	-90
4	0,02	0,01	-140	0,47	0,08	41
5	14,05	6,07	-63	217,02	36,66	-14
6	0,28	0,12	-144	4,80	0,81	-110
7	4,40	1,90	-159	69,97	11,82	-132
8	0,05	0,02	-27	1,07	0,18	-98
9	0,12	0,05	123	0,83	0,14	-27
10	0,05	0,02	-29	0,83	0,14	27
11	0,16	0,07	98	4,62	0,78	-171
12	0,05	0,02	18	0,53	0,09	56
13	0,35	0,15	34	3,32	0,56	-42
14	0,02	0,01	-109	0,47	0,08	44
15	0,14	0,06	20	0,53	0,09	100
16	0,12	0,05	-6	0,36	0,06	102
17	0,16	0,07	32	0,77	0,13	-46
18	0,19	0,08	-106	0,24	0,04	174
19	0,09	0,04	21	0,53	0,09	-112
20	0,07	0,03	-5	0,47	0,08	-113
21	0,14	0,06	-56	0,77	0,13	-112
22	0,14	0,06	-91	0,12	0,02	-92
23	0,07	0,03	55	0,77	0,13	-179
24	0,05	0,02	169	0,24	0,04	16
25	0,02	0,01	-80	0,83	0,14	78
26	0,09	0,04	-29	0,18	0,03	52
27	0,23	0,10	85	0,47	0,08	27
28	0,09	0,04	-121	0,65	0,11	96
29	0,02	0,01	31	0,77	0,13	-69
30	0,05	0,02	87	0,18	0,03	-112

Tablo 5.3 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 2 değerleri

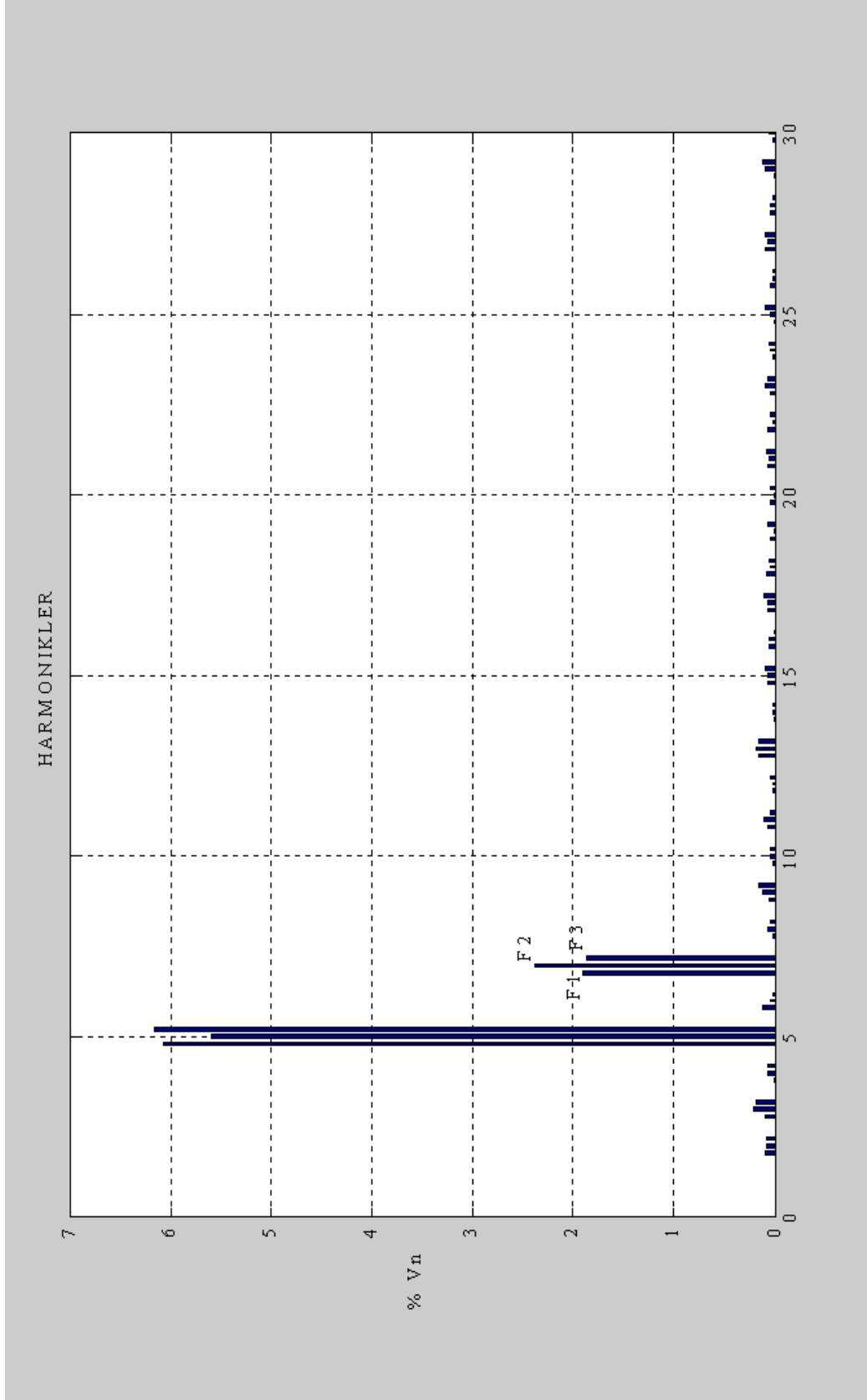
	Faz 2					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=232,58	THD(%)=6,09		Irms(A)=643,75	THD(%)=35,88	
	Vrms1(V)=232,15	Faz açısı1(°)=-3,23		Irms1(A)=605,93	Faz açısı1(°)=9,09	
Harmonik Mertebe	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	232,15	100	-3,23	605,93	100	9,09
2	0,19	0,08	-114	0,55	0,09	10
3	0,49	0,21	77	2,67	0,44	-83
4	0,16	0,07	152	3,21	0,53	174
5	12,98	5,59	-58	198,44	32,75	-11
6	0,07	0,03	76	0,85	0,14	98
7	5,53	2,38	-149	88,47	14,60	-129
8	0,14	0,06	178	1,15	0,19	-157
9	0,30	0,13	-37	1,45	0,24	-55
10	0,09	0,04	114	0,67	0,11	144
11	0,26	0,11	132	4,12	0,68	176
12	0,05	0,02	80	0,18	0,03	176
13	0,42	0,18	26	4,24	0,70	-37
14	0,05	0,02	-115	0,30	0,05	5
15	0,14	0,06	128	0,48	0,08	144
16	0,12	0,05	52	0,36	0,06	24
17	0,16	0,07	72	0,24	0,04	-29
18	0,07	0,03	-63	0,30	0,05	118
19	0,02	0,01	-19	0,24	0,04	-138
20	0,02	0,01	96	0,18	0,03	-28
21	0,12	0,05	99	0,18	0,03	-102
22	0,05	0,02	143	0,06	0,01	-101
23	0,21	0,09	-83	0,79	0,13	170
24	0,09	0,04	119	0,06	0,01	50
25	0,09	0,04	-137	0,12	0,02	7
26	0,05	0,02	61	0,30	0,05	55
27	0,14	0,06	-107	0,24	0,04	79
28	0,07	0,03	94	0,30	0,05	10
29	0,23	0,10	148	1,03	0,17	35
30	0,12	0,05	-49	0,48	0,08	5

Tablo 5.4 Ölçüm 1 için hesaplanan Faz 3 değerleri

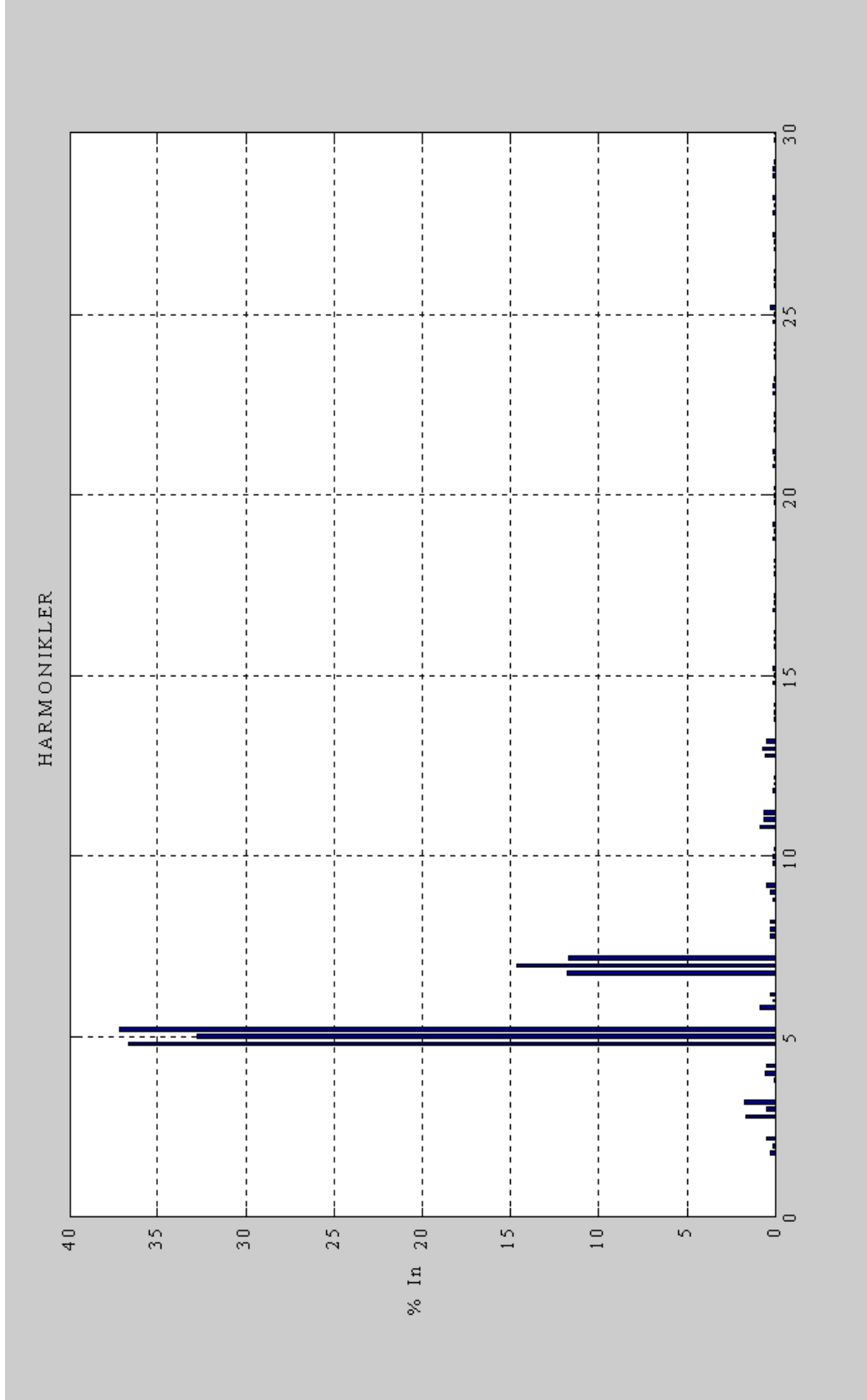
	Faz 3					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=231,95	THD(%)=6,45		Irms(A)=643,88	THD(%)=38,97	
	Vrms1(V)=231,47	Faz açısı1(°)=118,31		Irms1(A)=599,94	Faz açısı1(°)=131,56	
Harmonik Mertebesi	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	231,47	100	118,31	599,94	100	131,56
2	0,19	0,08	116	2,58	0,43	-13
3	0,42	0,18	1	10,44	1,74	107
4	0,14	0,06	149	2,70	0,45	-115
5	14,26	6,16	-59	222,70	37,12	-18
6	0,05	0,02	150	1,26	0,21	-140
7	4,33	1,87	-142	70,01	11,67	-126
8	0,07	0,03	105	1,14	0,19	-155
9	0,37	0,16	139	2,58	0,43	178
10	0,09	0,04	-90	0,30	0,05	-108
11	0,09	0,04	35	4,08	0,68	170
12	0,09	0,04	140	0,18	0,03	21
13	0,37	0,16	84	2,70	0,45	-46
14	0,05	0,02	-108	0,30	0,05	-72
15	0,23	0,10	-12	0,90	0,15	9
16	0,00	0,00	93	0,12	0,02	-170
17	0,25	0,11	-159	0,36	0,06	105
18	0,12	0,05	-29	0,18	0,03	127
19	0,16	0,07	-27	0,78	0,13	-106
20	0,09	0,04	17	0,30	0,05	45
21	0,19	0,08	-171	0,84	0,14	113
22	0,07	0,03	-161	0,18	0,03	-67
23	0,16	0,07	20	0,18	0,03	179
24	0,12	0,05	26	0,12	0,02	-123
25	0,23	0,10	-169	1,08	0,18	24
26	0,05	0,02	-35	0,36	0,06	150
27	0,21	0,09	70	0,96	0,16	-110
28	0,05	0,02	-78	0,60	0,10	-6
29	0,30	0,13	-143	0,18	0,03	89
30	0,14	0,06	-71	0,36	0,06	31



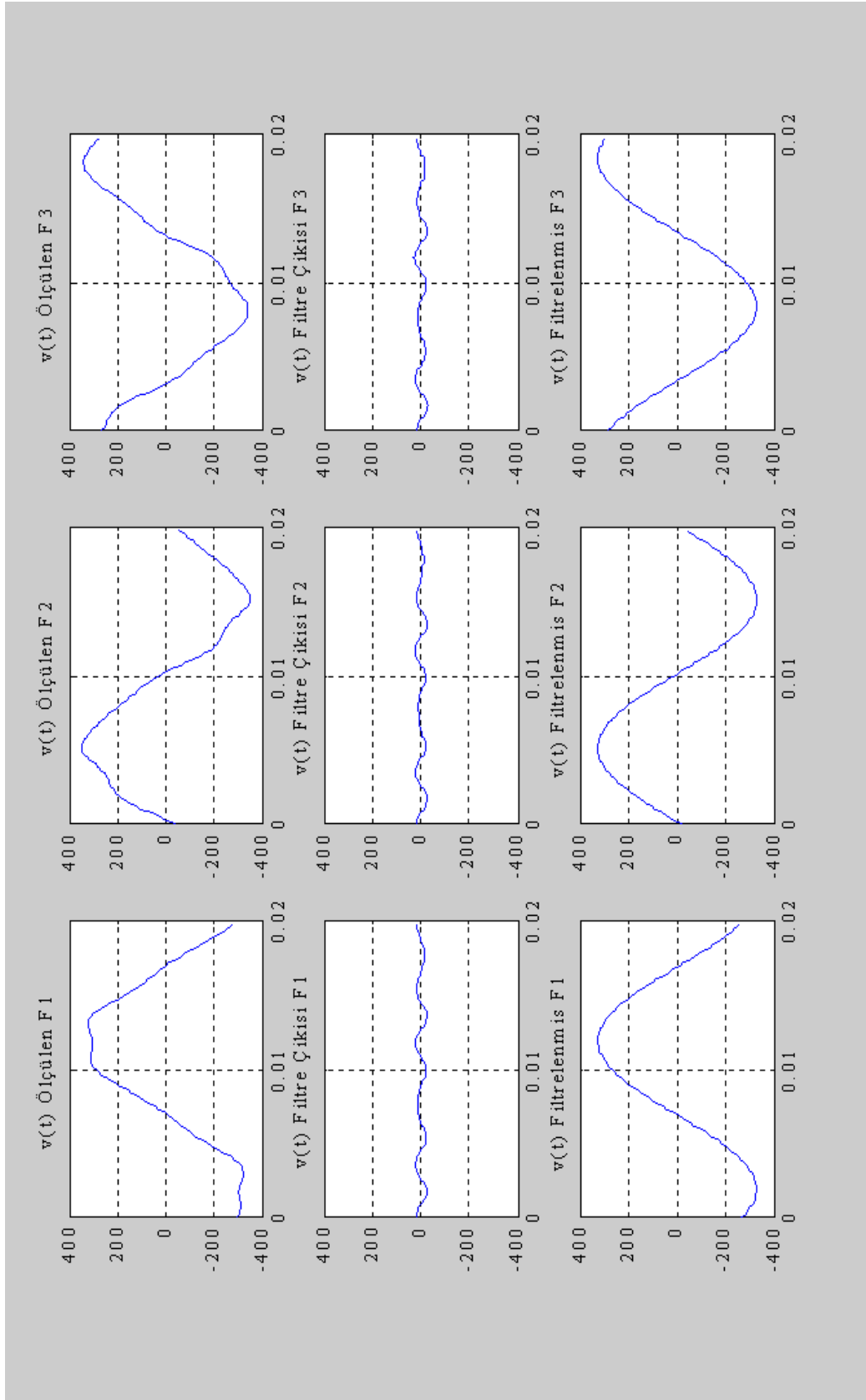
Şekil 5.1 Ölçüm 1 için üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri



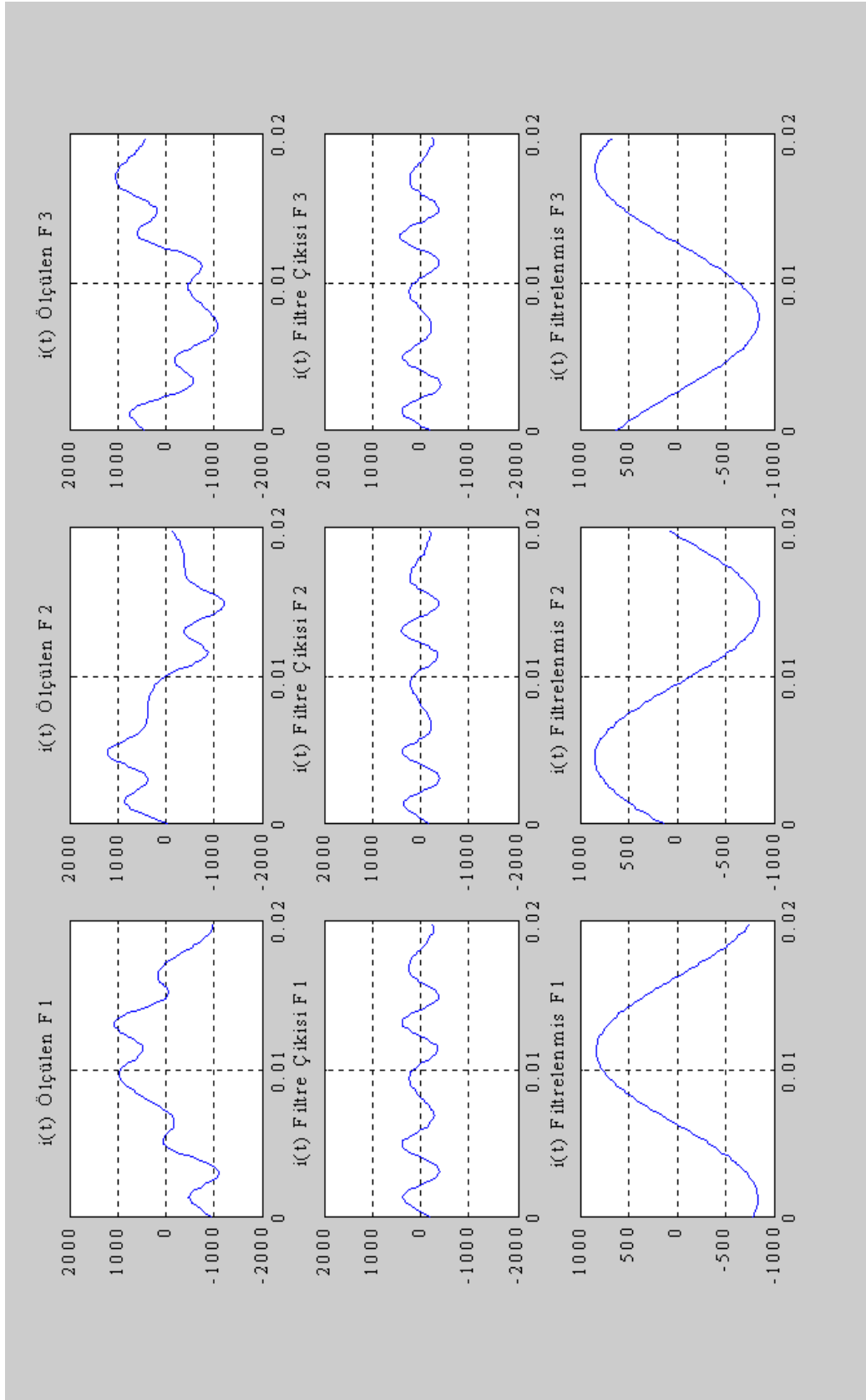
Şekil 5.2 Ölçüm 1 için gerilimin harmonik spektrumu



Şekil 5.3 Ölçüm 1 için akımın harmonik spektrumu



Şekil 5.4 Ölçüm 1 için gerilime ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrenilmiş dalga şekilleri



Şekil 5.5 Ölçüm 1 için akıma ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri

5.2. Ölçüm 2 için Harmonik Analizi Sonuçları

Analizde hesaplanan şebeke parametreleri ve tanımlanan büyüklükler Tablo 5.5’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında; THD gerilim bazlı olarak % 5,86 ve akım bazlı olarak % 25,61 olarak çıkmıştır. Bu sonuçlar da standartların üzerindedir. Önceki analiz sonuçları ile birlikte bu sonuçlara bakıldığında lineer yükün devreye girip artışıyla akım ve gerilimde THD düşmektedir. Sadece nonlinear yükün devrede bulunduğu durumlarda THD akım bazlı olarak % 60 düzeylerine kadar çıkmaktadır. Bu sonuçlara da sistemin harmonik açısından kirli olduğunu göstermektedir.

Güç Faktörü -0,97 mertebelerinde olup sistemde 3 faz için toplam 85 kVAr düzeyinde aşırı kompanzasyon bulunmaktadır. Lineer yükün artmasıyla güç faktöründe yükselmiştir.

Yükün dolayısıyla Aktif gücün artmasıyla Dengesiz güçte önceki ölçüm sonuçlarına göre 23 den 40 düzeyine yükselmiştir.

Tablo 5.6’da Faz 1 için akım ve gerilime ait her bir harmonik bileşenin efektif değeri ve temel bileşene oranla yüzdesi ve faz açısı verilmektedir. Tablo 5.7 ve Tablo 5.8’de de yine aynı şekilde Faz 2 ve Faz 3 için bu değerler verilmektedir.

Şekil 5.6’da üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri verilmektedir. Akımın dalga şeklinin sinüs formundan çok daha uzak olduğu görülmektedir. Şekil 5.7’de gerilimin harmonik spektrumu bar grafik olarak verilmiştir. Her harmonik için her bir fazın harmonik spektrumu ayrı ayrı grafikte gösterilmektedir. Spektrumda harmoniklerin temel bileşene oranla yüzdesi verilmiş olup dolayısıyla temel bileşenin oranı %100 olacağından ve harmoniklerin daha iyi incelenmesi amacıyla temel bileşen spektrumda gösterilmemiştir. Şekil 5.8’de akım için aynı harmonik spektrumu bar grafik olarak verilmiştir.

Grafiklerden de görüleceği üzere akım için 5. harmonik temel bileşene oranla % 21 mertebesinde çıkmıştır. Bunun yanısıra 7. harmonik % 14 mertebesinde olup yine yüksek değerdedir. Bu harmonik bileşenlerin süzülmesi gerekmektedir.

Şekil 5.9’da gerilime ait üç faz için ölçülen, gerilim kaynağı olarak davranan seri Aktif filtre çıkışının ve filtreleme sonucunda oluşacak dalga şekilleri simülasyon amacıyla verilmiştir. Şekil 5.10’da ise akım için aynı grafikler verilmiştir. Burada akım kaynağı olarak davranan paralel Aktif filtre sözkonusudur.

Tablo 5.5 Ölçüm 2 için analizde hesaplanan değerler

	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz III
Gerilim (V)	232,11	233,09	232,83	232,68
V peak max (V)	333,22	341,00	341,00	
V peak min (V)	-334,20	-340,98	-340,98	
Akım (A)	847,52	854,43	821,30	841,08
I peak max (A)	1291,30	1382,50	1367,00	
I peak min (A)	-1275,50	-1386,40	-1375,30	
THD_V (%)	5,70	6,01	5,88	5,86
DF_V (%)	5,70	6,00	5,86	5,85
THD_I (%)	25,03	25,89	25,90	25,61
DF_I (%)	24,28	25,07	25,07	24,81
Güç P (kW)	190,58	192,36	184,31	567,25
Reaktif Güç Q_L (kVAr)	0	0	0	0
Reaktif Güç Q_C (kVAr)	24,16	29,05	32,17	85,38
Görünür Güç S (kVA)	196,72	199,16	191,22	587,10
Distorsiyon Gücü D	42,32	42,64	39,52	124,48
Dengesiz Güç P_u				40,87
Güç Faktörü PF	-0,97	-0,97	-0,96	-0,97
Deplasman Güç Faktörü DPF	-0,99	-0,99	-0,99	
Akım Distorsiyon Faktörü (%)	97	97	97	
Gerilim Krest Faktörü CF_V	1,44	1,46	1,44	
Akım Krest Faktörü CF_I	1,52	1,62	1,66	
K-Faktör	2,85	3,06	2,96	

Tablo 5.6 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 1 değerleri

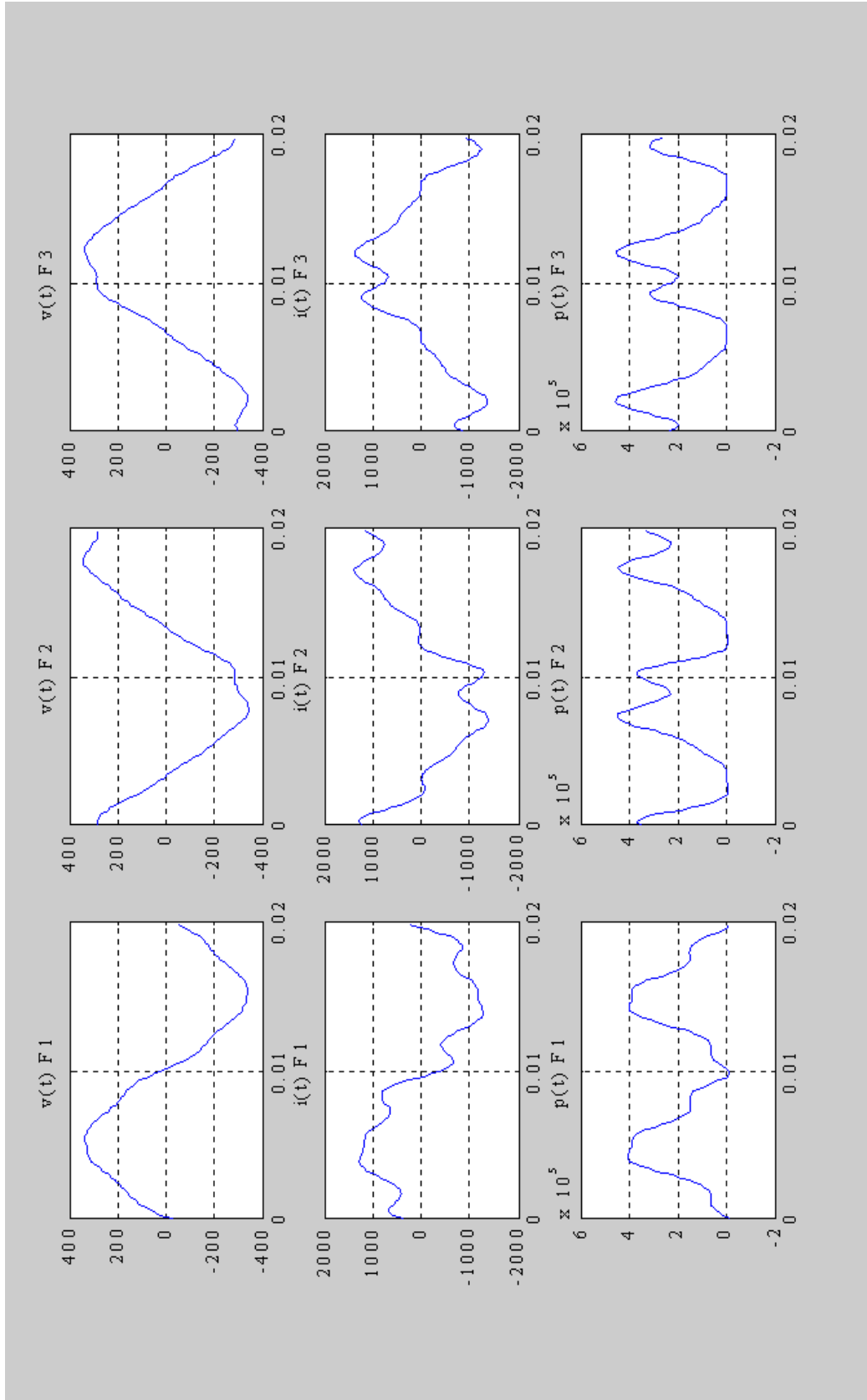
	Faz 1					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=232,11	THD(%)=5,70		Irms(A)=847,52	THD(%)=25,03	
	Vrms1(V)=231,73	Faz açısı1(°)=-93,43		Irms1(A)=822,15	Faz açısı1(°)=-86,86	
Harmonik Mertebe	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	231,73	100	-93,43	822,15	100	-86,86
2	0,09	0,04	147	3,37	0,41	-87
3	0,53	0,23	162	14,06	1,71	-84
4	0,26	0,11	150	1,97	0,24	27
5	11,15	4,81	-101	171,66	20,88	-39
6	0,16	0,07	-152	1,32	0,16	-56
7	7,00	3,02	-99	112,14	13,64	-41
8	0,07	0,03	134	1,81	0,22	151
9	0,37	0,16	56	0,99	0,12	99
10	0,02	0,01	79	0,33	0,04	136
11	0,65	0,28	-75	9,54	1,16	-59
12	0,05	0,02	179	0,58	0,07	95
13	0,23	0,10	131	0,41	0,05	70
14	0,14	0,06	-122	0,16	0,02	73
15	0,09	0,04	15	0,99	0,12	92
16	0,07	0,03	21	0,33	0,04	146
17	0,19	0,08	-128	0,41	0,05	-64
18	0,14	0,06	-121	0,33	0,04	86
19	0,14	0,06	-147	0,74	0,09	144
20	0,14	0,06	-162	0,41	0,05	150
21	0,09	0,04	-126	0,58	0,07	-8
22	0,05	0,02	153	0,00	0,00	-175
23	0,25	0,11	-148	0,74	0,09	-138
24	0,23	0,10	-67	0,00	0,00	-156
25	0,19	0,08	-176	0,90	0,11	124
26	0,16	0,07	-72	0,49	0,06	41
27	0,25	0,11	-180	0,33	0,04	-94
28	0,07	0,03	-64	0,25	0,03	133
29	0,35	0,15	172	0,90	0,11	120
30	0,07	0,03	-99	0,33	0,04	153

Tablo 5.7 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 2 değerleri

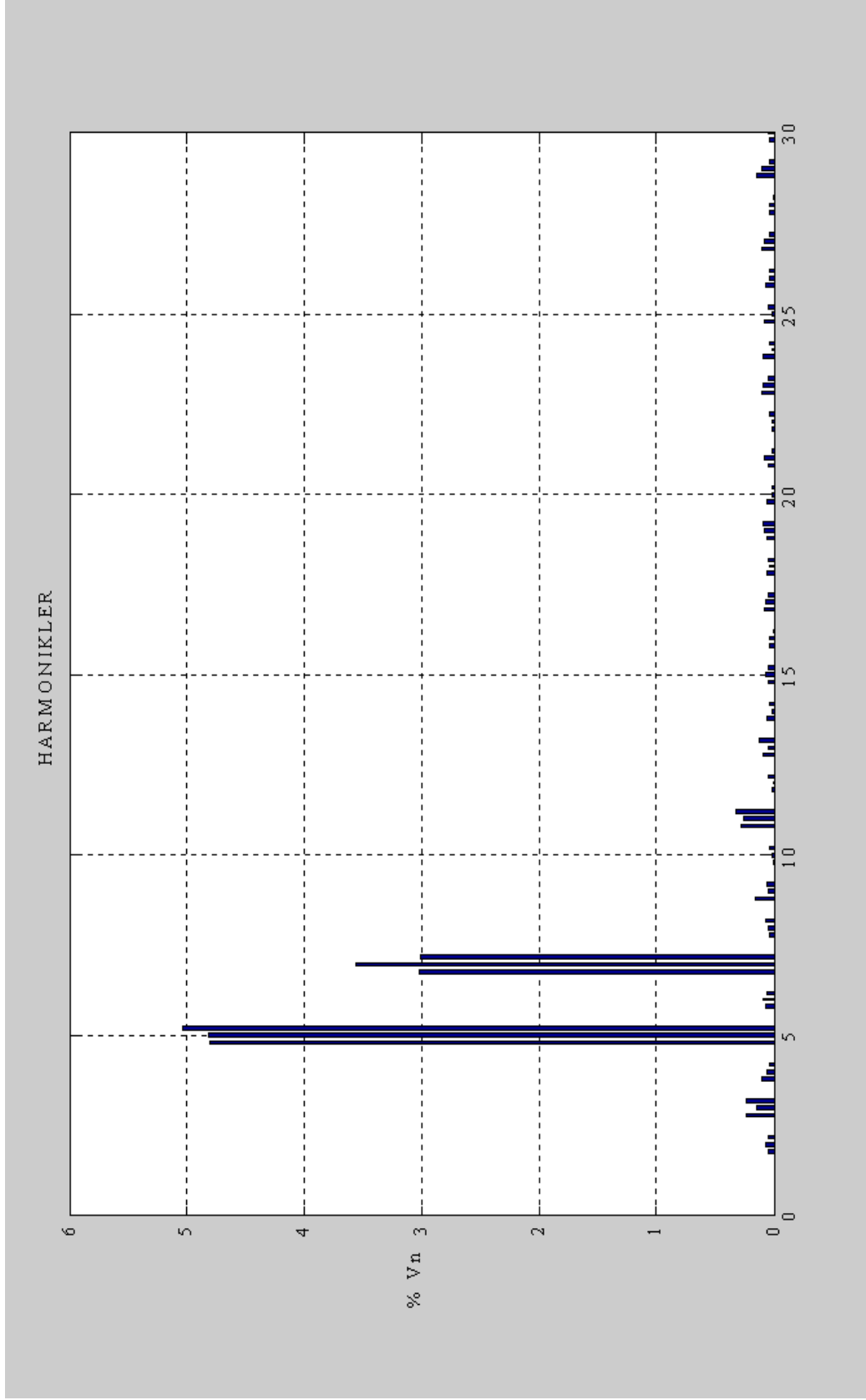
	Faz 2					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=233,09	THD(%)=6,01		Irms(A)=854,43	THD(%)=25,89	
	Vrms1(V)=232,67	Faz açısı1(°)=28,5		Irms1(A)=827,15	Faz açısı1(°)=36,46	
Harmonik Mertebe	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	232,67	100	28,5	827,15	100	36,46
2	0,16	0,07	-145	4,47	0,54	-97
3	0,35	0,15	14	4,22	0,51	116
4	0,14	0,06	155	1,16	0,14	-71
5	11,21	4,82	-101	171,39	20,72	-43
6	0,21	0,09	137	2,32	0,28	-144
7	8,28	3,56	-91	127,79	15,45	-45
8	0,12	0,05	13	0,91	0,11	9
9	0,09	0,04	172	1,41	0,17	-136
10	0,05	0,02	106	0,74	0,09	-167
11	0,60	0,26	-91	10,84	1,31	-81
12	0,02	0,01	17	0,41	0,05	-140
13	0,09	0,04	94	0,74	0,09	-26
14	0,05	0,02	28	0,08	0,01	154
15	0,16	0,07	131	0,91	0,11	-161
16	0,07	0,03	-51	0,08	0,01	121
17	0,16	0,07	48	0,33	0,04	147
18	0,07	0,03	81	0,33	0,04	172
19	0,19	0,08	174	0,58	0,07	144
20	0,05	0,02	-17	0,50	0,06	-23
21	0,19	0,08	85	0,66	0,08	124
22	0,05	0,02	-117	0,17	0,02	-113
23	0,23	0,10	-77	0,41	0,05	-104
24	0,05	0,02	111	0,25	0,03	-143
25	0,05	0,02	138	1,08	0,13	92
26	0,07	0,03	136	0,41	0,05	-91
27	0,19	0,08	18	0,41	0,05	15
28	0,07	0,03	-140	0,41	0,05	-135
29	0,26	0,11	-157	0,50	0,06	-105
30	0,09	0,04	99	0,33	0,04	86

Tablo 5.8 Ölçüm 2 için hesaplanan Faz 3 değerleri

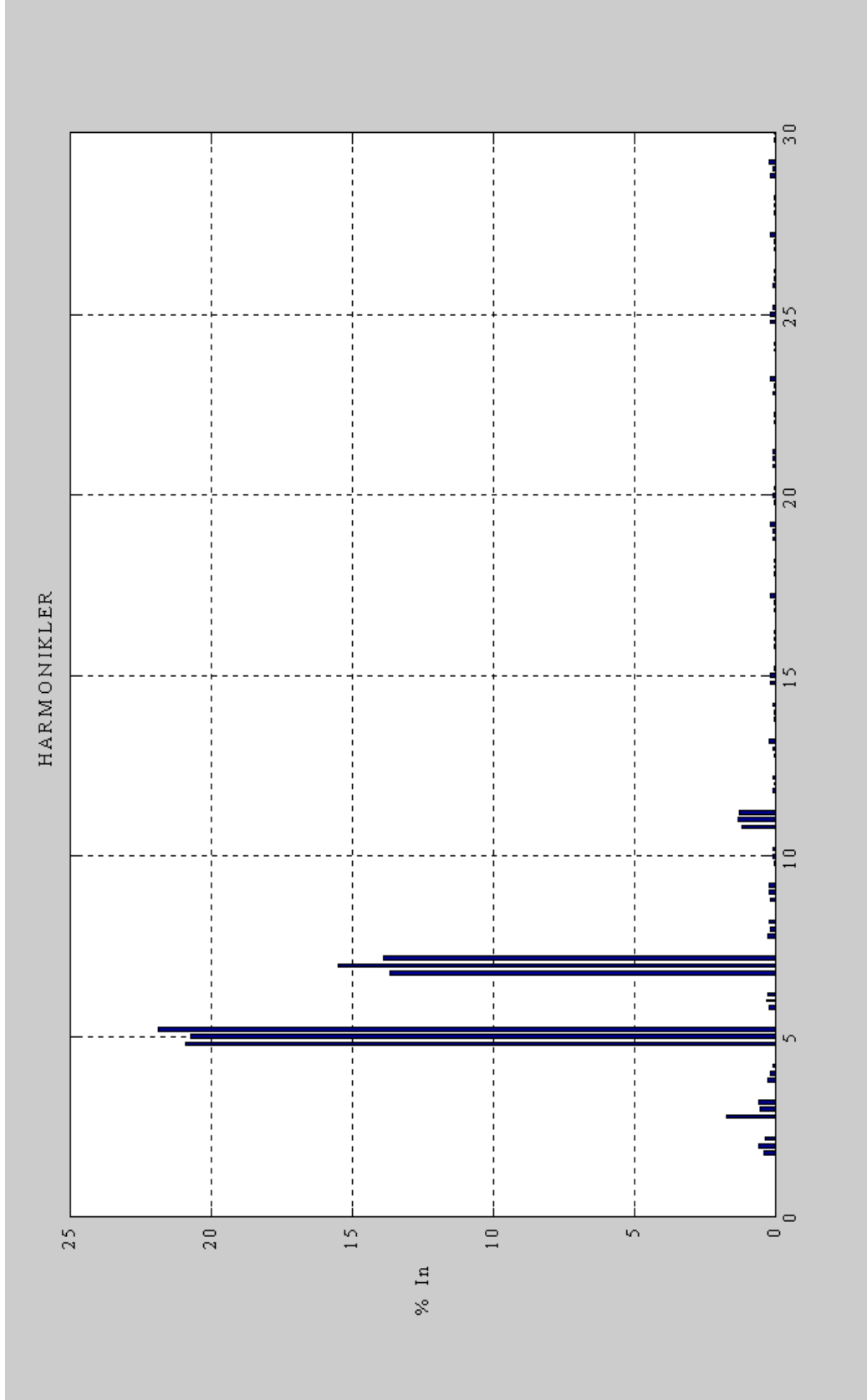
	Faz 3					
	Gerilim			Akım		
	Vrms(V)=232,83	THD(%)=5,88		Irms(A)=821,295	THD(%)=25,90	
	Vrms1(V)=232,43	Faz açısı1(°)=150,54		Irms1(A)=795,07	Faz açısı1(°)=159,95	
Harmonik Mertebe	Genlik (V)	Genlik %	Faz açısı(°)	Genlik (A)	Genlik %	Faz açısı(°)
DC	0	0	0	0	0	0
1	232,43	100	150,54	795,07	100	159,95
2	0,12	0,05	-138	2,70	0,34	111
3	0,53	0,23	41	4,45	0,56	145
4	0,07	0,03	-168	0,72	0,09	-72
5	11,69	5,03	-100	173,40	21,81	-53
6	0,14	0,06	-128	1,83	0,23	-124
7	6,97	3,00	-90	110,36	13,88	-52
8	0,16	0,07	-116	1,43	0,18	-160
9	0,14	0,06	7	1,67	0,21	-124
10	0,07	0,03	9	0,72	0,09	-28
11	0,77	0,33	-97	9,78	1,23	-97
12	0,12	0,05	6	0,48	0,06	-117
13	0,28	0,12	153	1,27	0,16	-105
14	0,07	0,03	-133	0,48	0,06	80
15	0,12	0,05	-65	0,24	0,03	-64
16	0,02	0,01	156	0,08	0,01	-81
17	0,09	0,04	-175	0,87	0,11	-146
18	0,12	0,05	-34	0,24	0,03	-152
19	0,21	0,09	91	1,11	0,14	105
20	0,05	0,02	5	0,32	0,04	-9
21	0,05	0,02	-147	0,64	0,08	-138
22	0,07	0,03	-66	0,24	0,03	-71
23	0,12	0,05	93	0,87	0,11	109
24	0,07	0,03	69	0,16	0,02	170
25	0,12	0,05	68	0,72	0,09	24
26	0,07	0,03	-119	0,40	0,05	-55
27	0,07	0,03	93	0,87	0,11	80
28	0,00	0,00	-73	0,24	0,03	-179
29	0,07	0,03	63	1,59	0,20	-31
30	0,02	0,01	-61	0,56	0,07	66



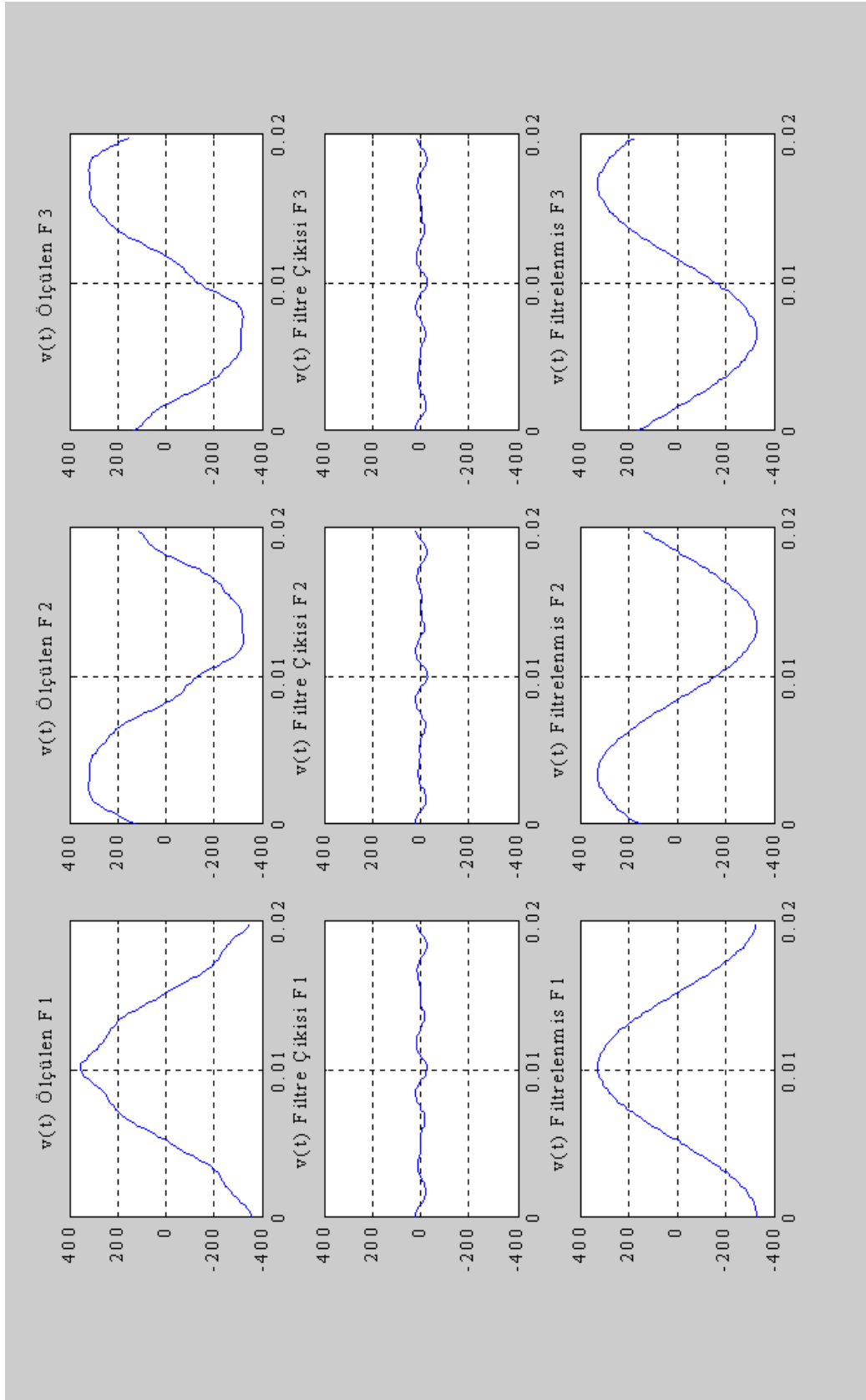
Şekil 5.6 Ölçüm 2 için üç fazın gerilim, akım ve ani güç dalga şekilleri



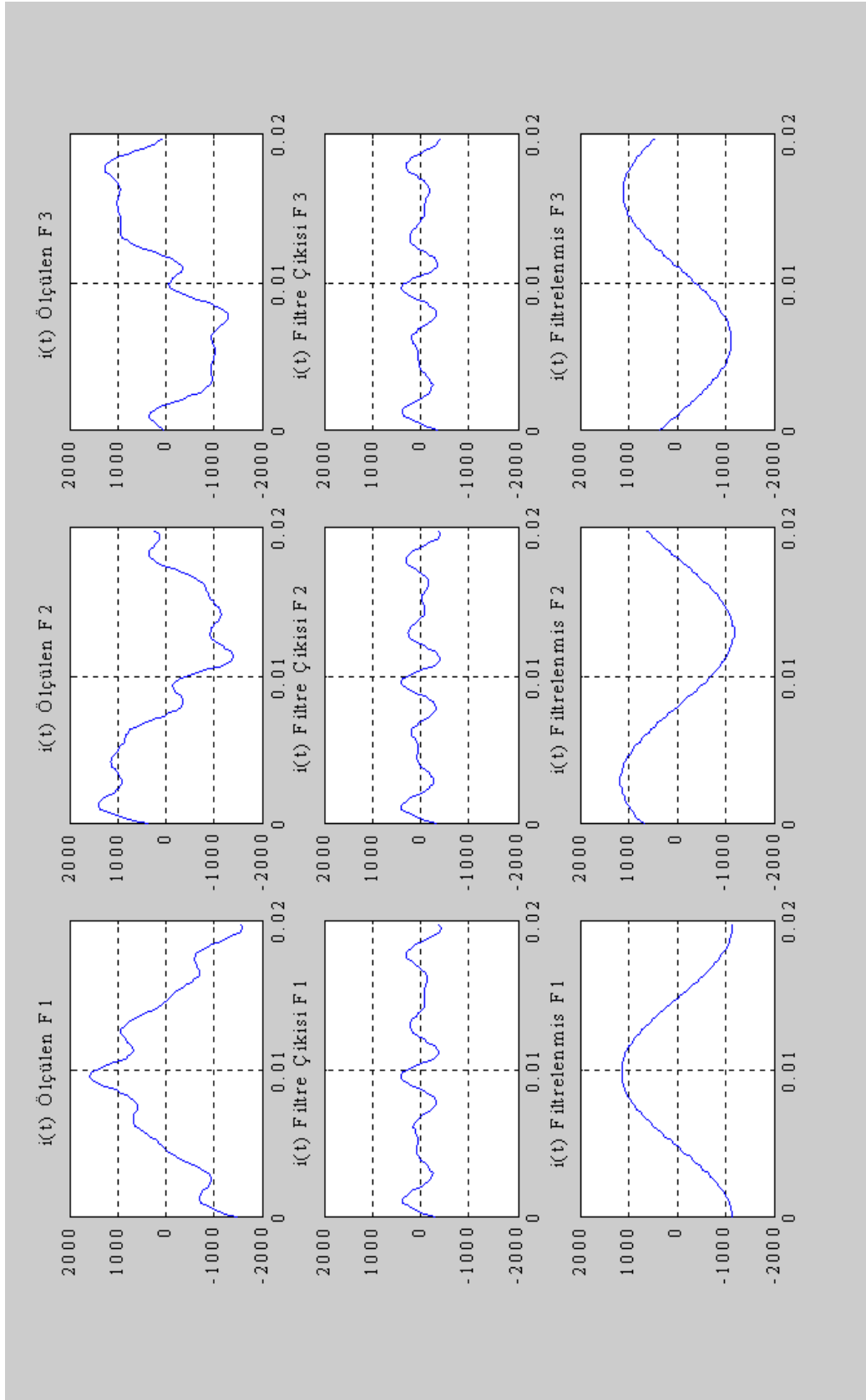
Şekil 5.7 Ölçüm 2 için gerilimin harmonik spektrumu



Şekil 5.8 Ölçüm 2 için akımın harmonik spektrumu



Şekil 5.9 Ölçüm 2 için gerilime ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri



Şekil 5.10 Ölçüm 2 için akıma ait ölçülen, filtre çıkışı ve filtrelenmiş dalga şekilleri

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Lineer olmayan yükler içeren elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ek kayıplar, gerilim düşümleri, rezonans olayları, dielektrik zorlanma, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması vb. gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ek kayıpların hesaplanması, güç faktörünün düzeltilmesi, gerilimdeki harmonik bileşenlerin ve Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) değerlerinin belirlenmesi ve harmoniklerin olumsuz etkilerinin giderilmesi için filtre devrelerinin tasarımı açısından harmonik analizi önem taşımaktadır.
2. Üç fazlı sistemlerde harmonik analizi için oluşturulan algoritmaya uygun bir bilgisayar yazılımı MATLAB paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım harmonik analizörlerinin ölçüm olarak kaydettikleri akım ve gerilimin örneklenmiş değerlerini kullanarak harmonik analizi yapan orjinal yazılımların daha ileri ve kapsamlı düzeyinde bir harmonik analizi ortaya koymaktadır. Buna ek olarak sistemin dengesizlik derecesini belirleyen bir büyüklük olan dengesiz güç de ölçülmektedir.
3. Bu yazılım kullanılarak bir sanayi tesisinin harmonik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında akım ve gerilim dalga şeklindeki bozulmanın bir ölçütü olarak tanımlanan Toplam Harmonik Distorsiyon'un Uluslararası standartların çok üzerinde olduğu ve sistemin harmonikler açısından kirli olduğu gözükmemektedir. Sistemde özellikle 5. ve 7. harmonik oldukça yüksek durumdadır.
4. Harmonikler süzülmedikleri takdirde, şebeke ve önemli cihazlar üzerinde zararlara, gerilim düşümü ve kayıpların artmasına, motorlarda ve çeşitli makinalarda aşırı ısınma ve salınımlara, kondansatörlerde güç düşmesine ve sistem kompanzasyonunda problemlere yol açmaktadır. Bunlardan başka rezonans tehlikesi de bulunmaktadır. Standartlara göre yüksek olan bu harmoniklerin olumsuz etkilerinin önemli ölçüde giderilmesi için bir Pasif filtre ile süzülmesi uygun olacaktır. Harmonik etkileri Aktif filtre ile de giderilebilir fakat kullanılan teknoloji

gereği Pasif filtreye göre daha yüksek fiyattadır. Bu derece yüksek harmonik kirliliğin bulunduğu bir tesiste, ortaya çıkmakta olan olumsuzluklara ve kayıplara rağmen herhangi bir filtre sisteminin olmaması ve tesisinde sanayi bölgesinde yer alan büyük tesislerden biri olduğu gözönüne alınırsa önemli olan bu konunun ülkemizde ne derece ihmal edildiği gözükmemektedir. Bunun nedenlerinin başında; bilgi eksikliği, şu an için ülkemizde herhangi bir sınırlama ve zorunluluğun olmaması ve maliyetler gelmektedir.

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki önerilere yer verilebilir:

1. Elektrik güç sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü nonlinear yük bulunduğu gözönüne alınırsa, ek kayıpların, harmonik gerilimlerinin ve THD değerlerinin de yüksek değerlere ulaşacağı açıkça bellidir. Bu durum sistemdeki diğer lineer yüklerin harmonik bileşenleri içeren sinüzoidal olmayan gerilim ile beslenerek harmonik etkilerine maruz kalmalarına neden olacak, tüketici haklarına yeni bir boyut getirecektir. Ayrıca şebeke üzerinde ek harmonik kayıplara karşılık düşen kayıp enerjinin maliyeti tüketicilere yansıtılmaktadır. Ayrıca harmonik kayıplara karşılık düşen kayıp enerji ekonomik bir kayıp olarak gözükmemektedir. O halde enerji sistemlerinde mümkün olduğunca nonlinear yüklerin etkilerinin azaltılması gerekir.
2. Gelecekte güç sistemlerinde harmonik problemlerin daha da artacağı gözününe alınarak, nonlinear yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı nonlinear yük bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece üç ve üçün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca mümkün olduğu kadar tüketicilerin konverter kullanımında ekonomik kriterlerde dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren darbe sayısı yüksek olan konverterler tercih edilmelidir.
3. Tüketicileri dengeli gerilim ile beslemek için gerekli önlemler alınmalıdır. Faz akımlarının dengeli olmaması, harmonik kayıpları daha da arttırmaktadır. Alçak gerilim dağıtım sistemlerinde gerilimlerin dengeli olmasını sağlamak, dengesiz akımlar sebebiyle nötr iletkeninin yüklenmesini önlemek için yüklerin fazlara eşit olarak dağıtılmasına özen gösterilmelidir.

4. Son yıllarda ülkemizde harmonik kaynaklarının hızla artması ve filtre kullanımının yaygın olmaması nedeniyle, sınır harmonik bozulma değerlerinin verileceği harmonik standartları, ülkemiz için detaylı bir biçimde belirlenip yürürlüğe sokulmalı ve uygulamasına mutlaka geçilmelidir.

5. Güç sistemlerinde kompanzasyon maksatlı olarak kullanılan kondansatör elemanlarının uygun seçilmemesi durumunda toplam harmonik distorsiyonu değerinde artış olabilecektir. Kompanzasyon işleminde mutlaka harmoniklerin bulunduğu şartlar altında analiz yapılmalıdır.

6. Nonlineer yüklerin bulunduğu tüketicilerde, filtre devrelerinin tesis edilmesi bir yönetmelik olarak öngörülebilir. Bunun yanısıra filtresi olmayanlara normalde uygulanan tarife fiyatlarının (TL/kWh), THD düzeyinde arttırılması öngörülebilir. Bu yaptırımın uygulanması halinde tüketicilerin kullanacağı harmonik filtreleri önceden belirlenecek standartlara göre seçilerek tesis edilmelidir. Harmonik spektrum değerlerinin günlük veya aylık seyrine göre pasif filtre veya aktif filtre önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Arrillaga, J., and Watson, N.R.**, 2001. Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, England.
- [2] **Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S.**, 1985. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, New York.
- [3] **Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. and Wood, A.R.**, 1997. Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, Norwich.
- [4] **Bateman, A., and Stephens, I.P.**, 2002. The DSP Handbook, Pearson Education, England.
- [5] **Boylestad, R.L.**, 1987. Introduction to Circuit Analysis, Merrill Publishing Company.
- [6] **Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. and Beaty, H.W.**, 1996. Elektrical Power System Quality, McGraw-Hill.
- [7] **Emanuel, A.E.**, 1993. Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems in Search of a Physical Meaning and a Better Resolution, *Eup. Trans. on Elektric Power*, ETEP, 3(1), 7-14.
- [8] **Emanuel, A.E.**, 1999. Apparent Power Definations for Three-Phase Systems, *IEEE Trans. on power Delivery*, 14(3), 767-772.
- [9] **Emanuel, A.E., and Wang, X.**, 1985. Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS 104(3), 628-636.
- [10] **Emanuel, A.E., Levitsky, F.J. and Gulachenski, E.N.**, 1981. Induction Watthour Meter Performance on Rectifier/Inverter Circuits, *IEEE Trans. on Power Apparatus and systems*, PAS-100(11), 4422-4427.
- [11] **Ergeneli, A.**, 1984. Elektrikte Laplace Dönüşümü ve Fourier Analizi, Kiptaş Dağıtımçılık, İstanbul.
- [12] **Gonzales, D.A., and McCall, J.C.**, 1987. Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-23(3), 504-511.
- [13] **Gül, Ö.**, 2001. Faz Bileşenleri ve Çok-uçlu Eleman Kavramı ile 3-Fazlı Dağıtım Şebekelerinin Harmonik Analizi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Horton, W.F., and Goldberg, S.**, 1985. The Effect of Harmonics on the Operating Points of Elektromechanical Relays, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5), 1178-1188.

- [15] **IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations**, 1996. Practical Definations for Powers in System with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11(1), 79-101.
- [16] **IEEE Working Group on Power System Harmonics**, 1983. Power Systems Harmonics: An Overview, *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, PAS 102(8), 2455-2460.
- [17] **İnan, A. ve Attar, F.**, 1997. Harmonik İçeren Devrelerde Kompanzasyon Hesabı, *Bursa IV. Elektromekanik Sempozyumu*, Bursa, 17-21 Aralık.
- [18] **İnan, A.**, 1999. Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi. *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [19] **Joseph, S., Subjack, J.R., and McQuilkin, J.S.**, 1990. Harmonics-Causes, Effects, Measurements and Analysis: An Update, *IEEE Trans. On Industrial Appl.*, IA 26(6), 1034-1041.
- [20] **Kocatepe, C.**, 1995. Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akış Analizi ve Simülasyonu, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] **Korurek, M., ve Yazgan, E.**, 1996. Tıp Elektronigi, İTÜ, İstanbul.
- [22] **Kreyzing, E.**, 1996. Advenced Engineering Mathematics, John Wiley.
- [23] **Lander, C.W.**, 1981. Power Electronics, McGraw-Hill Book Company Limited, Michigan.
- [24] **Lander, C.W.**, 1981. Power Elektronik, McGraw Hill.
- [25] **Linden, W.P.**, 1996. Transformer Design and Application considerations for Nonsinusoidal Load Currents, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 12, 633-645.
- [26] **Martzolof, F., and Thomas, G.**, 1988. Power Quality Site Surveys, *IEEE Trans. on Industrial Appl.*, 24(6).
- [27] **McClaren, P.G. and Redfern, M.A.**, 1975. Fourier Series Techniques Applied to Distance Protection, *Proc. IEE*, 122, 1301-1305.
- [28] **McGranaghan, M.F., Dugan, R.C., King, J.A., and Jewell, W.T.**, 1984. Distributions Feeder Harmonic Study Methology, *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, PAS 103 (12), 3363-3666.
- [29] **McPherson, G., and Laramone, R.D.**, 1990. An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, Singapoure.

- [30] **Miller, A.J.V., and Dewe, M.B.**, 1992. Multichannel Continuous Harmonic Analysis in Real-Time, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7, 1813-1819.
- [31] **Mitra, S.K.**, 2001. Digital Signal Processing, McGraw-Hill, New York.
- [32] **Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P.**, 1989. Power Elektronik, John Wiley & Sons.
- [33] **Murphy, J.M.D., and Turnbull, F.G.**, 1988. Power Elektronik Control of AC Motor, Pergamon Press.
- [34] **Ortmeyer, T.H., Chakravarthi, K.R., and Mahmoud, A.A.**, 1985. The Effects of Power Systems Harmonics on Power System Equipments and Loads, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(9), 2555-2563.
- [35] **Paice, D.A.**, 1996. Power Electronics Converters Harmonics, First Edition.
- [36] **Rao, S.**, 1996. EHV-AC and HVDC Transmission Engineering and Practice, Khanna Publishers, Delhi.
- [37] **Shepherd, W. and Zand, P.**, 1979. Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, Cambridge University Press, London.
- [38] **Shipp, D.D.**, 1979. Harmonic Analysis and Suppression for Elektrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads, *IEEE Trans. on Industrial Application*, IA-15(5), 453-458.
- [39] **Van, W.J.**, 1993. Power Quality, Power Electronics and Control, The European Power Electronics Association.
- [40] **Wagner, V.E. and IEEE Task Force**, 1993. Effects of Harmonics on Equipment, *IEEE Trans. on Power Delivery*, PWRD-8(2), 672-680.
- [41] **Yumurtacı, R.**, 2000. Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akış Analizi ve Simulasyonu, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [42] **Yumurtacı, R., Kocatepe, C. ve Selamoğulları, U.S.**, 1997. Sinüsoidal Olmayan Elektriksel Büyüklüklerin Transformatör Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, *Bursa IV. Elektromekanik Sempozyumu*, Bursa, 17-21 Aralık, 322-325.
- [43] **Usta, Ö., Bayrak M., ve Redfern M.A.**, 2002. A New Digital Relay for Generator Protection Against Asymmetrical Faults, *IEEE Transaction on Power delivery*, 17(1), 54-59.
- [44] **Yüksel, İ.**, 2000. MATLAB ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü, Vipaş, Bursa.

ÖZGEÇMİŞ

Önder ŞAHİN, 1976 tarihinde Erzincan'ın Refahiye ilçesinde doğmuştur. İlk öğrenimine doğduğu bu ilçede başlamış ve ilk öğreniminin kalan kısmı ile orta öğrenimini İzmit'te tamamlamıştır. Lise öğrenimini İzmit Teknik Lisesi Elektrik Bölümünde 1994 yılında tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde 1995 yılında üniversiteye başlamıştır. Bir yıl sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümüne yatay geçiş yapmış ve 1999 yılında bu bölümden pekiyi dereceyle mezun olan üç öğrenciden biri olarak mezun olmuştur. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilimdalı Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimine başlamış ve yüksek lisans derslerini bitirdikten sonra izinli olarak 15. Kolordu Komutanlığı'nda Muhabere Asteğmen olarak askerlik hizmetini Kasım 2002 tarihinde tamamlamıştır.