

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK  
VE FİLTRELEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elk. Müh. Feridun BAŞMAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEK.-ELEKTR. MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ  
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**

**Ağustos 2006**

**T.C.**  
**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK  
VE FİLTRELEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elk. Müh. Feridun BAŞMAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEK.-ELEKTR. MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 29/08/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**   **Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai ÇAVUŞ**   **Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA**  
**Jüri Başkanı**   **Üye**   **Üye**

## **TEŞEKKÜR**

Tezimde emeği geçen ve yardımlarıyla bana yol gösteren değerli hocalarıma ve bana devamlı destek olan aileme çok teşekkür ederim.

Feridun BAŞMAN  
ELEKTRİK MÜH.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET .....	xii
SUMMARY .....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

### BÖLÜM 2.

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ TANIMLAR.....	3
2.1. Doğrusal Olmayan için Akım, Gerilim ve Güç Tanımı.....	3
2.2. Etkin Akım ve Etkin Gerilim Değerinin Hesaplanması.....	6
2.3. Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar .....	8
2.3.1. Güç Faktörü .....	8

### BÖLÜM 3.

HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ.....	9
3.1. Fourier Analizi.....	9
3.1.1. Fourier katsayılarının analitik yöntemle bulunması .....	12
3.1.2. Fourier katsayılarının grafik yöntemle bulunması.....	14
3.1.3. Fourier katsayılarının ölçme yöntemi ile bulunması.....	23
3.2. Nonsinüsoidal Büyüklükleri İçeren Devrelerin İncelenmesi .....	25
3.2.1. Sinüsoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yük devreler ....	25
3.2.2. Nonsinüsoidal gerilim beslemeli lineer devreler .....	26

3.2.3. Nonsinüsoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yük devreler .....	28
--	----

## BÖLÜM 4.

HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR VE HARMONİKLERİN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ .....	30
4.1. Harmonik Üreten Elemanlar.....	30
4.1.1. Generatörler .....	31
4.1.2. Transformatörler .....	32
4.1.3. Doğrultucular .....	33
4.1.4. Ark fırınları.....	34
4.1.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları.....	34
4.1.6. Diğer harmonik kaynaklar.....	35
4.2. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri.....	36
4.2.1. Harmoniklerin yol açtığı rezonans olayları .....	39
4.2.2. Harmoniklerin kayıplara etkisi .....	41
4.2.3. Direncin, endüktif ve kapasitif reaktansın harmoniklere bağlı olarak değişimi.....	42
4.2.4. Kondansatörler üzerindeki etkisi .....	44
4.2.5. Transformatörler üzerindeki etkiler .....	46
4.2.6. Döner makineler üzerindeki etkiler .....	47
4.2.7. Koruma sistemleri (Röleler) üzerindeki etkiler .....	48
4.2.8. Ölçme aygıtları üzerindeki etkiler .....	48
4.2.9. İletişim hatları üzerindeki etkiler.....	49
4.2.10. Güç elektroniği elemanları ve anahtarlama elemanı üzerindeki etkileri .....	49
4.2.11. Güç iletim sistemleri üzerindeki etkiler.....	49
4.2.12. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi.....	50
4.2.13. Diğer bazı elemanlar ve küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerindeki etkiler .....	51

BÖLÜM 5.	
ELEKTRİK SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLER VE HARMONİKLERİN	
FİLTRELENMESİ .....	53
5.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları .....	53
5.1.2. Paralel rezonans .....	54
5.1.3. Seri rezonans.....	57
5.2. Harmonik Standartları .....	61
5.3. Harmoniklerin Filtrenmesi .....	62
5.3.1. Pasif filtreler .....	63
5.3.1.1. Seri pasif filtreler.....	63
5.3.1.2. Paralel pasif filtreler .....	64
5.3.2. Aktif filtreler.....	64
5.3.3. Örnek ve Matlab Grafikleri .....	66
5.4. Matlab Simülasyon ve Grafikleri.....	70
5.4.1. Harmonik üreten devre simülasyonu .....	70
5.4.2. Kompanzasyonlu devre simülasyonu.....	73
5.4.3. 3. harmonik filtreli, kompanzasyonlu devre simülasyonu .....	76
5.4.4. 3. , 11. , 13. harmonikleri filtreli kompanzasyonlu devre simülasyonu .....	79
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	82
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	86

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

GED	: Güç Elektroniği Devresi
AF	: Aktif Filtre
PF	: Pasif Filtre
PAF	: Paralel Aktif Filtre
SAF	: Seri Aktif Filtre
THB	: Toplam Harmonik Bozulumu
THD	: Total Harmonic Distortion
GF	: Güç Faktörü
DA	: Doğru Akım
GTO	: Gate-Turn-Off Thyristor
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (U.S.A) (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
AA	: Alternatif Akım
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
pu	: Per-unit
THD <sub>1</sub>	: Akım için Toplam Harmonik Distorsiyonu
THD <sub>v</sub>	: Gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
v(t), i(t)	: Periyodik değişen gerilim ve akım fonksiyonunun ani değerleri
V <sub>n</sub> , I <sub>n</sub>	: Periyodik değişen gerilim ve akım fonksiyonunun n. harmoniğine ilişkin etkin değerler

$\omega$	: AA kaynak gerilim/akım değişiminin açısal hızı
$v_{dc}(t)$	: PAF DA Kondansatörü DA gerilimi ani değeri
$V_{dc}$	: PAF DA Kondansatörü DA gerilimi referans değeri
$C_{dc}$	: PAF DA Kondansatörü
$L_c, R_c$	: PAF çıkış endüktansı ve endüktans iç direnci
$L_s, R_s$	: AA Gerilim kaynağı çıkış endüktansı ve endüktans iç direnci
$L_{dc}, R_{dc}$	: Kompanze edilen yük devresinin, DA kısmında yer alan endüktans, kondansatör ve direnç
$S$	: Yükün tükettiği toplam görünür güç
$P$	: Yükün tükettiği toplam aktif güç
$Q$	: Yükün tükettiği toplam reaktif güç
$I_q$	: Akımın gerçel fazörü
$I_p$	: Akımın sanal fazörü
$\pi$	: 3.14
$\mu$	: Akım distorsiyon faktörü
$(\Delta V)_n$	: n. harmonik akımı için gerilim düşümü
$\delta(t)$	: İdeal örnekleyici
$\delta_1, \delta_n$	: Temel ve h. harmonik bileşeni için gerilimin faz açısı
$\phi_1, \phi_n$	: Fourier serisi için 1. ve n. bileşen faz açısı
$\phi_n$	: n. harmonik için manyetik akı
$C$	: Kapasite
$\cos\varphi$	: Güç faktörü
$D$	: Distorsiyon gücü
$f, f_1$	: Frekans, temel frekans
$f_0$	: Temel frekans
$f_s$	: Örnekleme frekansı
$h$	: Harmonik mertebesi
$I$	: Akımın efektif değeri
$I_\mu$	: Mıknatıslanma akımı
$I_1$	: Temel bileşen akımının efektif değeri
$I_n$	: n. harmonik akımının efektif değeri
$i(t)$	: 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
$P_{kEK}$	: Harmonik akım bileşenlerinin oluşturduğu ek kayıp güç
$P_k$	: Kayıp güç
$Q, Q_L, Q_C$	: Reaktif güç, Endüktans kVAr'ı, Kondansatör kVAr'ı
$Q_s$	: Kısa devre gücü
$R$	: Direnç
$R_1, R_n$	: Temel frekans ve n. harmonik frekansı için omik direnç
$S$	: 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
$v(t)$	: Ani gerilim
$V$	: Gerilimin efektif değeri
$V_n$	: n. harmonik için gerilimin efektif değeri
$V_0$	: Gerilimin doğru bileşeni
$X$	: Reaktans
$X(\omega)$	: $X(\omega)$ 'nin örneklenmiş değeri
$x(t)$	: $x(t)$ 'nin örneklenmiş değeri
$X_C$	: Kapasitif reaktans
$X_L$	: Temel frekanstaki endüktif reaktans

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Doğrusal Olmayan Yüğü Besleyen Devre .....	3
Şekil 2.2. Yüğü Akım Fazörleri .....	4
Şekil 2.3. Ortalama Aktif ve Reaktif Gücün Hesaplanması .....	6
Şekil 2.4. Akım ve Gerilim Etkin Değerinin Hesaplanması .....	7
Şekil 3.1. Grafik metotla fourier analizinin yapılması .....	15
Şekil 3.2. Analiz edilen dalga .....	18
Şekil 3.3. Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü .....	23
Şekil 3.4. Dijital harmonik analizörü .....	24
Şekil 5.1. R, L, C paralel ve rezonans devresi .....	54
Şekil 5.2.a. Paralel rezonans devresinin empedans diyagramı	
b. Paralel rezonans devresinin akım diyagramı .....	55
Şekil 5.3. Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşumu .....	56
Şekil 5.4. R, L, C seri rezonans devresi .....	58
Şekil 5.5. Seri rezonans devresi .....	60
Şekil 5.6. Seri pasif filtre .....	63
Şekil 5.7. Paralel pasif filtre .....	64
Şekil 5.8. Aktif filtre ile harmonik akım kompanzasyonu .....	65
Şekil 5.9. Akım dalga şekilleri .....	67
Şekil 5.10. 6-darbeli bir konverterin akımı .....	68
Şekil 5.11. Filtre akımı .....	69
Şekil 5.12. Şebekeden çekilecek akım .....	69
Şekil 5.13. 3 Fazlı devre şeması .....	70
Şekil 5.14. Filtresiz gerilim grafiğı .....	71
Şekil 5.15. Filtresiz akım grafiğı .....	72
Şekil 5.16. 3 fazlı kompanzasyonlu devre şeması .....	73
Şekil 5.17. Kompanzasyonlu gerilim grafiğı .....	74
Şekil 5.18. Kompanzasyonlu akım grafiğı .....	74

Şekil 5.19. 3 fazlı 3. harmonik filtreli ve kompanzasyonlu devre .....	76
Şekil 5.20. Üçüncü harmonik filtreli gerilim grafiği .....	77
Şekil 5.21. Üçüncü harmonik filtreli akım grafiği.....	77
Şekil 5.22. 3 fazlı 3.,11.,13. harmonikler filtreli ve kompanzasyonlu devre .....	79
Şekil 5.23. 11.ve 13. harmonikde filtreli gerilim grafiği .....	80
Şekil 5.24. 11.ve 13 harmonikde filtreli akım grafiği.....	80

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. $f(\alpha)$ değerleri .....	18
Tablo 3.2. Temel bileşen için yapılan hesaplamalar .....	19
Tablo 3.3. 3. harmonik için yapılan hesaplamalar .....	20
Tablo 3.4. 5. harmonik için yapılan hesaplamalar .....	21
Tablo 4.1. Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu .....	32
Tablo 4.2. Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu.....	35
Tablo 4.3. Çeşitli ülkelerin harmonik stadartları .....	39
Tablo 4.4. Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğeri.....	43
Tablo 5.1. IEEE gerilim için harmonik distorsiyon sınırları .....	61
Tablo 5.2. IEEE 519 tek harmonik akım sınırları In/II (%) .....	62

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, standartlar, filtreler

Elektrik güç sistemlerinde kullanılan enerjinin belirli bir gerilim seviyesinde sabit frekanslı ve genlikli olması istenir. Fakat bunlar pratikte tam olarak sağlanamaz. Elektrik güç sistemlerinde gerilim-akım karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar nedeniyle gerilim ve akım dalga şekli bozularak periyodik formundan uzaklaşmaktadır. Harmonikler sinüzoidal dalga biçiminin bozulması ile ortaya çıkar. Enerji sistemlerinde lineer olmayan yükler, doğrultucular, eviriciler ve 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.

Güç Elektroniği Devrelerinin (GED) sistemde meydana getirdiği harmonikler, uzun zamandır bilinmekte ve bu sorun için sürekli kısıtlamalar getirilmektedir. Uluslararası standartlar arasında, en çok rağbet gören standart, IEEE 519 standardıdır.

Güç sistemlerinin kompanzasyonu için uygulanan yöntemlerden en çok kullanılanı pasif filtrelerle (PF) yapılan kompanzasyondur. Sanayide bolca kullanılan PF'ler GED sektörünün büyümesiyle, popülerliğini kaybetmiştir.

Enerji kalitesinin iyileştirilmesine olan talep sonucu, son yıllarda aktif çalışma şekli gösteren Aktif Filtreler (AF) üzerindeki yapılan çalışmalar artmıştır. Ek olarak, son yıllarda AF'lerle yapılan çalışmalar, pratikte de başarılı sonuçlar vermektedir. Yapılan çalışmaların ekseriyetle Paralel Aktif Filtre (PAF) üzerinde yoğunlaşmasının nedeni, bu filtrelerin akım harmoniklerinin, gerilim harmoniklerinden daha tehlikeli olmasından dolayı, kompanzasyonda daha büyük önem arz etmektedir.

# HARMONICS AND OBVIATE

## SUMMARY

Keywords: Harmonics, standards, filters

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 effect on power system such as additional power loss, heating, inconstant voltage level, resonance, dielectric constrained, failure of control, safe and measurement systems.

The harmonics arising from the Power Electronics Circuits (PEC) in the system are known for a long time many limitations are designated in order to overcome this problem. Of all the international standards, IEEE 519 is probably the most respected.

The most applied method for the compensation of power Networks is the use of Passive Filters (PF). Although the use of PFs has found a wide application area in industrial areas, these types of filters have lost their popularity with the development Of PEC sector. Besides, recent experiences reveal that PFs may cause many problems in the power network.

Because of the demand for the desire in energy quality, research currently is focused on the Active Filters (AC), which are simply referred as active-working filters. In addition, recent advances on the AFs leded prosperous experiences in practice. The reason why the majority of the studies concentrate on the Paralel Active Filters (PAFs) is that these filters can successfully compensate current harmonics. Because Current harmonics are more dangerous than voltage harmonics in low voltage systems, compensation of this type of harmonics necessitates more importance.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması dalga şeklinde olup, belirli gerilim seviyelerinde ve sabit frekansta yapıldığı için, böyle bir sistemde gerilim ve akım dalga şeklinin tam sinüs olması beklenir. Bununla beraber pratikte bu tür enerjinin elde edilmesinde birtakım zorluklarla karşılaşabilir. Bunların başında da senkron jeneratörlerin yapısından ve güç sistemine bağlanan lineer olmayan elemanlar ile bunların yol açtığı olaylardan kaynaklanan bozulmalar gelmektedir. Periyodik dalga şeklindeki bozulmalardan bir tanesi harmoniklerdir. Şebekenin manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusal olmayan durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu doğrusalsızlıklara sebep, bobin, transformatör, jeneratör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan doğrusal olmayan bir olayın meydana gelmesi ve ayrıca yarıiletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalganın kırılmasıdır. Bu doğrusalsızlıklara şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur.

Doğrusal olmayan yüklerin güçleri düşük olsa bile, gerilim dalga şeklinde bozulmalara neden olurlar. Enerji sisteminde doğrusal karaktere sahip olmayan birçok yükün var olduğu düşünülürse, harmonik gerilim kayıplarının ve toplam bozulmanın yüksek değerlere ulaşılması kaçınılmaz olur.

Günümüzde doğrusal olmayan karakteristikli cihazların kullanımının hızlı artışı, harmonik bileşenlerin sayısının ve var olan genliklerinin artmasına neden olmaktadır.

Enerji kalitesinin artırılması ve işletmenin sürekliliği için harmonik analizin geniş boyutta yapılması ve bu harmoniklerin önlenmesi gerekmektedir. Harmonikler sistemde ilave güç kayıplarına neden olurlar. Bazı durumlarda, güç elemanlarının zarar görmesine veya yanlış çalışmasına neden olurlar. Bunun yanında sistemde

bulunan çeşitli frekanstaki akım ve gerilim harmonikleri, rezonans oluşmasına neden olabilir. Rezonans durumunda oluşacak yüksek akım ve gerilim, işletmeye büyük zarar verebilir.

Enerji kalitesini artırmak için uygulanan genel yöntem Pasif Filtrelerdir (PF). PF'lerle gerçekleştirilen uygulamalar, sadece belirlenen harmonikleri yok etmek amacıyla tasarlandığından dolayı, gelişen sanayinin ihtiyacını karşılamaktan uzaklaşmıştır. PF'lerin tasarımı yapılırken var olan yüklerin geniş bir teknik analizinin yapılması gerekmektedir. Telafi edici verileri tekrar incelenmezse şebekede rezonans durumları yaşanabilir. Pasif filtrelerin en büyük dezavantajı rezonans durumlarıyla karşılaşma olasılığıdır. Rezonans durumunda şebeke çok büyük zarar görebilir[1,3-4].

Bu nedenle, aktif bir çalışma sergileyen Aktif Filtrelerin (AF) geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Aktif çalışmanın amacı, yükün değişen durumlarında dahi, sürekli filtreleme(süzme) yapmak ve harmonikleri engellemektir. AF'lerin kullanıldığı sistemlerde belirlenen değil, var olan tüm harmonikler engellenir. Bu nedenle, sistemde yapılan değişimler veya ek yükler AF'lerin çalışmasını etkilemez. Elektronik sektörünün gelişmesine paralel olarak, hızlı bir gelişim gösteren AF'ler, son 25 yıldır, pratik olarak uygulanmaktadır. Gelecekte, bu konunun daha da yaygın kullanım alanı bulacağı ve gelişen teknoloji ile daha da hızlı ve verimli kullanılacağı mutlaklıdır.

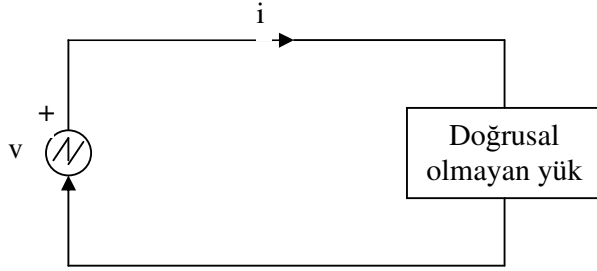


## BÖLÜM 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ TANIMLAR

Güç elektroniği sistemleri, sanayi ve günlük hayatta, hayatımızı kolaylaştırmalarına rağmen, harmonik üreten ürettikleri için şebekeye zararları çok büyüktür. Bu sistemlerin, analizi kusursuz yapılarak, harmoniklerin yok edilmesi gerekir.

### 2.1. Doğrusal Olmayan Yük için Akım Gerilim ve Güç Tanımı

İdeal bir kaynaktan lineer olmayan bir yükü beslediğimizi düşünelim.



Şekil 2.1 Lineer olmayan yükü besleyen devre

Burada gerilim harmoniksiz ideal bir yapıdadır. Gerilimin ani değeri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [1,2,3].

$$v = V_m \cdot \cos \omega t \quad (2.1)$$

$V_m = 1$ 'inci bileşenin maksimum gerilim değeri

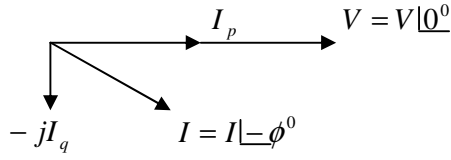
Akım ise sonsuz sayıda harmonikten oluşmaktadır. Yükü endüktif kabul edersek, şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım arasında faz farkı bulunmaktadır. Akım gerilimi geriden takip eder. Akımın ani değeri Fourier serileri ile aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$i = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (2.2)$$

$I_{mn}$  = n'inci bileşenin maksimum akım değeri

$\phi_n$  = n'inci bileşen faz açısı

Akımdaki faz farkı nedeniyle akımı fazörlerle ifade etmek, faz farkı bulunan bir sistemi ifade etmemizi kolaylaştıracaktır.



Şekil 2.2. Yük akım fazörleri

Şekil 2.2'den görüleceği gibi akımın iki adet bileşeni bulunmaktadır. Bileşenlerin bir tanesi gerçel bileşen, diğeri ise sanal bileşendir. Akım bileşenlerinin etkin değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,  $I_p$  ve  $I_q$  birbirlerine diktirler. [7]

$$i_p = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cos n\omega t \cdot \cos \phi_n \quad (2.3)$$

$$i_q = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} - \sin n\omega t \cdot \sin \phi_n \quad (2.4)$$

Gerçel ortalama güç  $P$ , aktif güç olarak isimlendirilir ve akım ile gerilimin gerçel bileşenlerinin çarpımına eşittir. Gerçel bileşenler birbirleriyle aynı fazdadırlar.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_m \cdot I_{mn} \cdot \cos \phi_n \quad (2.5)$$

Fakat akımın,  $I_p$  ve  $I_q$  gibi iki bileşenden oluştuğunu unutmamak gerekir. Burada iki ayrı gücün var olduğunu göstermek gerekir. Diğer akım fazörü olan  $I_q$ 'nin aktif güce

hiçbir etkisi yoktur,  $I_q$  tarafından oluşturulan güç, reaktif güç olarak tanımlanır. Aşağıda reaktif güç olarak  $Q$  gösterilmiştir[7].

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_m I_{mn} \cdot \sin \phi_n \quad (2.6)$$

Kompleks güç  $S$  ise, aktif ve reaktif gücün vektörel olarak toplamından oluşur.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

Aktif gücün fiziksel olarak bir anlamı vardır. Aktif güç yararlı güç olarak tanımlanır ve içinde çok az kayıp güç barındırır. Reaktif güç ise elektromanyetik cihazlarda elektromanyetik alan oluşturur ve yararlı bir iş için kullanılamaz. Reaktif güç, sistemdeki cihazların yüklenmesine neden olur. Bu nedenle ideal olarak, reaktif gücün sıfır olması istenir[12].

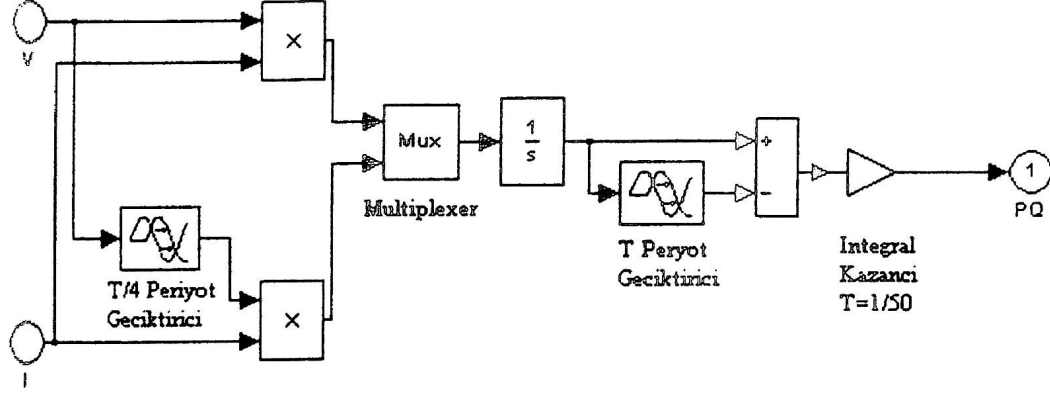
Matlab/Power System Blockset de yer alan Active/Reactive Power ölçüm bloğu her bir faz için ölçme işlevini aşağıda verilen bağıntıları gerçekleştirecek şekilde kurulmuş blok diyagramla sağlar. Matlab, harmonik içeren ve periyodik değişen ani faz akım ve gerilim değerlerinden  $P$  ve  $Q$  ortalama güçleri,  $v(t) \cdot i(t)$  çarpımının bir periyot boyunca ortalamasını alarak hesaplar. Bu şekilde güç değerleri temel frekans için hesaplanmış olur. Üç faz için yapılan benzer ölçüm sonuçlarının toplamı kaynaktan çekilen toplam  $P_s$  ve  $Q_s$  güçlerini oluşturur.

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\omega t) \cdot i(\omega t) \cdot dt \quad (2.8)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\omega t) \cdot i\left(\omega t - \frac{T}{4}\right) \cdot dt \quad (2.9)$$

Güç ölçümü, sistemin elektriksel analizinin çıkarılması sebebiyle çok önemlidir. Devre elemanlarının tespitinde, yükün güç bileşenlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Aşağıda Matlab/Power System Blockset’de yer alan Active/Reactive Power devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Ortalama aktif ve reaktif gücün hesaplanması

## 2.2. Etkin Akım ve Etkin Gerilim Değerinin Hesaplanması

Güç elektroniği devrelerinde bulunan, anahtarlama yapan cihazlar, belli bir periyotta kendilerini tekrarlarlar. Bu yüzden burada sürekli hal tanımı yapılabilir [2].

Herhangi bir yüke ait ani güç aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$p = v \cdot i \quad (2.10)$$

Sürekli halde ise, bir zaman süresi içerisinde akan gücün ortalama değeri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$P_{et} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (2.11)$$

$P_{et}$  = Etkin gücün ortalama değeri

Devrenin tamamen doğrusal olduğu varsayılırsa, gerilim ifadesi  $v = R \cdot i$  olarak yazılabilir. Bu durumda etkin güç ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$P_{et} = R \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt \quad (2.12)$$

Ortalama güç akısı  $P=R \cdot I^2$  olduğu göz önüne alınarak, etkin akım değeri şu şekilde ifade edilebilir.

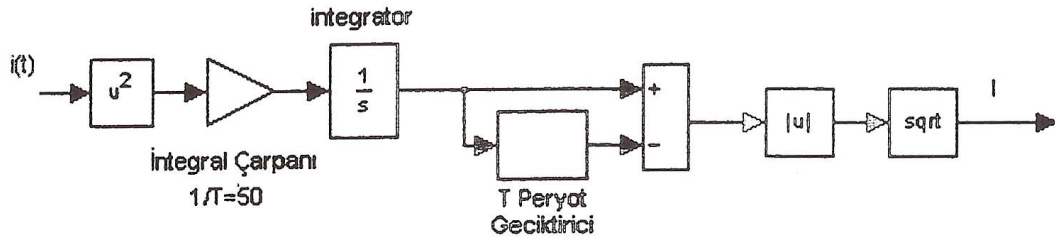
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (2.13)$$

Bu tanım gerilim içinde kolaylıkla yapılabilir.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (2.14)$$

Etkin akımın tanımı bize devre dizaynında birçok üstünlük sağlamaktadır.

Matlab/Simulink ortamında yukarıda verilen bağıntıyı gerçekleştirecek şekilde oluşturulmuş model devresi aşağıda gösterilmektedir. Burada her dalga için anlık ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm, belirlenen frekans için her periyotta tekrarlanmaktadır.



Şekil 2.4. Akım ve gerilim etkin değerlerinin hesaplanması

## 2.3. Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar

### 2.3.1. Güç faktörü

Güç Faktörü (GF) kavramı, AA güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gereklidir. S, sistemin görünür gücü, P ise aktif güç olduğu için toplam güç faktörü bunların oranıdır.

$$\text{Güç Faktörü} = \frac{P}{S} = \frac{V_s \cdot I_{s1} \cdot \cos \phi}{V_s \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cdot \cos \phi \quad (2.15)$$

$V_s$  = Örnekleme gerilimi

$I_s$  = Örnekleme akımı

$I_{s1}$  = 1'inci harmoniğin örnekleme akımı

Sinüzoidal olmayan akım şeklinde, harmonikler ne kadar artarsa, güç faktörü de o kadar azalır.

## BÖLÜM 3. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

### 3.1. Fourier Analizi

Fransız matematikçi J. Fourier nonsinüsoidal periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamında oluştuğunu, başka bir deyişle; bütün dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “FOURIER SERİSİ”, bu seri elemanlarına da “FOURIER BİLEŞENLERİ” adı verilir [2].

Herhangi bir periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir.

$f(t) = f(t + T)$  ifadesiyle belirlenen devirli herhangi bir fonksiyon şu şartları sağladığında fourier serisine açılabilir;

- 1) Fonksiyon süreksiz ise,  $T$  periyodu içerisinde sonlu sayıda süreksizlik noktası bulunmalıdır.
- 2) Fonksiyonun  $T$  periyodu için sonlu ortalama değeri bulunmalıdır.
- 3) Fonksiyonun sonlu sayıda pozitif ve negatif maksimum değerleri olmalıdır.

Dirichlet şartları olarak adlandırılan bu şartlar sağlandığında fonksiyonun fourier açılımı vardır.

Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür [4].

Fourier serileri, verilen fonksiyonu sinüsoidal hale getirir. Bu fonksiyonlara periyoda haiz fonksiyonlar da denir[25].

Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Periyodik fonksiyonlar fourier serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinde oluşan bir seri halinde yazılabilir. Bu tanımdan hareketle  $T$  periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen  $f(t)$  dalgası fourier'e göre;

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (3.1)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (3.2)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(t\mu\varphi_1) + C_2 \sin(2t\mu\varphi_2) + C_3 \sin(3t\mu\varphi_3) + \dots + C_n \sin(nt\mu\varphi_n) \quad (3.3)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt\mu\varphi_n) \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir [6].

Bu denklemlerde;

$t$  : Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde  $t = wt$  olmaktadır.)

$A_0$  : "0" indisi ile gösterilen sabit terim (doğru veya ortalama değer olup literatürde

$A_0$  yerine  $\frac{A_0}{2}$  'de kullanılmaktadır.)

"1" indisi ile gösterilen birinci terime, temel bileşen adı verilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüsoidal dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler. 2, 3, 4, ...,  $n$  indisi ile



gösterilen bileşenlere ise harmonik adı verilmektedir.  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n, B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$   $f(t)$  fonksiyonunun fourier katsayılarıdır, entegrasyon sonunda bulunur.

$n : 1, 2, 3, \dots, n$  (pozitif tam sayı) harmonik mertebesi.

Elektrik sistemlerinde;

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos wt + A_2 \cos 2wt + A_3 \cos 3wt + \dots + A_n \cos nwt + B_1 \sin wt + B_2 \sin 2wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_n \sin nwt \quad (3.5)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nwt + B_n \sin nwt) \quad (3.6)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(wt\mu\varphi_1) + C_2 \sin(2wt\mu\varphi_2) + C_3 \sin(3wt\mu\varphi_3) + \dots + C_n \sin(nwt\mu\varphi_n) \quad (3.7)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nwt\mu\varphi_n) \quad (3.8)$$

şekline dönüşür [2].

$$A_n \cos nwt + B_n \sin nwt = C_n \sin(nwt\mu\varphi_n) \quad (3.9)$$

eşitliğinde;

$C_1 \sin(wt\mu\varphi_1)$  terimine, fonksiyonun 1. harmoniği veya temel dalga denir.

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  : Harmoniklerin genlikleri olup[26].

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (3.10)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{B_1}{A_1}\right) \quad \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (3.11)$$

eşitlikleri yazılabilir.

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$  : harmoniklerin faz açıları.

$w$  : açısal frekans.

Genel olarak sinüsoidal olmayan periyodik bir fonksiyon fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Bununla beraber uygulamalarda sonsuz harmonik mertebesi daima sonlu değer alır.

Uygulamada, serinin genellikle ilk 3 ya da 4 terimi ele alınır. Böylece elde edilecek efektif değerler ideale çok az hata ile yaklaşmış olurlar ve hesaplar kolaylaşır [1].

Yukarıdaki fourier serilerinin katsayılarının bulunmasında şu yöntemler kullanılır;

- a) Analitik yöntemle bulunması,
- b) Grafik yöntemle bulunması,
- c) Ölçme yöntemiyle bulunması,
- d) Bilgisayar destekli analiz yöntemleriyle bulunması.

### 3.1.1. Fourier katsayılarının analitik yöntemle bulunması

Fourier katsayıları  $(A_0, A_n, B_n)$  analitik yöntemle aşağıdaki formüllerle bulunabilir;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (3.12)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos nwt dt \quad (3.13)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin nwt dt \quad (3.14)$$

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline göre açılımda bazı harmonikler bulunmayabileceği gibi bazen de yalnız cosinüslü veya sinüslü terimlerin sadece bir kısmı mevcut olabilir. Bu suretle açılımda bir takım kısaltmalar yapılabileceğini önceden kestirmek mümkündür. Rastlanan başlıca durumları şöyle sıralayabiliriz[27];

a)  $y = f(t)$  fonksiyonunun değişimini gösteren eğri birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşuyorsa bu taktirde  $f(\pi + t) = -f(t)$  şartı sağlanır. Şu halde  $A_0 = 0$  olmalı ve aynı zamanda  $t$ 'nin çift katlarının cosinüsleri ve sinüsleri bulunmamalı, yani bunların katsayıları sıfır olmalıdır[13].

Bu kısaca;

$A_0 = A_{2n} = B_{2n} = 0$  olarak ifade edilebilir. Böylece açılım daha basit olan

$$f(t) = A_1 \cos wt + A_3 \cos 3wt + \dots + B_1 \sin wt + B_3 \sin 3wt + \dots \quad (3.15)$$

şeklini alır.

b) Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğri (a)'daki şartı gerçeklemekle beraber, ayrıca her yarım periyotluk kısım  $\frac{1}{4}$  periyoda karşılık gelen noktadan geçen bir düşey eksene göre simetrikdir. Bu taktirde  $f(\pi - t) = f(t)$  şartı sağlanır. Şu halde;

$A_1 = A_{2n+1} = B_{2n} = 0$  olması gerekir.

Bunda önceden (a) şıkkında bulunan şartı da ekleyerek  $t$ 'nin yalnız tek katlarının cosinüslerinin bulunacağı görülür. O halde açılım;

$$f(t) = B_1 \sin wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_{2n+1} \sin[(2n+1)wt] \quad (3.16)$$

şeklinde olur, yani açılımda sadece tek harmonikler mevcuttur.

c) Eğri, fonksiyonun sıfır değerine tekabül eden noktaya göre simetrikse  $f(-t) = -f(t)$  şartı sağlanır. Şu halde;

$$A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_n = 0 \text{ şartı bulunarak açılım,}$$

$$f(t) = B_1 \sin wt + B_2 \sin 2wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_n \sin nwt \quad (3.17)$$

şeklinde yazılır.

d) Eğrinin bir periyoda karşılık gelen düşey bir simetri eksenini bulunması hali. Yani;  $f(-t) = f(t)$  şartı gerçekleşmiştir. Bu şart (c) şikkındaki şarta benzer fakat sadece bir işaret farkı vardır. Şu halde;

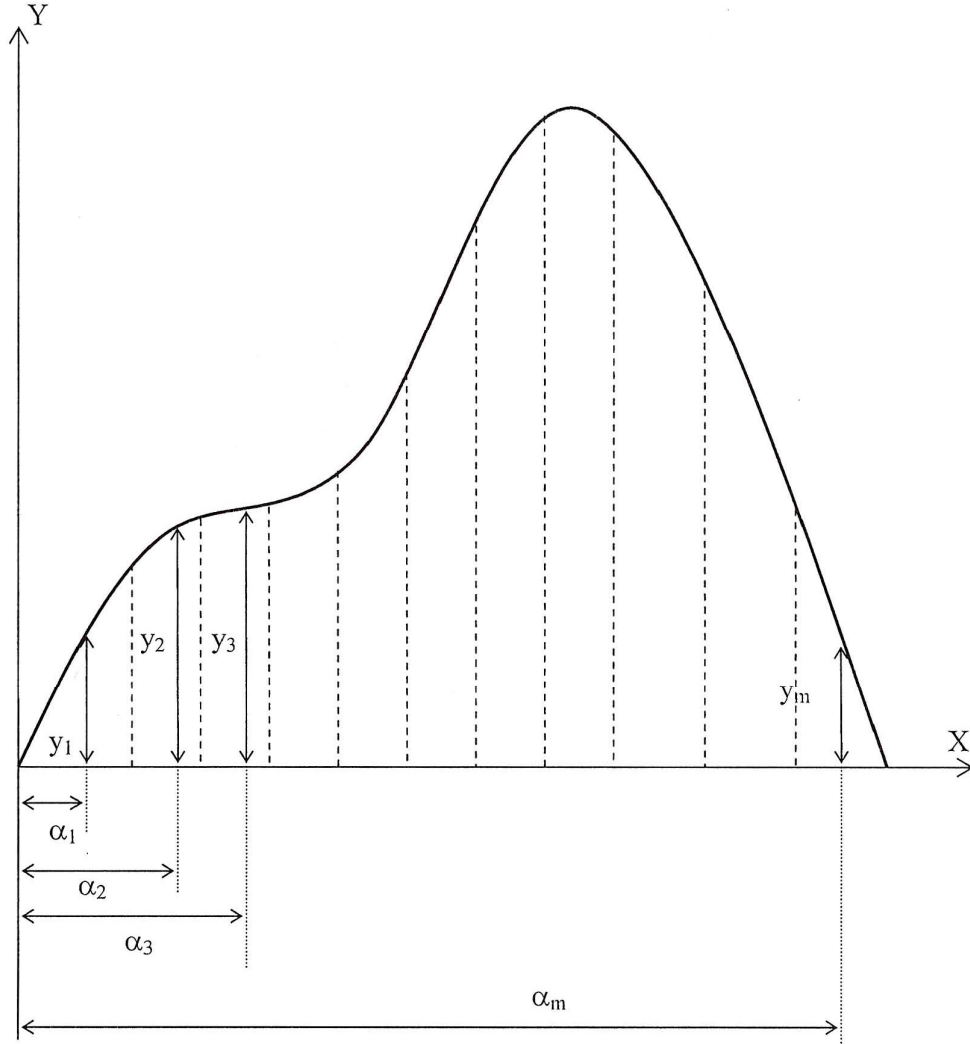
$$B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B_n = 0 \text{ şartı bulunarak açılım,}$$

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos wt + A_2 \cos 2wt + A_3 \cos 3wt + \dots + A_n \cos nwt \quad (3.18)$$

şeklinde yazılır.

### 3.1.2. Fourier katsayılarının grafik yöntemle bulunması

Genellikle cihazların osilografik kayıtları çoğu zaman alınır. Böylece cihazlara ait akım ve gerilim şekilleri üzerinde yorum yapmak mümkün olur. Ayrıca devrelerin ve makinelerin nonsinusoidal dalgaların bulunduğu koşullarda çalıştığının pratik analizleri de yapılır. Fourier katsayılarının  $(A_0, A_n, B_n)$  belirlenebilmesi için dalga analizi yapmak gerekir[13].



Şekil 3.1. Grafik metotla fourier analizinin yapılması [8]

Fourier denklemindeki katsayıların belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir metot; dalgayı eşit aralıklı dikey parçalara bölmek ve her birinin ortalama ordinatlarını ölçmektir. Daha sonra ölçülmüş değerlerle ilgili sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren iki denkleme kullanmaktır. Grafikselleştirilmesinde sonucun iyi derecede doğruluğa sahip olması için çok fazla sayıda ordinat tahmin edilmeli ve bu tahminler büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Ayrıca basit dahi olsa uzun hesaplamaları kolaylaştırmak için temel bileşen ve harmonik bileşenler için değerleri düzenli bir şekilde tablo haline getirmek gerekir. Nonsinüsoidal dalga simetrik ise yani, aynı

pozitif ve negatif dalgalara sahip ise sadece bir yarı dalga değişimini analiz etmek ve temel bileşenler ile tek harmonikler için hesaplamalar yapmak gerekir[15].

Şekil 3.1’de  $x$  eksenini boyunca elektriksel derece olarak  $\frac{180}{m}$  aralıkla  $m$  adet dikey parçaya bölünmüş bir simetrik nonsinüsoidal dalğanın pozitif yarı dalgası görülmektedir. Birbirini takip eden bölümlerin ortalama ordinatları orijinde sırayla  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m$  açıları da  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ ’e kadar değerlerine sahiptir. Temel bileşenler için Fourier eşitlikleri aşığıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenebilir;

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cos \alpha_1 + y_2 \cos \alpha_2 + y_3 \cos \alpha_3 + \dots + y_m \cos \alpha_m) \quad (3.19)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \sin \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_2 + y_3 \sin \alpha_3 + \dots + y_m \sin \alpha_m) \quad (3.20)$$

bu denklemleri,

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos \alpha_i) \quad (3.21)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin \alpha_i) \quad (3.22)$$

olarak da basit bir şekilde ifade edebiliriz. Aynı şekilde 3. harmonik için;

$$A_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos 3\alpha_i) \quad (3.23)$$

$$B_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin 3\alpha_i) \quad (3.24)$$

n. harmonik için;

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \quad (3.25)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \quad (3.26)$$

şeklinde yazılabilir.

İstenilen doğruluk derecesine göre bölünme sayısı belirlenip düzgün bir şekilde bölme işlemi yaptıktan sonra herhangi bir harmonik için sinüslü veya cosinüslü terimlerinin katsayılarının belirlenmesi için aşağıda gösterilen yol izlenir[15];

- a) Orijinden dikey olarak bölünmüş kısımların orta noktalarına kadar ölçülen açıları hazırladığımız tablonun 1. kolonuna yazılır
- b) Sinüs ve cosinüs işlemleri yardımıyla  $\sin n\alpha$  ve  $\cos n\alpha$ 'nın değerleri her bir açı için bulunur. Burada işaretlerin doğru olup olmadığına dikkat edilmelidir.
- c) Bölünen parçaların orta noktalarına karşılık gelen  $y$  değerleri ölçülüp açılarının yanına yazılır.
- d) Sinüslü terimlerin katsayısı olan  $A_n$ 'i bulmak için  $y_n \cos n\alpha$  çarpımına bir kolon daha yapılır.
- e) Aynı şekilde  $B_n$ 'i bulmak için  $y_n \sin n\alpha$  çarpımları bulunur ve bir kolon daha yapılır.
- f) Bulunan  $y_n \cos n\alpha$  ve  $y_n \sin n\alpha$  çarpımları cebirsel olarak toplanır.
- g) Verilen eşitlikler kullanılarak gerekli değerler bulunur [8].

Bunu daha iyi açıklayabilmek için bir örnek verelim:

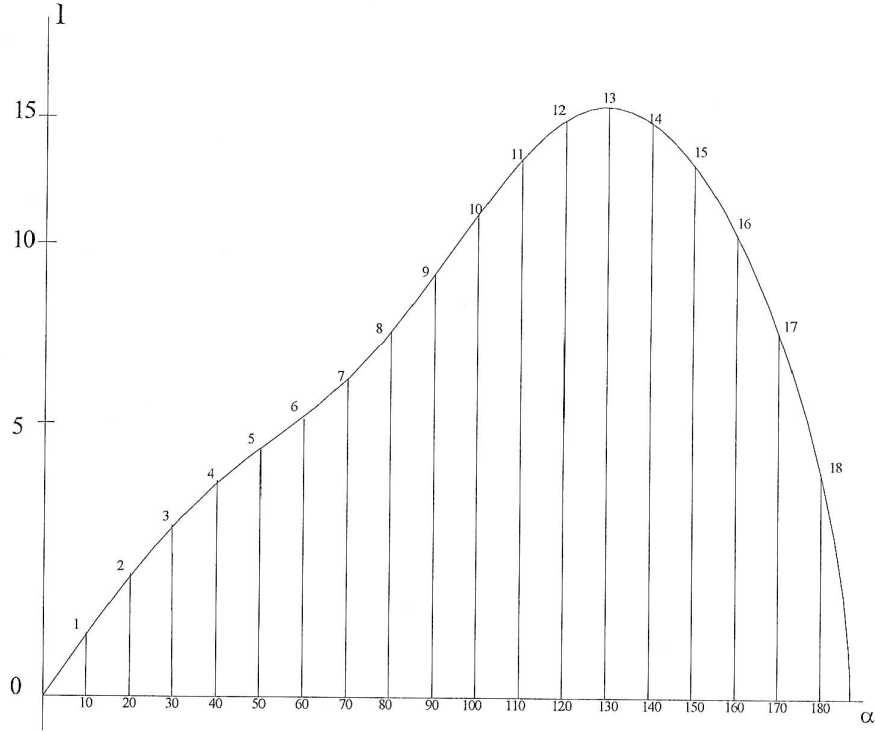
**ÖRNEK:**

Tipik bir simetrik nonsinüsoidal akım olan transformatör uyarma akımının pozitif yarı dalgası Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu dalgayı grafik metot ile analiz edelim [21].

## ÇÖZÜM:

Böyle bir dalga, çok güçlü bir temel bileşen üzerine eklenmiş oldukça baskın üçüncü harmonik ve zayıf bir beşinci harmoniğe sahiptir. 5. harmonikten sonraki harmonikler fazla etkili değildir ve bu analizde göz önüne alınmayacaktır.

Yukarıda verilen işlem sırasını izleyerek fourier katsayıları için tablo ve hesaplamalar yapılır. Daha sonra dalganın eşitliği sinüs ve cosinüslü terimlerden oluşan bir fonksiyon olarak ifade edilir.



Şekil 3.2. Analiz edilen dalga [7]

Tablo 3.1.  $f(\alpha)$  değerleri [7]

$\alpha$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
f	1.3	2.4	3.1	3.7	4.4	5.2	6.1	7.3	9.3	11.5	13.6	15	15.5	14.4	11.7	6.6	2.8	0.5



Tablo 3.2. Temel bileşen için yapılan hesaplamalar [7]

$\alpha$ (Derece)	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$y$	$y \sin \alpha$	$y \cos \alpha$
10	0.1736	0.9848	1.3	0.226	1.280
20	0.3420	0.9397	2.4	0.821	2.555
30	0.5000	0.8660	3.1	1.550	2.680
40	0.6480	0.7660	3.7	2.380	2.840
50	0.7660	0.6428	4.4	3.370	2.830
60	0.8660	0.5000	5.2	4.510	2.600
70	0.9397	0.3420	6.1	5.720	2.090
80	0.9848	0.1736	7.3	7.190	1.268
90	1.0000	0.0000	9.3	9.300	0.000
100	0.9848	-0.1736	11.5	11.310	-1.995
110	0.9307	-0.3420	13.6	12.760	-4.650
120	0.8660	-0.5000	15.0	15.000	-7.500
130	0.7660	-0.6428	15.5	11.880	-9.960
140	0.6428	-0.7660	14.4	9.250	-11.030
150	0.5000	-0.8660	11.7	5.850	-10.130
160	0.3420	-0.9397	6.6	2.260	-6.200
170	0.1736	-0.9848	2.8	0.485	-2.755
180	0.0000	-1.0000	0.5	0.000	-0.500
<b>TOPLAM</b>				<b>103.862</b>	<b>-36.877</b>

$A_1, B_1$  katsayılarının bulunabilmesi için sırasıyla, denklem 3.25 ve denklem 3.26'dan yararlanarak;

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \Rightarrow A_1 = \frac{2}{18} * (-36.877) = -4.10$$

ve

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \Rightarrow B_1 = \frac{2}{18} * 103.862 = 11.54$$

elde edilir.

Tablo 3.3. 3. harmonik için yapılan hesaplamalar [7]

$\alpha$ (Derece)	$3\alpha$	$\sin 3\alpha$	$\cos 3\alpha$	$y$	$y \sin 3\alpha$	$y \cos 3\alpha$
10	30	0.500	0.866	1.3	0.65	1.13
20	60	0.866	0.500	2.4	2.08	1.20
30	90	1.000	0.000	3.1	3.10	0.00
40	120	0.866	-0.500	3.7	3.20	-1.85
50	150	0.500	-0.866	4.4	2.20	-3.81
60	180	0.000	-1.000	5.2	0.00	-5.20
70	210	-0.500	-0.866	6.1	-3.05	-3.28
80	240	-0.866	-0.500	7.3	-6.32	-3.65
90	270	-1.000	0.000	9.3	-9.30	0.00
100	300	-0.866	0.500	11.5	-10.00	6.75
110	330	-0.500	0.866	13.6	-6.8	11.78
120	360	0.000	1.000	15.0	0.00	15.00
130	390	0.500	0.866	15.5	7.75	13.40
140	420	0.866	0.500	14.4	12.50	7.20
150	450	1.000	0.000	11.7	11.70	0.00
160	480	0.866	-0.500	6.6	5.72	-3.30
170	510	0.500	-0.866	2.8	1.40	-2.43
180	540	0.000	-1.000	0.5	0.00	-0.50
<b>TOPLAM</b>					<b>14.83</b>	<b>30.44</b>

$A_3, B_3$  katsayılarının bulunabilmesi için sırasıyla, denklem 3.25 ve denklem 3.26'dan yararlanarak;

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \Rightarrow A_3 = \frac{2}{18} * 30.44 = 3.38$$

ve

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \Rightarrow B_3 = \frac{2}{18} * 14.83 = 1.64$$

elde edilir.

Tablo 3.4. 5. harmonik için yapılan hesaplamalar [7]

$\alpha$ (Derece)	$5\alpha$	$\sin 5\alpha$	$\cos 5\alpha$	$y$	$y \sin 5\alpha$	$y \cos 5\alpha$
10	50	0.766	0.643	1.3	1.00	0.81
20	100	0.985	-0.174	2.4	2.36	-0.42
30	150	0.500	-0.866	3.1	1.55	-2.68
40	200	-0.342	-0.940	3.7	-1.26	-3.17
50	250	-0.940	-0.342	4.4	-4.13	-1.50
60	300	-0.866	0.500	5.2	-4.50	-2.60
70	350	-0.174	0.985	6.1	-1.06	6.00
80	400	-0.643	0.766	7.3	4.70	5.59
90	450	1.000	0.000	9.3	9.30	0.00
100	500	0.643	-0.766	11.5	7.40	-8.82
110	550	-0.174	-0.985	13.6	-2.36	-13.40
120	600	0.866	-0.500	15.0	-13.00	-7.30
130	650	-0.940	-0.342	15.5	-14.55	5.30
140	700	-0.342	0.940	14.4	-4.92	13.50
150	750	0.500	0.866	11.7	5.85	10.14
160	800	0.985	0.174	6.6	6.50	1.15
170	850	0.766	-0.643	2.8	2.15	-1.58
180	900	0.000	-1.000	0.5	0.00	-0.50
<b>TOPLAM</b>					<b>-4.97</b>	<b>5.25</b>

$A_5, B_5$  katsayılarının bulunabilmesi için sırasıyla, denklem 3.25 ve denklem 3.26'dan yararlanarak;

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \Rightarrow A_5 = \frac{2}{18} * 5.25 = 0.58$$

ve

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \Rightarrow B_5 = \frac{2}{18} * (-4.97) = -0.55$$

elde edilir.

Bu dalga için ordinat akım olduğu için fourier eşitliği;

$$i = -4.10 \cos \alpha + 11.54 \sin \alpha + 3.38 \cos 3\alpha + 1.64 \sin 3\alpha + 0.58 \cos 5\alpha - 0.55 \sin 5\alpha$$

olur.

Bu eşitliği, daha çok istenilen, denklem 3.7'deki formda elde edebilmek için,  $I_1, I_2, I_3$  akımlarının büyüklüklerini denklem 3.10'dan ve  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  açılarının da denklem 3.11'den belirlenmesi gerekir. Bunlar;

$$I_1 = \sqrt{(-4.10)^2 + (11.54)^2} = 12.25$$

$$I_3 = \sqrt{(3.38)^2 + (1.64)^2} = 3.76$$

$$I_5 = \sqrt{(0.58)^2 + (-0.55)^2} = 0.80$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{11.54}{-4.10} \right) = -70.44^\circ$$

$$\varphi_3 = \tan^{-1} \left( \frac{1.64}{3.38} \right) = -25.88^\circ$$

$$\varphi_5 = \tan^{-1} \left( \frac{-0.55}{0.58} \right) = -43.47^\circ$$

Böylece akım eşitliği;

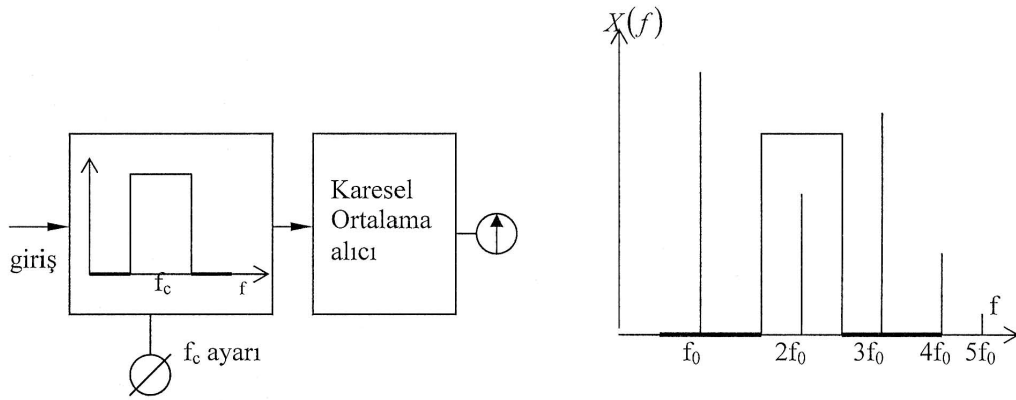
$$i = 12.25 \sin(\alpha - 70.44^\circ) + 3.76 \sin(3\alpha + 25.88^\circ) + 0.80 \sin(5\alpha - 43.47^\circ)$$

şeklinde elde edilir [7].

### 3.1.3. Fourier katsayılarının ölçme yöntemi ile bulunması

Elektrik devrelerinde  $f(t)$  fonksiyonu bir devrenin herhangi bir yerindeki gerilim değişimi olabilir. Zamana göre periyodik olarak değişen böyle bir gerilimde harmoniklerin ölçülmesi için çok çeşitli ölçme düzenleri geliştirilmiştir[23].

Bu ölçme düzenlerinin çoğunun kullandığı yaygın yol, çok dar bantlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile harmoniklerin süzülerek bir voltmetre ile ölçülmesi temeline dayanır. Böyle bir düzenin basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



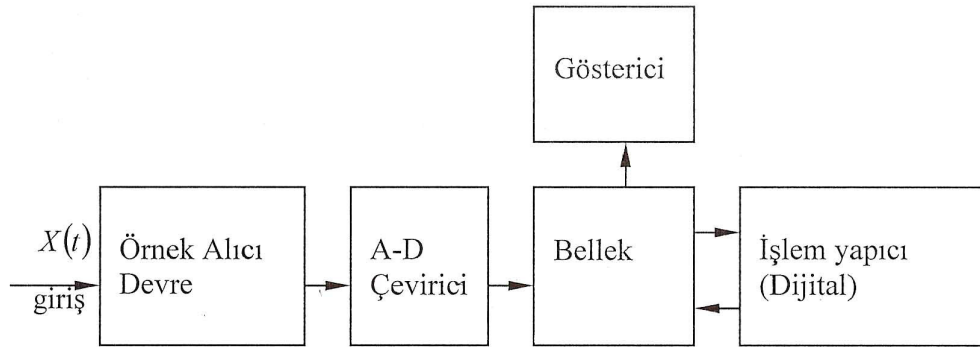
Şekil 3.3. Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü [5]

Bu tür düzenler “harmonik genlik analizörü” ya da “dalga analizörü” olarak isimlendirilir. Bunlara harmonik genlik analizörü demek daha doğrudur. Çünkü bu tür analizörlerle harmoniklerin faz açıları ile ilgili hiçbir bilgi elde edilememektedir [24].

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan ölçme düzenlerinin bir kısmı da dijital harmonik analizörleridir.

Bir dijital harmonik analizörünün basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu analizörün belirgin bir üstünlüğü incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli oluşudur.

Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret/gürültü oranının çok büyük olması gerekir. Başka bir tabirle bir periyotta alınan örneklerin diğer periyotlardakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi gidermek için sadece bir periyot değil de birkaç periyot incelenerek ortalama alınır. Bunun sonucu olarak da sistemde yazma ve tekrarlama için ayrı bir bölüm gerekliliği ortaya çıkar.



Şekil 3.4. Dijital harmonik analizörü

Görülüyor ki örnek alma ve dijital hesaplama ile harmonikler faz açıları ile birlikte ölçülebilmektedir. Üstelik hassasiyet de artırılmış olur.

Harmonikleri faz açıları ile birlikte ölçebilecek analog türde ölçü düzenleri henüz pek geliştirilememiştir. Bunun nedeni elektroniğin birçok dallarında olduğu gibi harmonik analizinin en çok uygulandığı yerlerde bile harmoniklerin faz açılarının bulunmasına çok fazla ihtiyaç duyulmayışına bağlıdır [7].

### 3.2. Nonsinüsoidal Büyüklükleri İçeren Devrelerin İncelenmesi

Elektrik enerji sistemlerinde nonsinüsoidal işaretlerin ortaya çıkması, besleme kaynağının ve devre parametrelerinin karakteristikleriyle yakından bağlantılıdır. Bu konuda besleme geriliminin lineer ve lineer olmayan yük olması durumları için, gerek lineer gerekse lineer olmayan yük devrelere ilişkin analiz aşağıda özetlenmiştir[24].

#### 3.2.1. Sinüsoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yük devreler

Pratikte en çok karşılaşılan durum olup elemanlarında en az biri lineer olmayan yük olan tek fazlı bir devreye,

$$e = V_m \sin \omega t = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (3.27)$$

biçiminde sinüsoidal bir gerilim uygulanması halinde devreden,

$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.28)$$

olarak ifade edilen  $N$  mertebeli harmonikleri içeren bir akım akacaktır. Bu durumda şebekeden çekilen (ortalama) güç:

$$P = VI_1 \cos \varphi_1 \quad (3.29)$$

olur.  $\varphi_1$ , besleme gerilimi ( $V$ ) ile yük akımının temel (besleme frekansı) bileşeni ( $I_1$ ) arasındaki açıdır. Burada, besleme gerilimi sadece temel harmonik bileşeni içerdiğinden, (ortalama) güç sadece temel bileşen akımı ile besleme geriliminin bileşiminden oluşmaktadır.

Bu devredeki diğer değerlerden; efektif gerilim,

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (3.30)$$

efektif akım,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3.31)$$

görünür güç,

$$S = VI \quad (3.32)$$

reaktif güç,

$$Q = VI_1 \sin \varphi_1 \quad (3.33)$$

güç faktörü,

$$\frac{P}{S} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \quad (3.34)$$

şeklinde ifade edilebilir [2].

### 3.2.2. Nonsinüsoidal gerilim beslemeli lineer devreler

Lineer bir tek fazlı devreye,

$$e = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.35)$$

şeklinde N mertebede harmonik içeren bir sinüsoidal bir gerilim uygulansın. Bu durumda akacak akım harmonikleri yük empedansı lineer olması sebebiyle sadece besleme gerilimi harmoniklerine bağlı olacaktır. Böylece devreden,



$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \varphi_n - \phi_n) \quad (3.36)$$

akımı akacaktır. Burada,

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad \bar{Z}_n = Z_n \angle \phi_n \quad Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} \quad (3.37)$$

şeklindedir.

$Z_n$  : n. harmoniğe ilişkin empedansın genliği

$\phi_n$  : n. harmonik akımın faz açısı

Gerilim ve akımın efektif değeri;

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (3.38)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3.39)$$

olup böyle bir devrede aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \phi_n \quad (3.40)$$

Görünen güç ise,

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3.41)$$

eşitlikleri ile verilebilir. Burada,

$$S^2 \neq \sum_{n=1}^N V_n^2 I_n^2 \quad (3.42)$$

eşitsizliği gerçekleşmektedir. Güç faktörü,

$$\frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \phi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \quad (3.43)$$

reaktif güç,

$$S^2 - P^2 = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n I_n \sin \phi_n} + \sum_{m=1}^{m=N} \sum_{n=1}^N (V_n^2 I_m^2 - V_n V_m I_n I_m \cos(\phi_n - \phi_m)) \quad (3.44)$$

olacaktır [2].

### 3.2.3. Nonsinüsoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yük devreler

Lineer olmayan yük bir devreye ani değeri,

$$e = \sqrt{2} \left[ \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1} \sin(n_1 \omega t + \varphi_{n_1}) + \sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2} \sin(n_2 \omega t + \varphi_{n_2}) \right] \quad (3.45)$$

ve efektif değeri,

$$E = \sqrt{\sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2} + \sqrt{\sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2}^2} \quad (3.46)$$

şeklinde olan bir gerilim uygulandığında, devreden geçen yük akımının ani değeri;

$$i_y = \sqrt{2} \left[ \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1} \sin(n_1 \omega t + \varphi_{n_1} - \psi_{n_1}) + \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3} \sin(n_3 \omega t + \varphi_{n_3} - \psi_{n_3}) \right] \quad (3.47)$$

biçiminde olup efektif değeri,

$$I_y = \sqrt{\sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 + \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2} \quad (3.48)$$

olmaktadır (bu akımda yük empedansı,  $n_1$  grubu besleme gerilim harmonikleri için  $\psi_{n_1}$  faz açılı ve endüktif olarak kabul edilmiştir). Böyle bir devrede zamandan bağımsız olan ortalama güç;

$$P_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e i_y dt = \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1} I_{n_1} \cos \psi_{n_1} \quad (3.49)$$

yazılabilir. Görüldüğü gibi güç, sadece aynı frekanslı terimlerin bileşenlerinden transfer edilmektedir. Yüke ilişkin görünür güç;

$$S_y = \sqrt{V_y^2 I_y^2} = \left[ \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 + \sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2}^2 \right) \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 + \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2 \right) \right] \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir [2].

## **BÖLÜM 4. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR VE HARMONİKLERİN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

### **4.1. 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 doğrusal 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 birçok yararlar getirirken beraberinde birçok olumsuzlukları da getirmektedir. Örneğin jeneratör, 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) periyodik akımı keserken yine harmonikler oluştururlar [5].

Yukarıda bahsedilen harmonik kaynakların bazıları aşağıda incelenecektir.

#### 4.1.1. Jeneratörler

Makine 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 ( $h \cdot f_1$ ), h. harmonik gerilimi,

$$U_h = 4,44 \cdot h \cdot f_1 \cdot N_s \cdot k_n \cdot \phi_n \quad (4.1)$$

$U_h$  = Endüklenen h. harmonik gerilimi

$k_n$  = n'inci harmoniğin sargı faktörü

$N_s$  = Bir faz sargı sarım sayısı

$f_1$  = Temel frekans

şeklinde ifade edilir. Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, üç ve üçün katı frekanslı harmonikler sadece faz-nötr gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar[24].

Eğer yıldız bağlı jeneratöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yükün yıldız noktası jeneratörün 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].

#### 4.1.2. 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 [14].

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 [18]. Elektronik güç dönüştürücüleri 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 doğrusal devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Tablo 4.1'de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir [19]. Burada  $I_{\mu}$  transformatörün mıknatıslanma akımı,  $I_n$  transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımdır.

Tablo 4.1. Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	$(\%) \frac{I_n}{I_{\mu}}$
3	0,5
5	0,2
7	0,05
9	0,026

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör

harmonik üretir ve Tablo 4.1’de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur.

Transformatörlerin doğrusal olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin periyodik olmayan 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,

$$K - Faktörü = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (4.2)$$

olarak tanımlanır [15]. Bu bağıntıda 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’in altındaki transformatörler için tanımlanmıştır.[21]

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

### 4.1.3. Doğrultucular

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

$$h = k \cdot p \pm 1 \quad (4.3)$$

p = Darbe sayısı

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

$$I_h = I_1 \cdot \left( \frac{\ddot{u}_h}{h} \right) \quad (4.4)$$

$I_h$  = Harmonik akımın efektif değeri

$\ddot{u}_h$  = Bir katsayı

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.

#### 4.1.4. 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 doğrudan bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal 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.

#### 4.1.5. Gaz boşalması prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın boşalması prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) doğrusal olmayan 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 yok etmek mümkündür. Tablo 4.2’de magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir [6,14].

Tablo 4.2. Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu

	<b>Harmonik (n)</b>										
	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

#### 4.1.6. Diğer harmonik kaynaklar

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

- Elektrik makinelerindeki diş ve oluklar
- Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi
- Senkron makinelerde hava aralığı döner alanı
- Senkron makinelerde 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 doğrusal motorları süreklilik için kullanılan frekans dönüştürücüler
- İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler
- Kaynak makineleri
- Yarı iletken kontrollü cihazlar (motor hız kontrol düzenleri, ısıtıcılarda ısı regülasyon düzenleri, elektronik termosifonlar vb.)
- Başta teyp, portatif tv adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanılan doğrultucu devreler
- Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemlerde tristör anahtarlamalı statik VAr telafi edici
- Kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlamalı 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, üniversal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri
- Konutlarda kullanılmaya başlanan bulanık kontrollü çamaşır ve bulaşık makineleri, özellikle çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikrodalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler ve hava düzenleyiciler (klimalar)
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya sprelerinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında özellikle ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi.

#### **4.2. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri**

Harmonik akımların frekansları 50 Hz'in tam katları olduğundan, bu akımların jeneratörler, 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[7].

Bir tüketici tarafından üretilip şebekeye verilen harmonikler şebekede dağıtılarak başka bir tüketiciye ulaşırlar. Eğer harmonikler ulaştığı tüketicinin yükleri sadece doğrusal 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];

- Jeneratör 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 sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.
- Kontrol sistemlerinde hatalı çalışmalar.
- 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 doğrusal olmayan yüklerin filtreler ile donatılması, dönüştürücüler 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, doğrusal olmayan yüklerin toplam harmonik distorsiyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır. Çeşitli ülkeler tarafından harmonikler için tanımlanmış sınır değerleri Tablo 4.3'de verilmiştir [2,20].

Tablo 4.3. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

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

#### 4.2.1. 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 [9].

Paralel rezonans olayı en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Doğrusal 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 yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Genel olarak, baradan enerji sistemine akan akım küçük ancak harmonik gerilim değeri yüksek ise, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Eğer baraya bağlı yükler harmonik akımlar çekiyor ve bu durum barada harmonik gerilimlerin oluşmasına neden oluyorsa, rezonansın sistemin endüktansı ve yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir [2].

Seri rezonans, rezonans frekansı ile 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 [11].

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 [25].

#### 4.2.2. Harmoniklerin kayıplara etkisi

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

$$P_k = R I^2 \quad (4.5)$$

olarak tanımlanır. Bir nonlineer yükün akımının efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (4.6)$$

bağıntısı ile hesaplandığına göre, bu durumda R<sub>j</sub> iletkenin temel frekans direnci ve R<sub>n</sub> iletkenin n. harmonik frekansındaki direnci olmak üzere iletkendeki güç kaybı,

$$P_k = P_{k_1} + P_{k_{EK}} = R_1 I_1^2 + R_n \sum_{n=2}^N I_n^2 \quad (4.7)$$

P<sub>k</sub> = Kayıp güç

P<sub>k<sub>EK</sub></sub> Harmonik akım bileşenin oluşturduğu ek kayıp güç

olarak tanımlanır [24,25]. Bu eşitlikte görüldüğü gibi harmonik akımların genliği arttıkça akımın harmonik bileşenleri nedeniyle oluşan ek kayıplar da artmaktadır.

Yukarıda güç sisteminde sinüzoidal olmayan akıma bağlı kayıplar ifade edildi. Sistemde gerilime bağlı olarak oluşan kayıplar ise elektrik makinelerinin demir kayıpları ile kondansatörlerin dielektrik kayıplarıdır. Gerilimin nonsinüzoidal olması başka bir deyişle harmonik bileşenleri içermesi halinde de harmonikler nedeniyle ek kayıplar oluşur. Magnetik çekirdekli bir elemenda (motor, transformatör, self bobin vb.) meydana gelen demir (nüve) kayıpları şöyle belirlenebilir; elemena uygulanan gerilimin efektif değeri,

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (4.8)$$

olmak üzere meydana gelen demir kayıpları,

$$P_{Fe} \cong C_m \cdot V^2 = C_m \cdot \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (4.9)$$

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

$$P_{C_k} = \sum_{n=1}^N C \cdot (\tan \delta) \cdot \omega_n \cdot V_n^2 \quad (4.10)$$

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

$$\tan \delta = 1/R\omega C \quad (4.11)$$

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.

#### **4.2.3. Direncin, endüktif ve kapasitif reaktansın harmoniklere bağlı olarak değişimi**

Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebiyle iletken içinde homojen dağılmaması yüzünden iletken direncinin değişmesi “deri etkisi” olarak tanımlanır. Frekans yükseldikçe akım iletkenin dış yüzeyine yakın bölgelerden akma eğilimi gösterir. Bu nedenle iletken kullanılan kesiti azalmaktadır. Deri etkisi sonucu; iletken 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, jeneratör, 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,

$$\left. \begin{aligned} X_L^{(n)} &= nX_L^{(1)} \\ X_C^{(n)} &= \frac{X_C^{(1)}}{n} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

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 4.4’de verilmiştir [20].

Tablo 4.4. Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğeri

Eleman (*)	Model	Parametre	Temel Bileşen Değeri	Harmonik Değeri
Direnç	Empedans	R	R	R+R <sub>h</sub>
	Admitans	G	1/R	1/(R+R <sub>h</sub> )
Endüktans	Empedans	X <sub>L</sub>	X <sub>L</sub>	nX <sub>L</sub>
	Admitans	Y <sub>L</sub>	Y <sub>L</sub>	Y <sub>L</sub> /n
Kapasite	Empedans	X <sub>C</sub>	X <sub>C</sub>	X <sub>C</sub> /n
	Admitans	Y <sub>C</sub>	Y <sub>C</sub>	nY <sub>C</sub>

(\*) Elemanların ideal ve doğrusal oldukları kabul edilmiştir.

#### 4.2.4. Kondansatör grupları üzerine etkileri

Gerilim bozulmasından en çok etkilenen eleman, güç faktörü düzeltiminde kullanılan kondansatör gruplarıdır. Kondansatörlerde en önemli problem, aşırı etkin akımlardır. Diğer bir problem de tepe geriliminin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır[13].

Kapasitif reaktans frekansla ters orantılı olarak değiştiğinden, temel bileşendeki değeri  $X_C$  olan kapasitif reaktans, harmonik mertebesi  $n$  olan bir akımda;

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (4.13)$$

değerini alır, yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bu nedenle, kondansatörler harmonik frekanslarında daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler.  $n$ . harmonik için  $U_n$  harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = n\omega C U_n \quad (4.14)$$

değerini alır. Burada,  $\omega = \omega_1$  temel bileşen açısal frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin etkin değeri;

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (4.15)$$

olur. Kondansatör akımının etkin değeri, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir,

$$I_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (4.16)$$

görüldüğü gibi bu akım, harmonikli gerilimin etkin değerine eşit bir sinüs biçimli gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Telafi edici tesislerinin tasarımında bu durumların göz önüne alınması gereklidir.

Gerilim bozulması durumunda kondansatörlerde oluşacak ek kayıplar;

$$\text{Ek kayıplar} = \sum_{n=2}^n C(\tan \delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (4.17)$$

olarak elde edilir. Burada;

$(\tan \delta)_n$  = kayıp faktörü

$\omega_n = 2\pi f_n$

$V_n$  = n. harmoniğin etkin genliği

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatör gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel bileşene ait güç önem taşır. Buna karşılık, kondansatörün dielektrik kayıpları, yani ısı zorlanma bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir. Dolayısıyla ısı zorlanmada artar. Temel bileşeni ve harmonikleri içeren toplam reaktif güç ifadesi;

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (4.18)$$

olarak verilir. Toplam reaktif güç ifadesi, reaktif gücün anma değerini aşmamalıdır. TS 804'e göre sinüs biçimli gerilim altında anma etkin gerilimi için %110, anma etkin akımı için ise %130 olarak sınır değer konmuştur.

Kondansatör karakteristikleriyle ilgili standartlar, sinüs biçimli olmayan bir dalga uygulandığında, güvenilir bir işletme amacıyla aşılmaması gereken sınırlamaları içerir. IEEE standartlarına göre, kondansatör için gerilim, akım ve reaktif güç sınırlamaları şöyledir:

Anma etkin gerilimi: %10

Anma etkin akımı: %180

Anma reaktif gücü: %135

Tepe gerilimi: %120

Genelde, kondansatör keskin bir rezonans koşulunda bulunmadıkça gerilim bozulması arızaya neden olacak kadar büyük değildir. Endüstriyel güç sistemlerinde daha sık karşılaşılan harmonik problemlerinin ilk belirtilerinden biri kondansatör gruplarında oluşan arızadır.

Daha önce açıklandığı gibi, genelde tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucunda oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar [10].

#### **4.2.5. Transformatorler üzerindeki etkiler**

Harmonikler, transformatorlere 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 transformatorlerde ek ısınmalar oluşur ve transformator 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 transformator kayıpları artar. Bu yüzden transformatorün 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 [17].

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].

#### **4.2.6. Döner makineler üzerindeki etkiler**

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makineler 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 makine kayıplarını yaklaşık olarak %10-12,5 artırır. 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 [23]. 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].

#### **4.2.7. 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 [19]. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerindeki yapılan testlerden, %10-20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerden fazla bir işletme problemi oluşmadığı gözlenmiştir [22].

#### **4.2.8. 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 sayaçları ve aşırı 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 sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik bozunmanın oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan klasik sayaçların (kWh sayaçlarda) harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür [2].

#### **4.2.9. 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].

#### **4.2.10. Güç elektroniği elemanları ve anahtarlama elemanı üzerindeki etkileri**

Güç elektroniği elemanları birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra harmonik bozunmaya çok duyarlıdır. Bu elemanların doğru çalışması gerilim sıfır geçişlerinin doğru saptanmasına bağlıdır. Harmonik bozunma, 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 birtakım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örneğin tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, ateşleme anlarının değişmesi vb. sayılabilir [10].

Harmonik bileşenler anahtarın akım kesme yeteneğini de etkileyebilir. Yani harmonik bileşenler akım sıfır geçişlerinde yüksek  $di(t)/dt$  değerine neden olabilirler ve akım kesme işlemini zorlaştırabilirler [10].

#### **4.2.11. 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 ek  $I^2R$  kayıplardır. Bu kayıplar:

$$P_{k_{EK}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (4.19)$$

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

$$(\Delta V)_n = I_n \cdot Z_n \quad (4.20)$$

olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değeriyle orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırır. Bu da kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda arıza sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. 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 [14].

#### 4.2.12. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

Bilindiği gibi güç faktörü ( $\cos \phi$ ) çalışan bir sistemden sürekli enerji çalmakta ve sistemi sürekli büyümeye zorlamaktadır. Fakat bunun yanında fazlar arası ya da faz toprak arasına yerleştirilen yüksek frekanslı akımlara ihtiyaçları olan doğrusal olmayan yükler de sistem kapasitesinden çalan yeni bir hırsız olarak karşımıza çıkmaktadır[27].

Harmonik akımlara ihtiyaç gösteren yeni cihazlar devreye alındığında güç faktörü 0.88'lerden 0.70'lere düşmektedir. Bu da istenen bir durum değildir.



Lineer olmayan 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].

#### **4.2.13. Diğer bazı elemanlar ve küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerindeki etkiler**

Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir [2,16,18,20];

- Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesini bozabilir.
- Flouresant ve civa buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada, balastın yanı sıra 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.

## **BÖLÜM 5. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLER VE HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ**

### **5.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları**

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımın endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin uyum sağlayarak (reaktans değerlerinin eşitlenmesi) devrede tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu da hat empedansının yani omik direncinin küçük olmasından dolayı yüksek akım değerinin geçmesi demektir.

Hattaki kapasitif yükün yaklaşık tamamını reaktif güç telafi edici amacıyla kullanılan kondansatörler oluşturur.

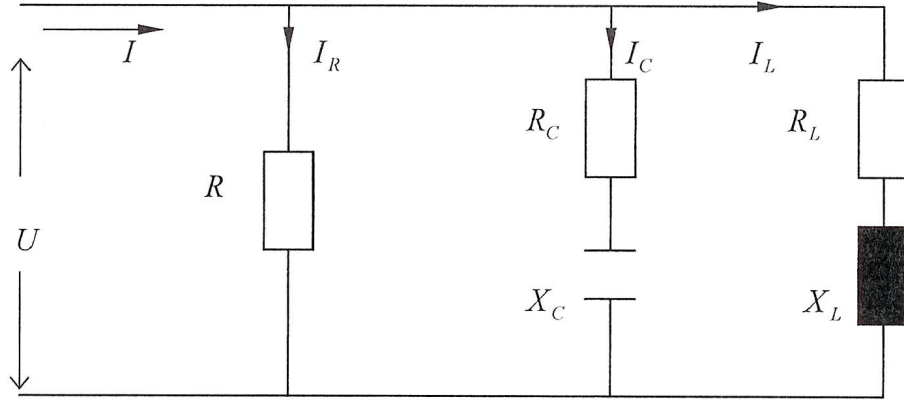
Tesise uygulanan gerilimin sinüsoidal olması durumunda yani gerilimin 50 Hz temel frekansa sahip olması durumunda, bir rezonans söz konusu olmaktadır. Çünkü telafi etmek için gerekli kapasitif yük hesabı bu temel frekans durumuna göre yapılır ve rezonansın meydana gelmemesine dikkat edilir.

Harmonikli bir gerilimin tesise uygulanması halinde ise rezonans oluşturacak harmonik frekansları oluşabilir. Yüksek harmonik frekans değerlerinde rezonansın meydana gelmesi tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Frekansla kapasitif direnç değerinin ters orantılı olarak değişmesi sebebiyle, yüksek harmonik değerlerinde şebekeden yüksek kapasitif akımlar çekilir, bu da şebekenin zorlanmasına ve arızalarına yol açar [4].

Söz konusu rezonans olayları, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki grup altında incelenebilir.

### 5.1.1. Paralel rezonans

Paralel rezonans durumunu izleyebileceğimiz devre Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. R, L, C paralel rezonans devresi [3]

Rezonans durumunu inceleyebileceğimiz bu tür devrelerle şebekenin çeşitli yerlerinde karşılaşılabılır. Örneğin ayırık telafi edici uygulandığı transformatör veya motorun endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansı arasında rezonans oluşabilir. Bunlara paralel bağlı R değerini de bobinin demir kayıpları ile kondansatörün di elektrik kayıpları teşkil eder. Bobin ve kondansatöre seri bağlı dirençler ise bobinin sargı direnci ile kondansatörün iç direncidir ve bu değerler ihmal edilebilir [3].

Şekildeki devrenin kol akımlarını yazacak olursak;

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}}{R} \quad (5.1)$$

$$\vec{I}_L = \frac{\vec{U}}{jX_L} = -j \frac{\vec{U}}{X_L} \quad (5.2)$$

$$\vec{I}_C = \frac{\vec{U}}{-jX_C} = j \frac{\vec{U}}{X_C} \quad (5.3)$$

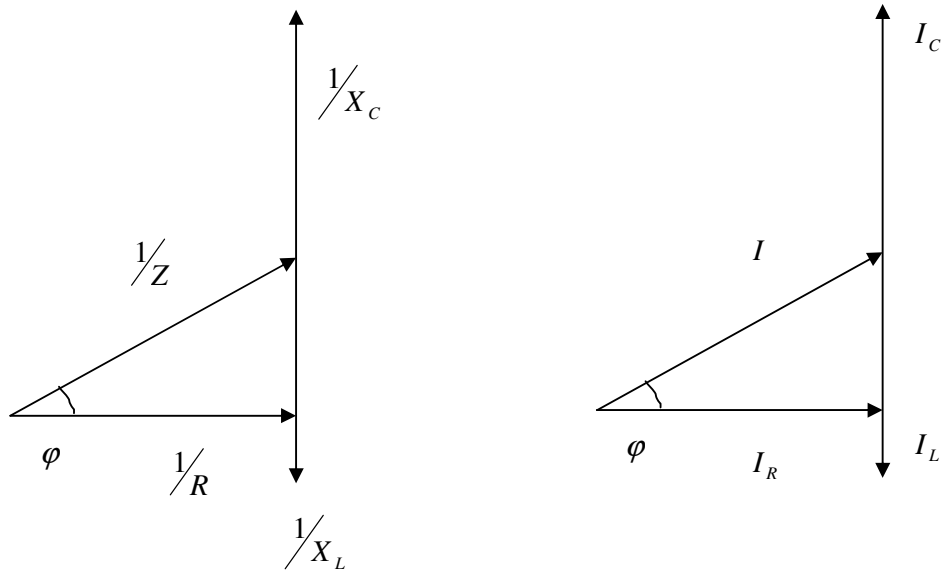
olur. Toplam devre akımı ise;

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C = \vec{U} \left[ \frac{1}{R} + j \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) \right] \quad (5.4)$$

olur. Bu formülden de görüldüğü gibi devrenin toplam empedans değeri;

$$\vec{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)} \quad (5.5)$$

olur. Şekil 5.1'de verilen ve formülleri çıkarılan devrenin fazör diyagramları Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2a'da empedans diyagramı, Şekil 5.2b'de ise şebekeden çekilen akımın fazör diyagramı gösterilmektedir. Devrede  $\frac{1}{X_C} > \frac{1}{X_L}$  kabul edildiği için devre kapasitif özellik göstermiştir [3].



Şekil 5.2.a) Paralel rezonans devresinin empedans diyagramı

b) Paralel rezonans devresinin akım diyagramı [8]

Rezonans durumunda  $I_C = I_L$  olacağından;

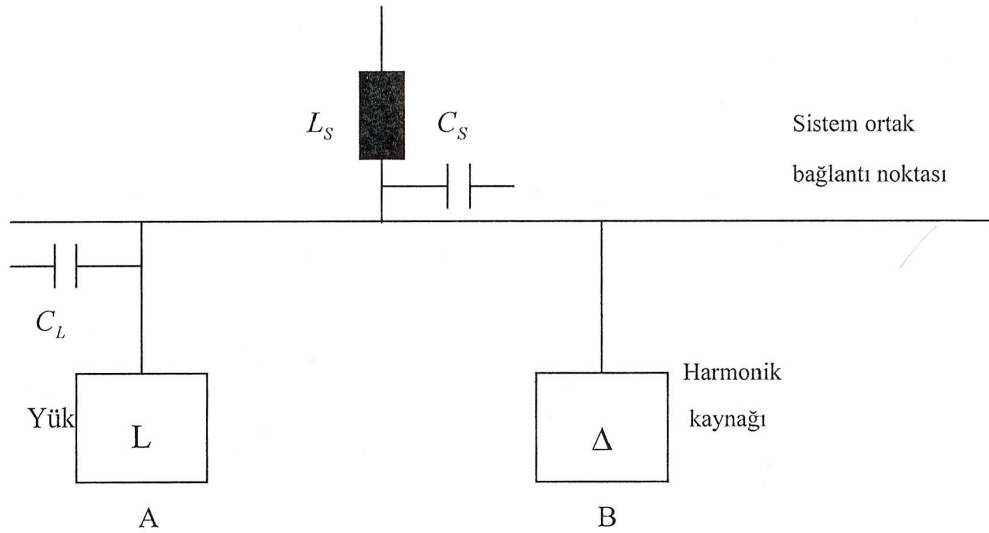
$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L} \Rightarrow 2\pi f_r C = \frac{1}{2\pi f_r L} \quad (5.6)$$

olur. Buradan rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.7)$$

olur. Bu rezonans frekansı, kapasitif ve endüktif kol akımlarının saf kapasitif ve saf endüktif akımlar olduğu kabulüyle bulunduğu için, seri devrenin rezonans formülüyle uyum sağlamıştır [4].

Uygulamada en çok karşılaşılan paralel rezonans devresi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekansının birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçları arasındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör zarar görebilir. Bu, endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır .



Şekil 5.3. Ortak bağlantı barasında paralel rezonansın oluşum [11]

Şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilirse rezonans frekansı;

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (5.8)$$

yazılabilir. Burada;

$f$  : temel frekans

$f_r$  : rezonans frekansın

$S_s$  : şebekenin kısa devre gücü

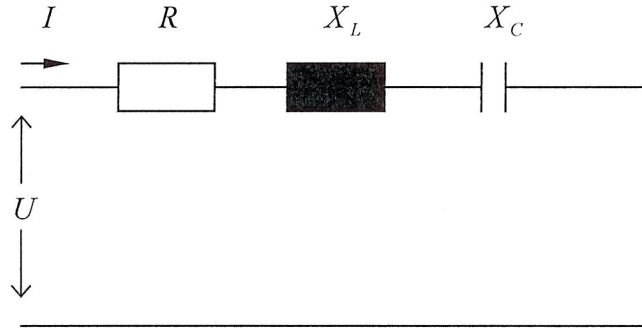
$S_c$  : kapasitenin nominal gücü

göstermektedir.

Şekil 5.3'te B tüketicisi bir harmonik kaynağını göstermektedir. Rezonans koşulu; sistem endüktansı ( $L_s$ ), sistem kapasitesi ( $C_s$ ) ile yükün kapasitesi ( $C_L$ ) değerlerine bağlıdır. Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilimi ile birlikte, baraya bağlı her tüketici yük ve kaynakların harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genel olarak, baradan enerji sistemine akan akım küçük ancak harmonik akım değeri yüksek ise, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Eğer baraya bağlı yükler harmonik akımları çekiyor ve bu durum barada harmonik gerilimleri oluşmasına neden oluyorsa, rezonansın sistemin endüktansı ( $L_s$ ) ve yük kapasitesi ( $C_L$ ) arasında oluşacağı söylenebilir [16].

### 5.1.2. Seri rezonans

Seri rezonans R, L, C elemanlarının birbirine seri bağlı olduğu sistemlerde görülmektedir. Bu durum Şekil 5.4'de basit olarak ifade edilmiştir.



Şekil 5.4. R, L, C seri rezonans devresi [3]

Böyle bir rezonans durumu; aynı şebekeyi besleyen iki transformatörün bulunduğu bir sistemde, telafi edici amacıyla kullanılan kondansatörün kapasitif reaktansı ile hattın ve transformatörlerin endüktif reaktansları arasında söz konusu olabilir.

Şekildeki omik yükü; hatta, transformatörün sargılarında ve kondansatörlerde ısı şeklinde açığa çıkan kayıplar oluşturur [3].

Şekildeki elemanlar üzerindeki gerilim düşümleri;

$$\vec{U}_R = \vec{I}R \quad (5.9)$$

$$\vec{U}_X = \vec{I}jX_L \quad (5.10)$$

$$\vec{U}_C = -\vec{I}jX_C \quad (5.11)$$

dir. Toplam devre gerilimi ise;

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{U}_C \quad (5.12)$$

$$\vec{U} = \vec{I}\vec{Z} \quad (5.13)$$

olur. Devre empedansı;



$$\vec{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (5.14)$$

dir. Rezonans durumunda;

$$X_L = X_C \Rightarrow 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (5.15)$$

dir. Buradan rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.16)$$

olur. Devre akımı;

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{\vec{U}}{R + j(X_L - X_C)} \quad (5.17)$$

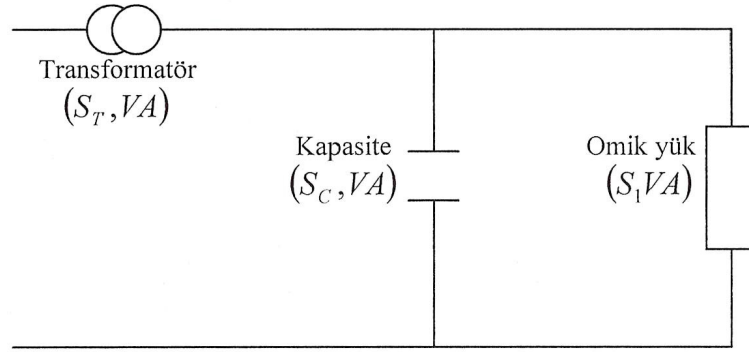
dir. Rezonans durumunda bu akım;

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}}{R} \quad (5.18)$$

olur.  $R \ll R + j(X_L - X_C)$  olduğundan rezonans durumunda devreden geçen akım değerinde artış olacaktır. Kuvvetli akım tesislerinde, omik direnç değerinin endüktif reaktans değerine göre hayli küçük olması nedeni ile; rezonans durumundaki bu akım artışı daha da büyük olacaktır. Harmonik akımındaki bu artış kompleks dalga akımının biçimini belirli bir oranda bozacaktır. Bu durumda da kondansatör ve endüktör uçlarında oluşan gerilimler, bu elemanlara zarar verecek şekilde artacaktır [3].

Kuvvetli akım tesislerinde seri rezonans olayı genelde 150-700 Hz arasında meydana gelir. Bu da 3. ila 15. harmonikler arasında rezonansın oluşması demektir.

Uygulamada karşılaşılan bir seri rezonans devresi Şekil 5.5'te verilmiştir [16].



Şekil 5.5. Seri rezonans devresi [16]

Bu durumda seri rezonans koşulu ise;

$$f_s = f \sqrt{\frac{S_T}{S_C Z_T} - \frac{S_1^2}{S_C^2}} \quad (5.19)$$

dir. Burada;

$f_s$  : seri rezonans frekans

$S_T$  : transformatörün nominal gücü

$S_C$  : sistemdeki kapasitenin gücü

$Z_T$  : transformatörün p.u (per-unit) empedansı

$S_1$  : omik yükün gücünü göstermektedir.

Seri rezonans, rezonans frekansı ile uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar, böylece harmonik akımlarda bir büyüme söz konusu değildir. Ancak harmonik akımları şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir:

a) Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler var ise, önemli ölçüde parazitler oluşabilir.

b) Rezonans kolundaki harmonik akımların yoğunluğu nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir [16].

c) Rezonansların oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Harmonik rezonansının etkisi sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatlerinde ve tatil günlerinde daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça, akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar [16].

## 5.2. Harmonik Standartları

IEEE (International Electrical Electronics Engineers) tarafından getirilen sınırlamalar hem akım hem de gerilim harmoniklerini kapsamaları nedeniyle daha etkin ve sınırlayıcı olmaktadır. Ayrıca IEEE sınırlamasında yüklere tek tek değil, toplu olarak sınırlama getirilmektedir. IEEE-519 standardında, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim bozulumu, müşteriler içinse doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamalar getirilmiştir [26].

Üretici firmanın sorumluluğunda olan gerilim harmonik bozulum değeri, IEEE tarafından aşağıdaki şekilde sınırlandırılmıştır. Burada her bir harmonik için ve toplamda harmonik bozulumu için ayrı ayrı iki sınırlama verilmiştir [12].

Tablo 5.1. IEEE gerilim için harmonik distorsiyon sınırları

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THB Vn (%)
Vn<69 kV	3	5
69<Vn<161 kV	1.5	2.5
Vn>16 kV	1	1.5

Akım harmoniklerinin telafi edici kullanıcının sorumluluğundadır. Aşağıda uluslararası IEEE kuruluşunun, izin verdiği maksimum THB değerleri verilmiştir. Tabloda ise sistemin devre akımını,  $I_1$  temel bileşeni ve n harmonik mertebesini göstermektedir.

Tablo 5.2. IEEE 519 tek harmonik akım sınırları  $I_n/I_1$  (%)

<b>V<sub>n</sub> &lt; 69 kV</b>						
<b>I<sub>n</sub>/I<sub>1</sub></b>	<b>n &lt; 11</b>	<b>11 ≤ n &lt; 17</b>	<b>17 ≤ n &lt; 23</b>	<b>23 ≤ n &lt; 35</b>	<b>n ≤ 35</b>	<b>THB</b>
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
<b>69 &lt; V<sub>n</sub> &lt; 161 Kv</b>						
<20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
<b>V<sub>n</sub> &gt; 161 Kv</b>						
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3	1.5	1.15	0.5	0.22	4

### 5.3. Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmoniklerin elektrik sistemine zararlı etkileri ilk bölümde belirtilmişti. Bu harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarımda yapılacak değişiklikler yeterli olmayacaktır. Harmonik akımların telafi edici için, şebekeden çekilmesini engelleyecek düzeneklerin kurulması zorunluluğu vardır[7].

Harmonik filtrelerin amacı, bir ya da daha fazla frekanstaki akım ve gerilim harmoniklerinin etkisini azaltmak veya sıfıra indirmek olarak açıklanabilir. Genelde sanayide karşılaşılan telafi edici yöntemi, etkin harmoniklerin yok edilmesi ve diğer küçük değerli harmoniklerin azaltılmasıdır. Filtre dizaynı aşamasında, işletmenin teknik olarak geniş bir biçimde analiz edilmesi gerekmektedir.

Filtreler işlevleri bakımından ikiye ayrılır:

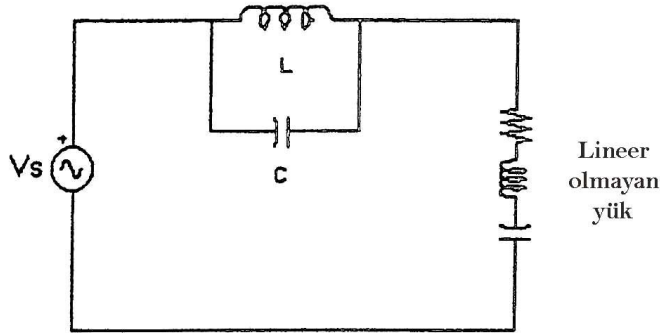
1. Pasif Filtreler
2. Aktif Filtreler

### 5.3.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki harmonikleri yok eden direnç, endüktans ve kapasite gibi pasif elemanlardan oluşmuş filtrelerdir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre uygulanması gerekmektedir.

#### 5.3.1.1. Seri pasif filtre

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımların akması engellenebilir. Sadece belli frekanstaki bileşenin telafi edici edilmesi için bu yöntem kullanılır. Seri filtreler ayarlandıkları frekansa yüksek empedans, temel harmoniğe ise düşük empedans gösterir. Seri pasif filtrelerde rezonans durumu gözlemlenmemesine rağmen, tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılma zorunlulukları vardır[15].

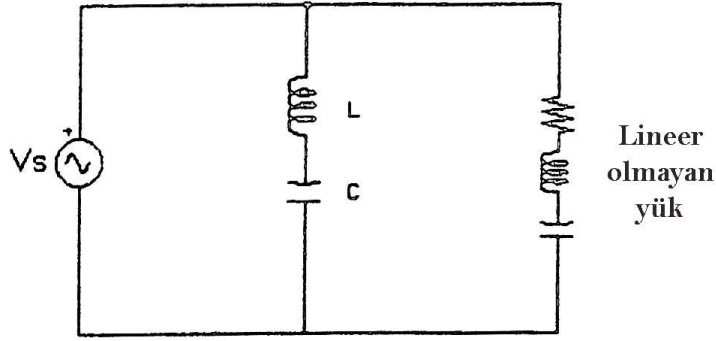


Şekil 5.6. Seri pasif filtre

### 5.3.1.2. Paralel pasif filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları, düşük empedanslı bir paralel devre üzerinden toprağa aktarılarak, sistem içinde dolaşımı paralel pasif filtrelerle önlenir.

Maliyet olarak bakıldığında, paralel filtreler seri filtrelere nazaran daha ucuzdur. Paralel filtreler harmonik akımlarına düşük empedans gösterirler. Temel frekansta ise reaktif güç üretebildiklerinden yaygın kullanım alanı bulmuşlardır[15].



Şekil 5.7. Paralel pasif filtre

Fakat bunun yanında paralel filtreler güç sistemiyle rezonansa geçebilirler. Filtre bileşenleri, şebeke empedansı ile etkileşime girerek, işletme için çok zararlı olan seri-paralel rezonans durumunun ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle paralel pasif filtrenin dizaynından önce ayrıntılı bir teknik analiz yapma zorunluluğu vardır. Ayrıca işletmede yapılacak her değişim çok iyi kontrol edilmelidir. Her yeni eklemede rezonans frekansı tekrar hesaplanmalı ve filtre elemanı değerleri güncellenmelidir.

### 5.3.2. Aktif filtreler

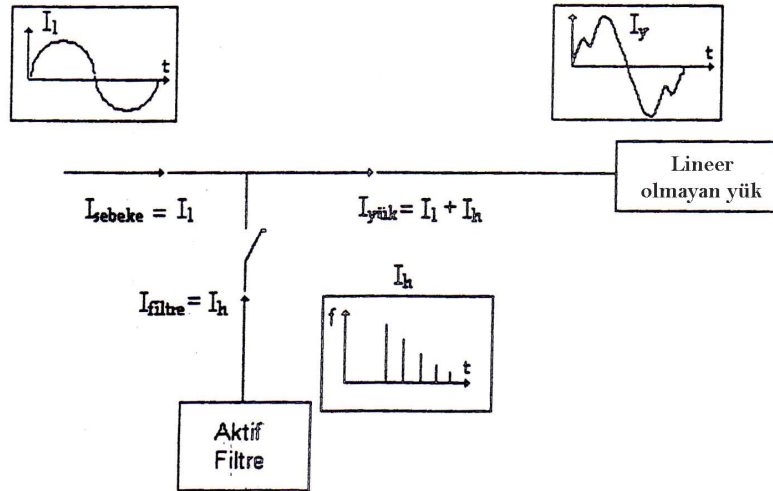
Aktif filtreler harmoniklerin tümünden kaldırılması için gerçekleştirilen devrelerdir. 1980 yılından beri, pratik olarak uygulanan aktif filtreler, ileri güç elektroniği temellerine dayalıdır. Pasif filtrelere nazaran çok daha pahalı olan aktif filtreler, geniş düşünüldüğünde tüketiciye birçok yarar sağlar. Filtre kullanımına karar verirken, geniş bir istatistik hesap yapılarak, ona göre filtre yöntemi belirlenmelidir[15].

PF'lerle yapılan harmonik telafi edici için filtre tasarımı, işletmenin konfigürasyonu değiştiğinde geçersiz olur ve yeni tasarım gerektirir. Aktif filtrede ise bu durum yoktur ve oluşan her harmonik için filtreleme işlemi yapılır. Ayrıca PF'lerin şebekeye uyumlu hale getirilmesi gayet zordur. Aktif filtreler ise sisteme kolayca entegre edilebilirler.

Aktif filtreler PAF ve SAF olarak iki gruba ayrılır. PAF şebekeden çekilen akım harmoniklerinin telafi edici için sisteme paralel bağlanır. SAF ise şebeke geriliminin telafi edici için sisteme faz trafolarıyla seri bağlanır. Alçak ve orta gerilim sistemlerinde, akım harmoniklerinin etkileri, gerilim harmoniklerine nazaran daha tehlikeli olduğu için yapılan araştırmalar PAF üzerinde yoğunlaşmıştır. PAF ve SAF'lerin beraber kullanıldığı uygulamalar ise, maliyet ve karmaşık kontrol sistemleri nedeniyle tercih edilmezler.

Yükün ihtiyacı olan harmonikli akım bileşenlerini oluşturan PAF'ler, yükün ihtiyacı olan temel harmonik bileşen dışındaki harmonik akım bileşenlerini karşılayarak, şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesini sağlar.

Aşağıda PAF'nin işlevini gösteren diyagram bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Aktif filtre ile harmonik akım telafi edici

### 5.3.3. Örnek ve Mat-Lab Grafikleri

#### ÖRNEK:

6-darbeli bir konverterin akımı,

$$i(\omega t) = 20 \cdot \sin \omega t + 3,7 \cdot \sin 5\omega t + 2,4 \cdot \sin 7\omega t + 1,3 \cdot \sin 11\omega t + 0,7 \cdot \sin 13\omega t \quad [\text{A}]$$

Olduğuna göre aktif filtrenin akımı ne olmalıdır?

#### ÇÖZÜM:

$I_s = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H$  eşitliğindeki gibi nonsinüsoidal yük akımından temel bileşen akımının çıkarılması ile aktif filtre akımı belirlenebilir.

$$I_H = I_s - I_1$$

$$i_H = i_s - i_1 = i - i_1$$

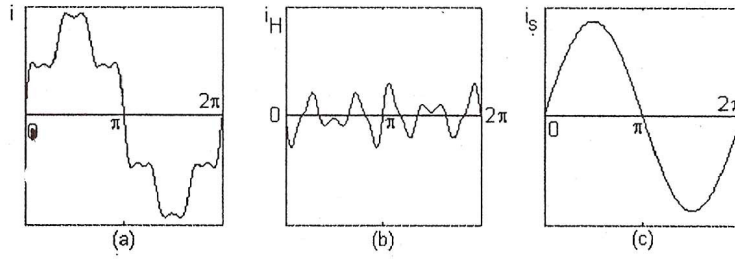
$$= -3,7 \cdot \sin 5\omega t - 2,4 \cdot \sin 7\omega t - 1,3 \cdot \sin 11\omega t - 0,7 \sin 13\omega t \quad [\text{A}]$$

olarak elde edilebilir. Böylece şebekeden çekilecek akım

$$i_s = i_1 + i_H = 20 \cdot \sin \omega t \quad [\text{A}]$$

olup, tamamen sinüsoidal değişime sahip olacaktır. Şekil 5.9'da konverterin akımı (Şekil 5.9a), aktif filtre akımı (Şekil 5.9b) ile aktif filtre kullanımı sonucu şebeke akımı (Şekil 5.9c) görülmektedir.





Şekil 5.9. Akım dalga şekilleri

### Mat-Lab uygulama dosyası

```
clear
```

```
clc
```

Dereceden radyana dönüştürme

```
d=pi/180;
```

```
wt=0 : 360;
```

6-darbeli bir konverterin akımı

```
i=20*sin (wt*d)+3.7*sin (5*wt*d)+2.4*sin (7*wt*d) . . .
+1.3*sin (11*wt*d)+0.7*sin (13*wt*d);
```

Filtre akımı

```
iH= -3.7*sin (5*wt*d)-2.4*sin (7*wt*d) -1.3*sin (11*wt*d) . . .
-0.7*sin (13*wt*d);
```

Şebekeden çekilecek akım

```
iS= i+iH;
```

6-darbeli bir konverter akımının dalga şeklinin çizimi

```
subplot (1, 3, 1)
```

```
plot (wt, i)
```

```
hold on
```

Filtre akımının dalga şeklinin çizimi

```
subplot (1, 3, 2)
```

plot (wt, iH)

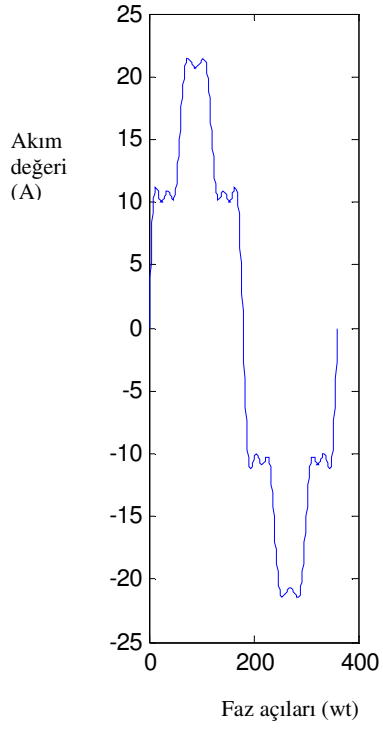
hold on

Şebekeden çekilen akımın dalga şeklinin çizimi

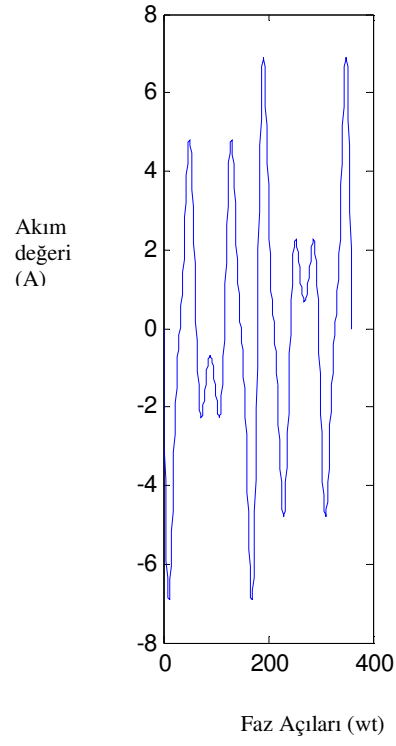
subplot (1, 3, 3)

plot (wt, iS)

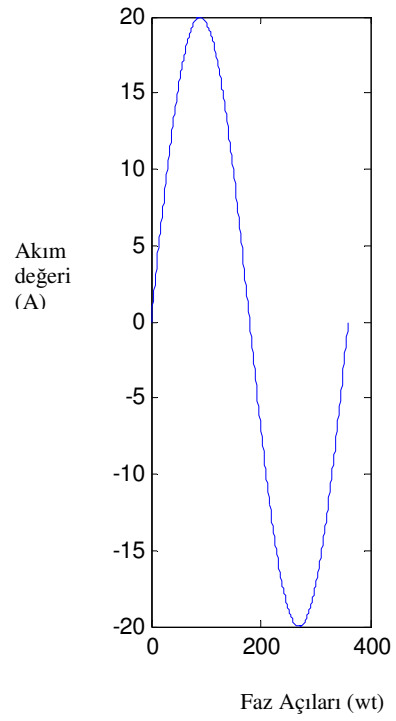
hold on



Şekil 5.10. 6-darbeli bir konverterin akımı



Şekil 5.11. Filtre akımı

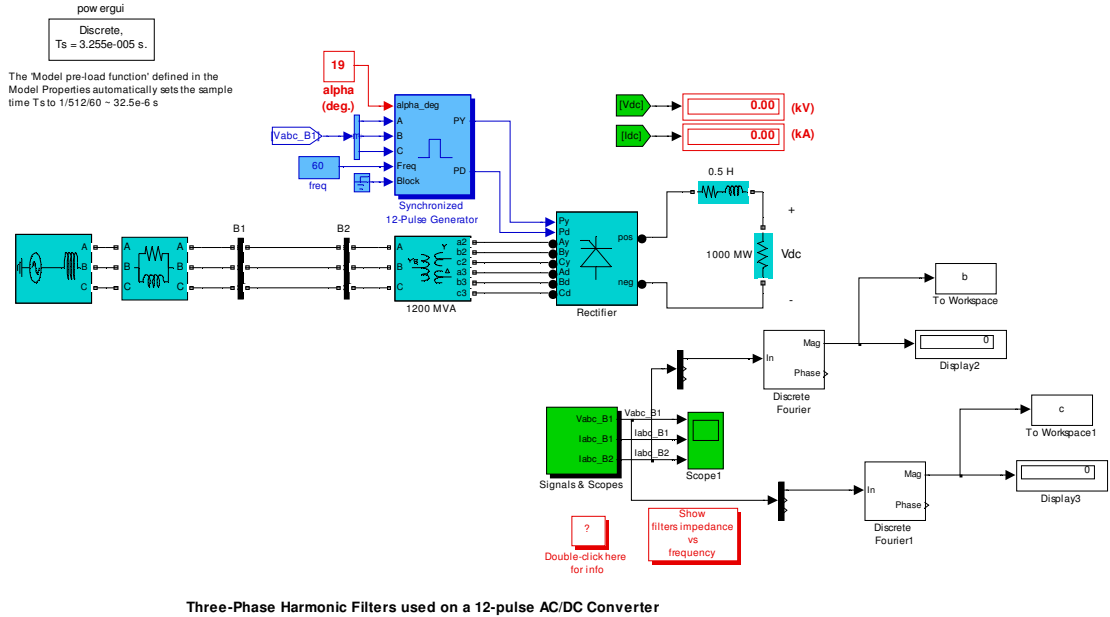


Şekil 5.12. Şebekeden çekilecek akım

## 5.4. Mat-lab Simülasyonu ve Grafikleri

Şeklimizde kaynağımız doğrultuculu ve doğrultucular yapısı gereği harmonik üretir. Şeklimizde doğrultucuyu çalıştıran 12 darbeli jeneratörümüz bulunmaktadır. Jeneratörün ürettiği kare dalga tristör'ün giriş ucuna sinyal vererek tetikleme yapıyor. Anot'tan katot'a doğru olması için gerilim yeterli değildir. Bundan dolayı tristör'ün giriş ucuna tetikleme gerekmektedir. Doğrultucuya bağlı olan devremiz DC gerilim iç hat direnci sağlıyor. Devremizin ilk halinin grafikleri inceledik, daha sonra  $\cos \phi$  değerini düzeltmek için kondansatör koyarak modelledik, bundan sonra dengesiz akımların oluştuğu üçüncü harmoniği engellemek için üçüncü harmoniğe pasif filtre bağladık, devremizde 12 darbeli jeneratörümüz var  $N=pk \pm 1$  formülünde  $k=1$  değerinde 11 ve 13 harmonik mertebelerinde filtre gerekmektedir bizde bu değerler için pasif filtre koyup modellememizi tamamladık.

### 5.4.1. Harmonik üreten devre simülasyonu



Şekil 5.13. 3 fazlı devre şeması

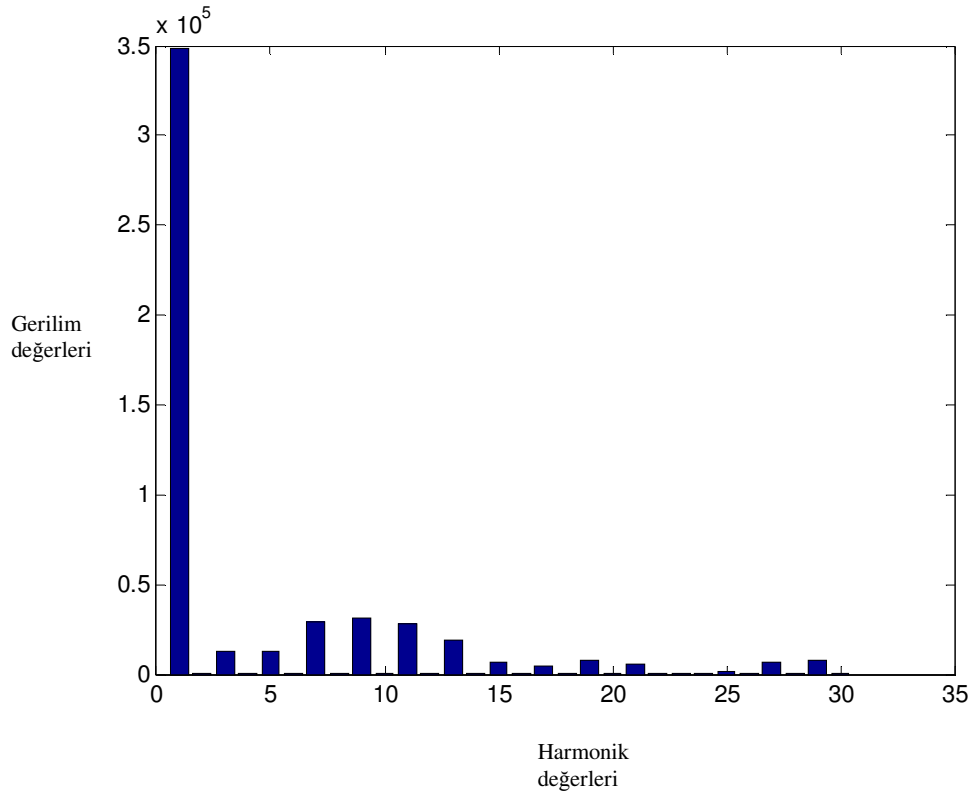
Aşağıdaki mat-lab uygulamamızda 1'den 30'uncu harmoniğe kadar simulink çağırıyoruz. Harmonikler için bir kere çağırıyoruz, her seferinde o harmoniğe ait

genlik değerlerini topluyoruz. En sonunda bu sistem için bar şeklinde grafik oluştururuz. Burdaki  $fc(a)=b$  fonksiyonumuz gerilim için grafik değerini,  $fv(a)=c$  fonksiyonumuz akım için grafik değerini verir.

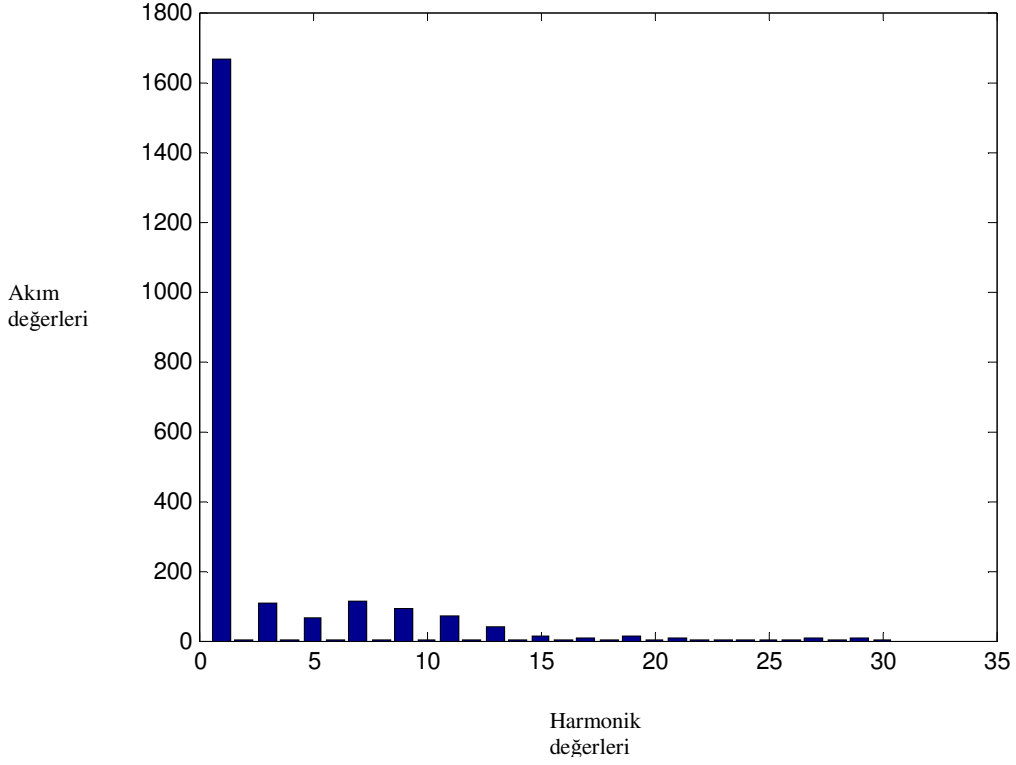
#### Mat-Lab uygulaması

```
Ts=3.2552e-005;  
for a=1:1:30  
    sim('power_harmonicfilter');  
    fc(a)=b;  
    fv(a)=c;  
end  
bar(fc);  
figure;  
bar(fv);
```

Ts= Örnekleme zamanı



Şekil 5.14. Filtresiz gerilim grafiği



Şekil 5.15. Filtresiz akım grafiği

$$I(\omega t) = I_{m_1} \sin \omega t + I_{m_3} \sin 3\omega t + I_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + I_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = U_{m_1} \sin \omega t + U_{m_3} \sin 3\omega t + U_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + U_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = (3,49 \times 10^5 \times \sin 120\pi) + (1,32 \times 10^4 \times \sin 360\pi) + (1,32 \times 10^4 \times \sin 600\pi) + (2,95 \times 10^4 \times \sin 840\pi) + (3,1 \times 10^4 \times \sin 1080\pi) + (2,85 \times 10^4 \times \sin 1320\pi) + (1,93 \times 10^4 \times \sin 1560\pi) + (7,07 \times 10^3 \times \sin 1800\pi) = 142435,9 \text{ Volt}$$

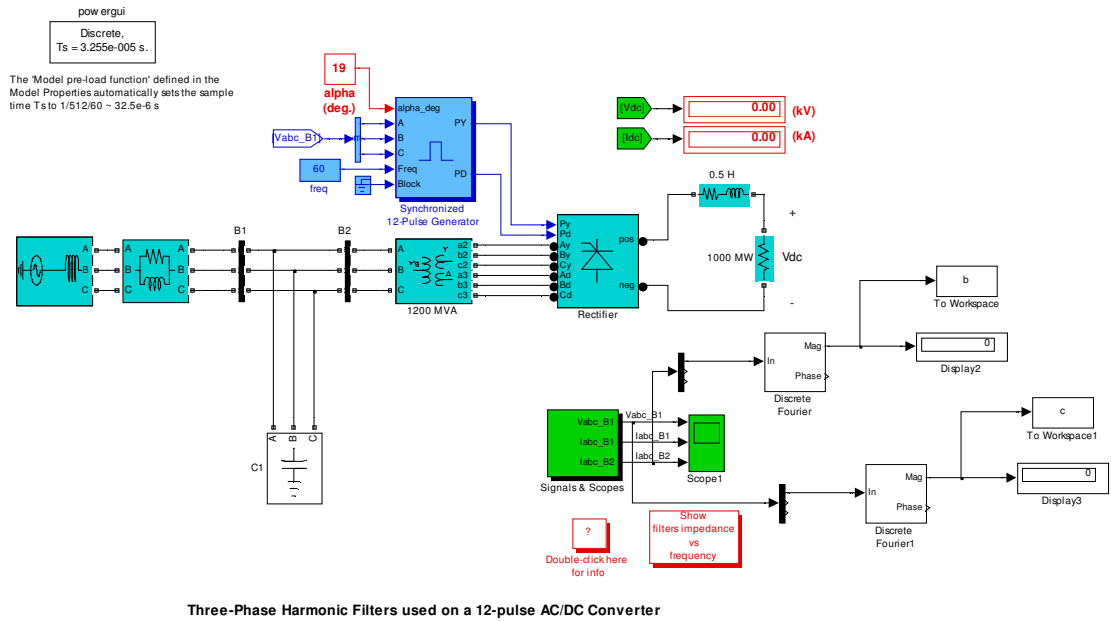
$$I(\omega t) = (1,66 \times 10^3 \times \sin 120\pi) + (107 \times \sin 360\pi) + (68,2 \times \sin 600\pi) + (111 \times \sin 840\pi) + (91,8 \times \sin 1080\pi) + (69,3 \times \sin 1320\pi) + (39,7 \times \sin 1560\pi) + (12,7 \times \sin 1800\pi) = 188,4343 \text{ Amper}$$

$$I_{m_1} = 1. \text{ Harmoniğin akım değeri}$$

Devrede yapılan ölçümler neticesinde; en yüksek akım değerleri 3. ve 7. harmoniklerde olduğunu tespit ettik. 3. harmonik dengesiz akımlardan meydana

gelmektedir. Gerilim değerlerinde 9., 11., 13. harmonikler diğerlerine göre daha yüksektirler. Sistemde öncelikle  $\cos\phi$ 'yi düzeltmek için kompanze etmeye karar verdik.

### 5.4.2. Kompanzasyonlu devre simülasyonu



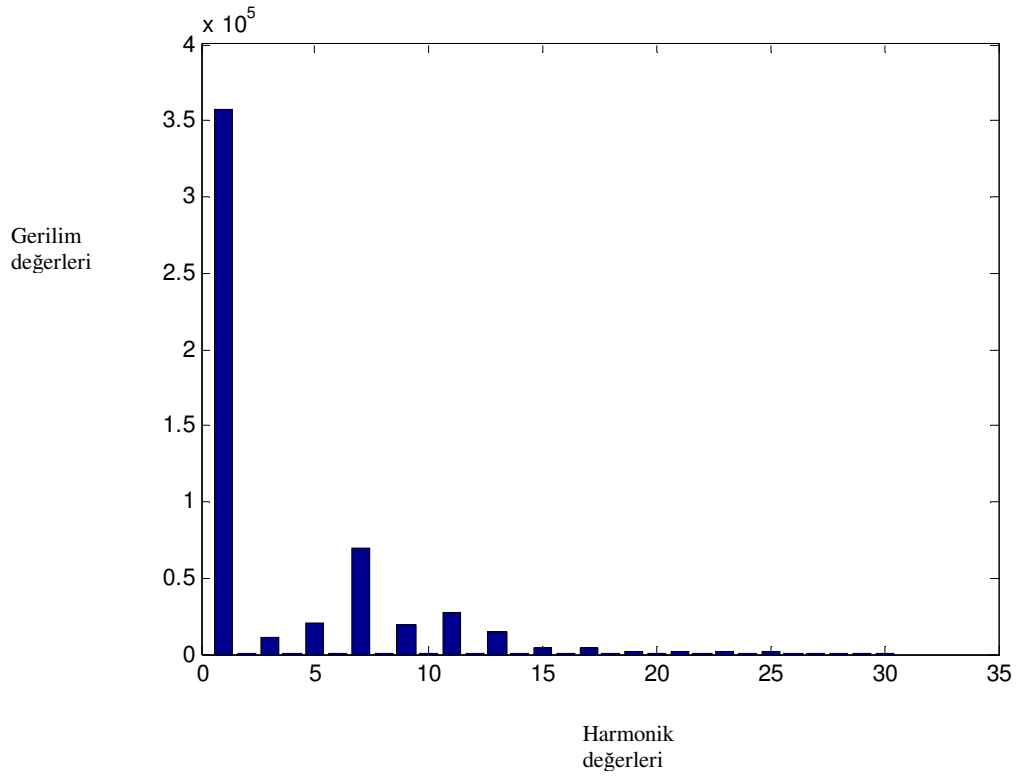
Şekil 5.16. 3 fazlı kompanzasyonlu devre şeması

Aşağıdaki mat-lab uygulamamızda 1'den 30'uncu harmoniğe kadar simulink çağırıyoruz. Harmonikler için bir kere çağırıyoruz, her seferinde o harmoniğe ait genlik değerlerini topluyoruz. En sonunda bu sistem için bar şeklinde grafik oluşturuyoruz. Burdaki  $f_c(a)=b$  fonksiyonumuz gerilim için grafik değerini,  $f_v(a)=c$  fonksiyonumuz akım için grafik değerini verir.

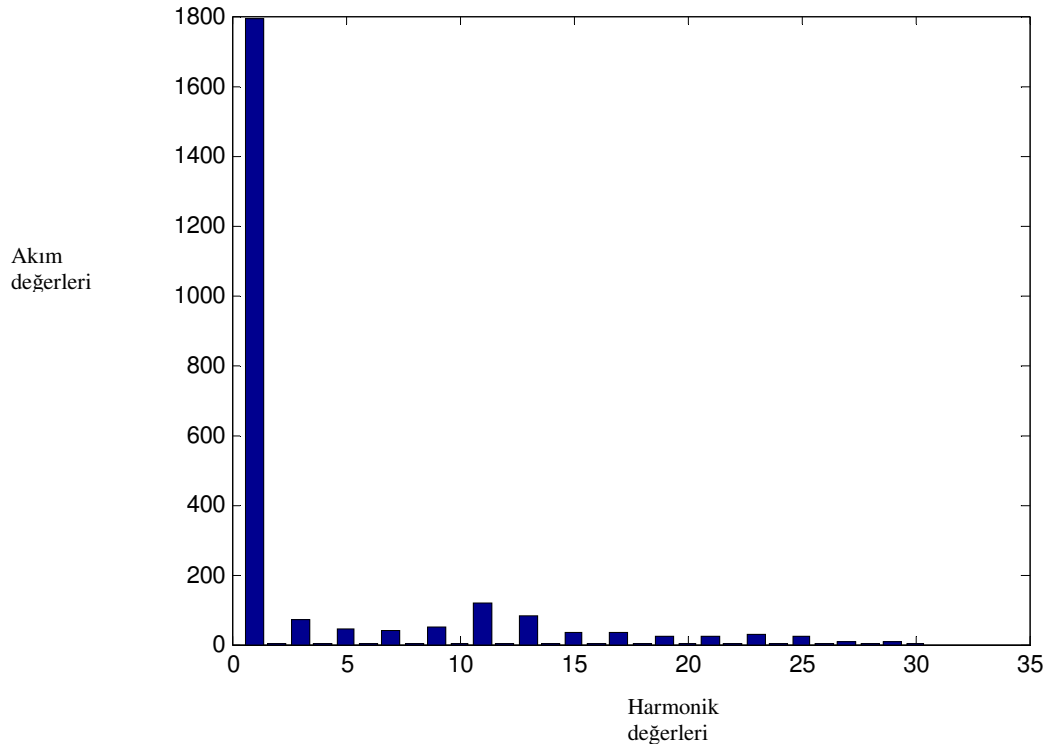
#### Mat-Lab uygulaması

```
Ts=3.2552e-005;
for a=1:1:30
    sim('power_harmonicfilter_kompanzasyon');
    fc(a)=b;
    fv(a)=c;
end

bar(fc);
figure;
bar(fv);
```



Şekil 5.17. Kompanzasyonlu gerilim grafiği



Şekil 5.18. Kompanzasyonlu akım grafiği



$$I(\omega t) = I_{m_1} \sin \omega t + I_{m_3} \sin 3\omega t + I_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + I_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = U_{m_1} \sin \omega t + U_{m_3} \sin 3\omega t + U_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + U_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

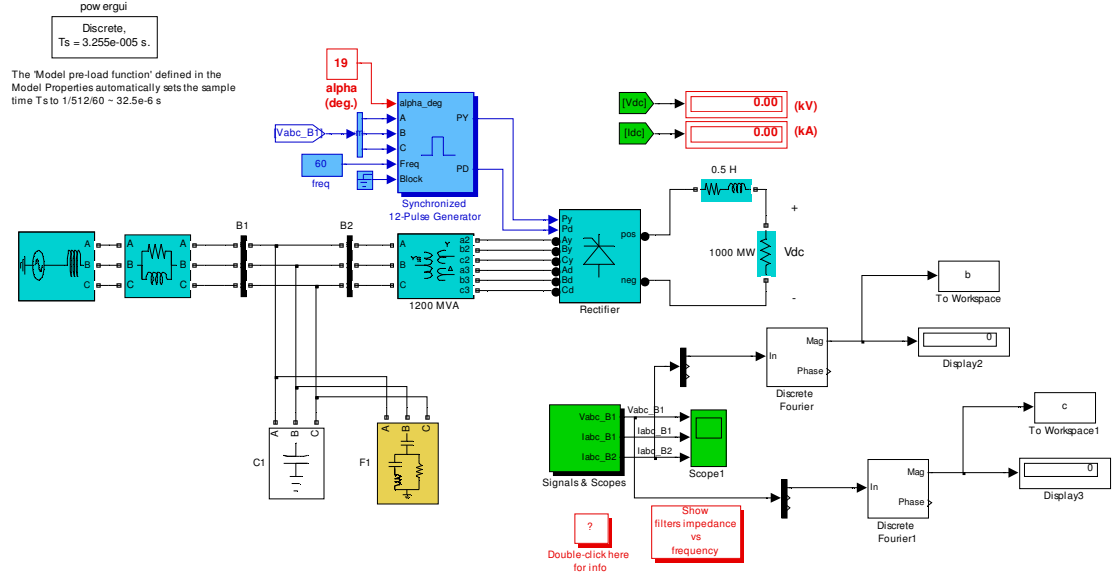
$$\begin{aligned} U(\omega t) = & (3,58 \times 10^5 \times \sin 120\pi) + (1,07 \times 10^4 \times \sin 360\pi) + (2,02 \times 10^4 \times \sin 600\pi) \\ & + (6,94 \times 10^4 \times \sin 840\pi) + (1,96 \times 10^4 \times \sin 1080\pi) + (2,8 \times 10^4 \times \sin 1320\pi) + \\ & (1,43 \times 10^4 \times \sin 1560\pi) + (4,61 \times 10^3 \times \sin 1800\pi) = 185532,77 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I(\omega t) = & (1,79 \times 10^3 \times \sin 120\pi) + (68,4 \times \sin 360\pi) + (45,1 \times \sin 600\pi) + (39,7 \times \sin 840\pi) + \\ & (48,3 \times \sin 1080\pi) + (117 \times \sin 1320\pi) + (82,2 \times \sin 1560\pi) + (33,4 \times \sin 1800\pi) = 645,06 \\ & \text{Amper} \end{aligned}$$

$$I_{m_1} = 1. \text{ Harmoniğin akım değeri}$$

Kompanzasyon sonucunda bazı harmoniklerde azalma, bazılarında artış olmuştur. Gerilim grafiğinde 5. ve 7. harmoniklerde artış vardır. Akımda ise 11., 13 ve 15. harmoniklerde artış vardır. Bunun sonucunda pasif filtre uygulamaya karar verdik. 3. harmonik değeri yüksek bir değere sahip olduğu ve dengesiz akımlar 3. harmonikte çok olduğu için bu dengesiz akımları engellemek için pasif filtre yerleştirdik.

### 5.4.3. 3. harmonik filtreli, kompanzasyonlu devre simülasyonu



Three-Phase Harmonic Filters used on a 12-pulse AC/DC Converter

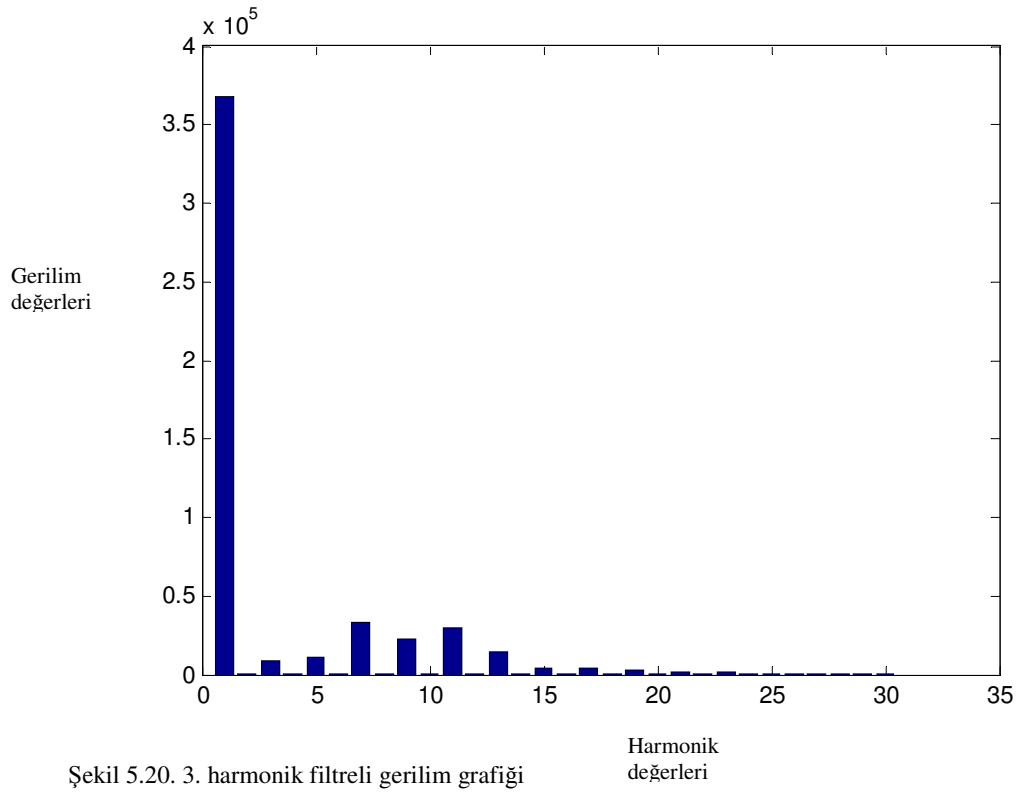
Şekil 5.19. 3 fazlı 3. harmonik filtreli ve kompanzasyonlu devre

Aşağıdaki mat-lab uygulamamızda 1'den 30'uncu harmoniğe kadar simulink çağırıyoruz. Harmonikler için bir kere çağırıyoruz, her seferinde o harmoniğe ait genlik değerlerini topluyoruz. En sonunda bu sistem için bar şeklinde grafik oluştururuz. Buradaki  $fc(a)=b$  fonksiyonumuz gerilim için grafik değerini,  $fv(a)=c$  fonksiyonumuz akım için grafik değerini verir.

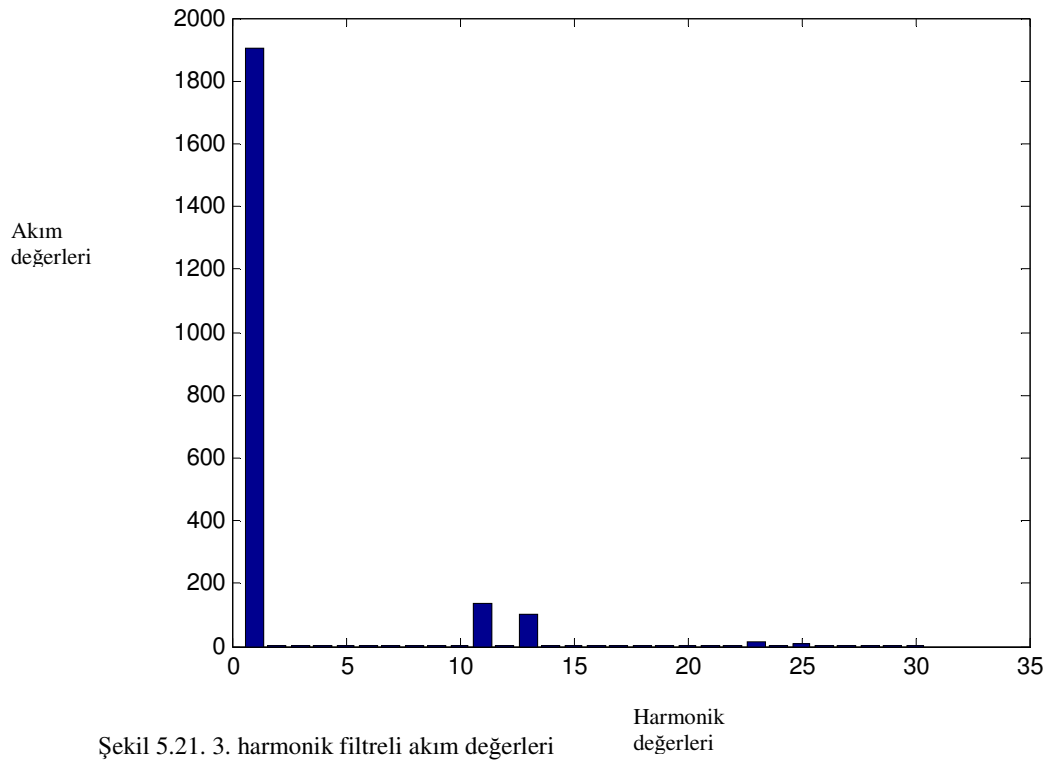
#### Mat-Lab uygulaması

```
Ts=3.2552e-005;
for a=1:1:30
    sim('power_harmonicfilter_kompanzasyon3');
    fc(a)=b;
    fv(a)=c;
end

bar(fc);
figure;
bar(fv);
```



Şekil 5.20. 3. harmonik filtrelı gerilim grafiği



Şekil 5.21. 3. harmonik filtrelı akım değeri

$$I(\omega t) = I_{m_1} \sin \omega t + I_{m_3} \sin 3\omega t + I_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + I_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = U_{m_1} \sin \omega t + U_{m_3} \sin 3\omega t + U_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + U_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = (3,68 \times 10^3 \times \sin 120\pi) + (9,2 \times 10^3 \times \sin 360\pi) + (1,16 \times 10^4 \times \sin 600\pi) \\ + (3,34 \times 10^4 \times \sin 840\pi) + (2,29 \times 10^4 \times \sin 1080\pi) + (2,96 \times 10^4 \times \sin 1320\pi) + \\ (1,48 \times 10^4 \times \sin 1560\pi) + (4,66 \times 10^3 \times \sin 1800\pi) = 148152,268 \text{ Volt}$$

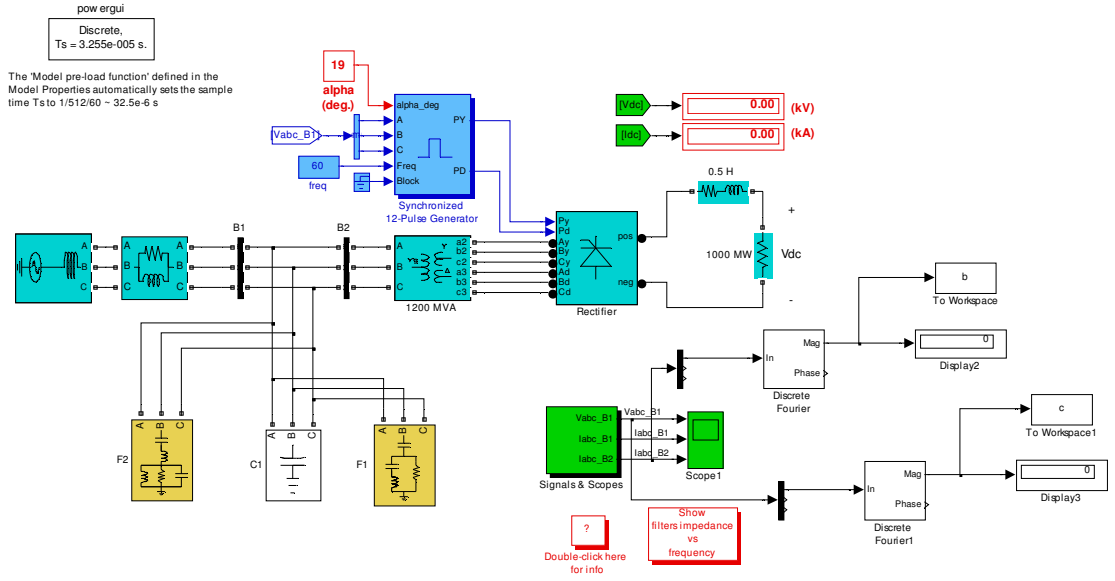
$$I(\omega t) = (1,84 \times 10^3 \times \sin 120\pi) + (64,7 \times \sin 360\pi) + (43,1 \times \sin 600\pi) + (48,7 \times \sin 840\pi) + \\ (53,6 \times \sin 1080\pi) + (118 \times \sin 1320\pi) + (82,1 \times \sin 1560\pi) + (32,8 \times \sin 1800\pi) = 598,32$$

Amper

$I_{m_1} = 1$ . Harmoniğin akım değeri

3. harmonik uygulandıktan sonra gerilim ve harmonik değerlerinde azalma sağlanmıştır. Devrede 12 darbeli jeneratör doğrultucuyu çalıştırır.  $N = pk \pm 1$  formülünde N harmonik mertebesini belirtir. Bu formülde  $k=1$  aldığımız zaman 11 ve 13. harmonik mertebelerinde filtreleme yapmamız gerektiğini görürüz. Bundan sonraki aşamada 11 ve 13. harmonik mertebelerine pasif filtre koyduk.

### 5.4.4. 3. , 11. , 13. harmonikleri filtreli, kompanzasyonlu devre simülasyonu



Three-Phase Harmonic Filters used on a 12-pulse AC/DC Converter

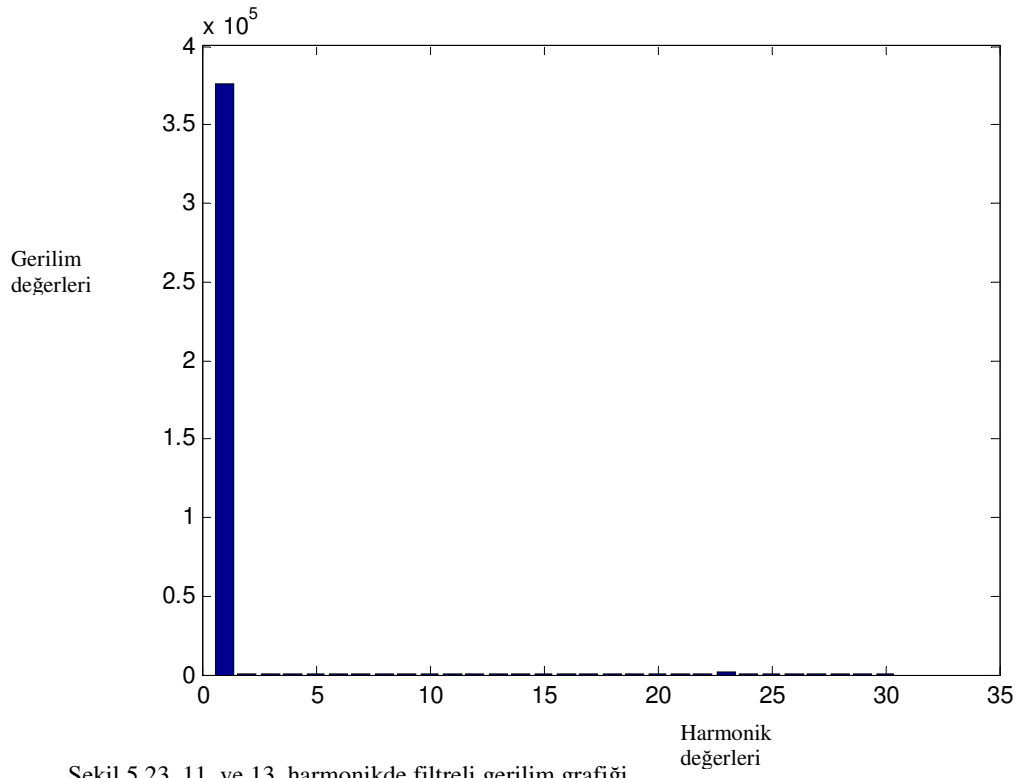
Şekil 5.22. 3 fazlı 3.,11.,13. harmonikler filtreli ve kompanzasyonlu devre

Aşağıdaki mat-lab uygulamamızda 1'den 30'uncu harmoniğe kadar simulink çağırıyoruz. Harmonikler için bir kere çağırıyoruz, her seferinde o harmoniğe ait genlik değerlerini topluyoruz. En sonunda bu sistem için bar şeklinde grafik oluştururuz. Buradaki  $fc(a)=b$  fonksiyonumuz gerilim için grafik değerini,  $fv(a)=c$  fonksiyonumuz akım için grafik değerini verir.

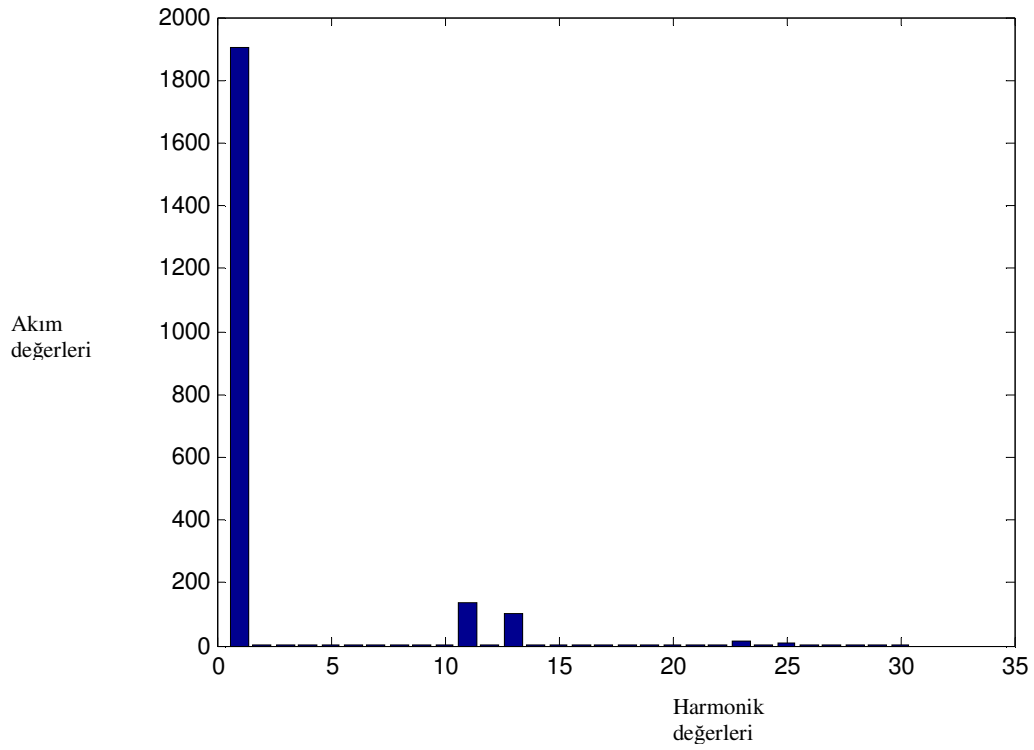
Mat-Lab uygulaması

```
Ts=3.2552e-005;
for a=1:1:30
    sim('power_harmonicfilter_kompanzasyon11');
    fc(a)=b;
    fv(a)=c;
end
```

```
bar(fc);
figure;
bar(fv);
```



Şekil 5.23. 11. ve 13. harmonikte filtreli gerilim grafiği



Şekil 5.24. 11. ve 13. harmonikte filtreli akım grafiği

$$I(\omega t) = I_{m_1} \sin \omega t + I_{m_3} 3 \sin \omega t + I_{m_5} \sin 5\omega t + \dots + I_{m_{15}} \sin 15\omega t =$$

$$U(\omega t) = U_{m_1} \sin \omega t + U_{m_3} 3 \sin \omega t + U_{m_5} 5 \sin \omega t + \dots + U_{m_{15}} 15 \sin \omega t =$$

$$U(\omega t) = (3,76 \times 10^5 \times \sin 120\pi) + (421 \times \sin 360\pi) + (865 \times \sin 600\pi) \\ + (398 \times \sin 840\pi) + (141 \times \sin 1080\pi) + (1,07 \times 10^3 \times \sin 1320\pi) + \\ (582 \times \sin 1560\pi) + (102 \times \sin 1800\pi) = 110967,67 \text{ Volt}$$

$$I(\omega t) = (1,9 \times 10^3 \times \sin 120\pi) + (2,53 \times \sin 360\pi) + (1,97 \times \sin 600\pi) + (2,57 \times \sin 840\pi) + \\ (2,17 \times \sin 1080\pi) + (137 \times \sin 1320\pi) + (99,6 \times \sin 1560\pi) + (1,17 \times \sin 1800\pi) = 479,6036 \\ \text{Amper}$$

$$I_{m_1} = 1. \text{ Harmoniğin akım değeri}$$

11 ve 13. harmonikteki kompanzasyon ve pasif filtrelemelerden sonra devredeki akım ve gerilim değerlerinde düşüş olmuştur. Bu aşamalardan sonra istenilmeyen harmonik akım ve gerilim değerlerinde istenilen başarı yakalanmıştır.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

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. Harmonikler süzülmedikleri takdirde, şebeke ve önemli cihazlar üzerinde zararlara, gerilim düşümü ve kayıpların artmasına, motorlarda ve çeşitli makinelerde 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 göz önüne alınırsa önemli olan bu konunun ülkemizde ne derece ihmal edildiği gözükmemektedir. Bunun nedenleri bilgi eksikliği, şu an için ülkemizde herhangi bir sınırlama ve zorunluluk olmaması ve maliyetler gelmektedir.

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki önerilere yer verilebilir:



1. Elektrik güç sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü doğrusal olmayan yük bulunduğu göz önüne 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 doğrusal olmayan yüklerin etkilerinin azaltılması gerekir.

2. Gelecekte güç sistemlerinde harmonik problemlerin daha da artacağı göz önüne alınarak, nonlinear yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı doğrusal olmayan yük bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece üç ve üçün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca mümkün olduğu kadar tüketicilerin konverter kullanımında ekonomik kriterler de dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren darbe sayısı yüksek olan konverterler tercih edilmelidir.

3. Tüketicileri dengeli gerilim ile beslemek için gerekli önlemler alınmalıdır. Faz akımların 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 kaynaklanılın 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.

## KAYNAKLAR

- [1] ARRILLAGE, J, and WATSON, N.R, 2001. Power System Quality Assessment, John Wiley&Sons, England.
- [2] ARRILLAGA, J, SMITH, B.C, WATSON, N.R and WOOD, A.R, 1997. Power System Harmonic Analysis, John Wiley&Sons, Norwich.
- [3] DUGAN, R.C, MCGRANAGHAN, M.F. and BEATY, H.W, 1996. Elektrical Power System Quality, McGraw-Hill
- [4] BATEMAN, A, and STEPHENS, I.P, 2002. The DSP Handbook, Pearson Education, England
- [5] 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
- [6] 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
- [7] İNAN, A, 1999. Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerin Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [8] KORUREK, M, ve YAZGAN, E, Tıp Elektroniği, İTÜ, İstanbul.
- [9] MARTZOLOF, F, and THOMAS, G, 1988. Power Quality Site Surveys, IEEE Trans on Industrial Appl.
- [10] LANDER, C.W, 1981. Power Electronics, McGraw Hill
- [11] MCPHERSON, G, and LARAMONE, R.D, 1990. An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley&Sons, Singapoure

- [12] AKAGI, H, 1994. Trends in Active Power Line Conditioners, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume:9, No:3
- [13] TEY, L.H and SO, P.L, 2002. DSP-Controlled Active Filters for System Harmonics Compensation, PowerCon, Volume:1, pp 453-458
- [14] PAICE, D.A, 1996. Power Electronics Converters Harmonics, First Edition
- [15] VAN, W.J 1993. Power Quality, Power Electronics and Control, The European Power Electronics Association
- [16] RAO, S, 1996. EVH\_AC and HVDC Transmission Engineering and Practice, Khanna Publishers, Delhi
- [17] WAGNER, V.E. and IEEE Task Force, 1993. Effects of Harmonics on Equipment, IEEE Trans. On Power Delivery, PWRD-8(2)
- [18] USTA, Ö, BAYRAK M, ve REDFERN M.A, 2002. A New Digital Relay for Generator Protection Against Asymmetrical Faults, IEEE Transaction on Power Delivery
- [19] ERICKSON,R:W, 2000. Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts
- [20] MOHAN, N, Undeland, T:M, and Robbins, W.p1995 Power Converters, Applications and Design Secon Edition
- [21] BÖLAT, V, 2003. Üç Fazlı AA Güç Dağıtım Sistemlerinin Enerji Kalite Problemlerinin Çözümünde Paralel Aktif Filtre Temelli Uygulanmalar, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [22] SEZER Murat, 2005. Üç fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Filtre, Yüksek Lisans Tezi
- [23] ŞAHİN Önder, 2005. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi, Yüksek Lisans Tezi
- [24] BATEMAN, A, and STEPHENS, I.P, 2002. The DSP Handbook, Pearson Education, England
- [25] [www.emo.org.tr/genel/ara.php](http://www.emo.org.tr/genel/ara.php)
- [26] [www.elis.com.tr/teknikbilgi/harmonik\\_filtreleme.asp](http://www.elis.com.tr/teknikbilgi/harmonik_filtreleme.asp)
- [27] [www.bilesim.com.tr/tr/index.nsf?if=/tr/letbaryayincilik](http://www.bilesim.com.tr/tr/index.nsf?if=/tr/letbaryayincilik)

## ÖZGEÇMİŞ

FERİDUN BAŞMAN 26/07/1979 yılında İstanbul'da doğdu. İlkokulu Özel Ortadoğu Kolejinde okudu, Ortaokulu Özel Anabilim Kolejinde okudu, lisede İntaş Lisesinden mezun oldu. 2001 yılında Yıldız Teknik Elektrik Mühendisliğinden mezun oldu. 09/2002 yılında Sakarya üniversitesinde Yüksek Elektrik Mühendisliği yüksek lisansına başladı. Elektrik taahhüt piyasasında satın alma, uygulama ve teklif konusunda yaklaşık 5 yıllık tecrübesi vardır. Ayrıca Amerika Birleşik Devletlerinde saha uygulaması olarak 8 ay görev yapmıştır. Şu an özel bir şirkette Teklif ve Satın Alma Mühendisi olarak çalışıyor.