

## ÖZET

### GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE FİLTRELEMELERİN İNCELENMESİ

FİLİZ, Caner

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Prof. Dr. İlhan Kocaarslan

Ağustos 2006, 146 sayfa

Elektrik enerjisine duyulan talebin sürekli artması ve ilerleyen teknoloji ile sistemdeki yükler çeşitlilik kazanmıştır. Sistemdeki bu yüklenmenin her zaman lineer olması istenir. Ancak son yıllarda ilerleyen yarı iletken teknolojisinin büyük etkisi ile sistemdeki nonlinear yüklerde artma görülmüştür.

Nonlinear yükler, akım - gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Sistemdeki bu nonlinear yükler sistemde harmonik akımları ve harmonik gerilimleri meydana getirirler. Oluşan bu harmonikler, lineer yüklerde bile lineerliğin bozulmasına sebep olabilir.

Harmonik oluşumuna sebep olan başlıca yükler; güç elektroniği elemanları, transformatörler, döner makineler, doğru akım ile enerji nakli, ark fırınları, statik VAR generatörleri ve kesintisiz güç kaynaklarıdır.

Harmonikler, sistemdeki elemanlarda; ek kayıplara, ısınmalara, yalıtımlarının zorlanmasına, bazı durumlarda zarar görmelerine ve devre dışı kalmalarına yol açarlar.

Harmoniklerin, sistem üzerinde meydana getirdikleri bu önemli etkilerden dolayı oluşmadan veya oluşuktan sonra giderilmesi gerekmektedir. Harmonik üreten kaynaklar imal edilirken harmonik üretmesinin engellenmesi en önemli giderilme yöntemlerinden birisidir. Diğer bir önemli yöntem ise harmonik filtreler yoluyla harmoniklerin süzülmesidir.

Bu yapılan çalışmada; fourier analizi kullanılarak harmoniklerin matematiksel analizi, harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin sistem üzerine etkileri ve harmonik standartları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Harmoniklerin giderilmesi konusuna ise ana hatları ile değinilerek filtrelerden bahsedilmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda varılan sonuçlar ve alınması gereken önlemler için önerilere de çalışmada yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Harmonikler, Harmonik Filtreleme

## **ABSTRACT**

### AN INVESTIGATION OF HARMONIC EFFECTS AND ITS FILTERING METHODS OF POWER SYSTEMS

FİLİZ, Caner

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical & Electronic, M. Sc. Thesis

Supervisor : Prof. Dr. İlhan Kocaarslan

August 2006, 146 pages

Continuously increasing demand for power and the technological improvements in this field have made the load in power systems vary. It is always preferred loads to be linear, but since the solid state technology has been improving in recent years, nonlinear loads have got the tendency to rise.

Nonlinear loads don't have linear current – voltage characteristics producing harmonics which may cause the linearity to be disturbed even some cases of linear loads.

Main harmonic loads are power electronic elements, transformers, rotating machines, energy transformers by direct current, arc furnaces, static VAR generators and continuous power sources which in turn

cause problems like energy loss, overheating, disturbances and defects in isolation and furthermore disconnection from the circuit.

Owing to these adverse effects of harmonic loads on system performance their occurrence must be eliminated. The most vital mean of elimination is to prevent the harmonics during manufacturing. The important one is said to be the filtration of harmonics by harmonic filters.

In this study, harmonic load producing sources, mathematical. Analysis of harmonic loads using fourier analysis method, their adversary effects on systems performance were investigated in detail. Besides the means of preventing the harmonic load occurrence were explained basically.

On the other hand this study covers the result of this investigation and the suggestion for preventive actions to be taken for harmonics not to occur.

**Key Words:** Harmonics, Harmonics filtering

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN a yapmış olduğu önerilerden ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

## SİMGELER DİZİNİ

$t$	Bağımsız Değişken
$A_0$ :	sabit terim
$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ :	Harmoniklerin Genlikleri
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$	Harmoniklerin Faz Açılıarı.
$w$	Açısal Frekans.
$Z_n$	$n$ . Harmoniğin Empedans Genliği
$\phi_n$	$n$ . Harmonik Akımın Faz Açısı
$n$	Harmonik Mertebesi
$p$	Çeviricinin Darbe Sayısı
$k$	Pozitif Bir Tamsayı (1, 2, 3,.....)
$E_{m1}$	Temel Dalga Geriliminin Max. Değeri
$E_{mn}$	$n$ . Harmonik Geriliminin Max. Değeri
$\alpha_1$	Temel Dalga Geriliminin Faz Farkı
$\alpha_n$	$n$ . Harmonik Geriliminin Faz Farkı
$I_{m1}$	Temel Dalga Akımının Max. Değeri
$I_{mn}$ :	$n$ . Harmonik Akımının Max. Değeri

$\beta_1$	Temel Dalga Akımının Faz Farkı
$\beta_n$	n. Harmonik Akımının Faz Farkı
$f$	Temel Frekans
$f_r$	Rezonans Frekansı
$S_S$	Şebekenin Görünür Kısa Devre Gücü
$S_C$	Kapasitenin Nominal Gücü
$f_S$	Seri Rezonans Frekansı
$S_T$	Transformatörün Nominal Gücü
$S_C$	Sistemdeki Kapasitenin Gücü
$Z_T$	Transformatörün (pu) Empedansı
$S_1$	Omik Yükün Gücü
$(\tan \delta)$	Kayıp Faktörü
$R_0$	Doğru Akım Direnci
$R$	Deri Etkisi Dahil Direnç
$R_n$	n. Harmonik Frekansındaki Direnç
$I_n$	n. Harmonik Akımının Efektif Değeri
$P_{Fe}$	Demir Kaybı
$C_m$	Makinenin Yapısı İle İlgili Bir Sabit
$\omega_n$	n. Harmonik İçin Açısal Frekans

$V_n$	$n$ . Harmoniğin Efektif Değeri
$B_x$	$B$ Alanının $x$ Eksen Bileşeni
$B_y$	$B$ Alanının $y$ Eksen Bileşeni
$\mu_0$	Havanın Geçirgenliği
$I$	Akımın Efektif Değeri
$h$	İletkenin Toprakdan Yüksekliği
$x$	Mesafe
$d$	Toprağın İletkenliği İle Frekansın Bir Fonksiyonu
$E$	Elektrik Alan Şiddeti
$\rho$	Toprağın Özgöl Direnci
$I_t$	Toprağa Akan Akım
$x$	Toprak Geçiş Noktasına Olan Uzaklık
$M$	Farklı İşletme Periyodu Sayısı
$L$	Tesisteki Hat/Kablo Sayısı
$R_j$	$j$ . Hat Parçasının Omik Direnci
$I$	Sinüoidal Akımdan Arındırılmış Akımlar
$I_R, I_S, I_T$	Faz Akımları
$I_N$	Transformatörün Anma Akımı
$R_o$	Yıldız Noktası Direncinin Değeri
$i$	$T$ Dönemi Süresince Paranın Değeri
$T$	Zaman



$HD$	Hurda Değeri
$Thd$	Toplam Harmonik Distorsiyonu
$I_f$	Harmonik Akımların Efektif Değeri
$Z_{fn}$	Filtrenin $n$ . Harmonik Frekansındaki Empedansı
$I_y$	Yük Akımı
$Z_{yük}$	Yük Empedansı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

1.1.	Temel dalga ve bileşke dalga. ....	3
1.2.	Grafik metotla fourier analizinin yapılması .....	12
1.3.	Analiz edilen dalga .....	16
1.4.	Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü .....	23
1.5.	Dijital harmonik analizörü .....	24
1.6.	Bozulmuş Dalganın şekli .....	29
2.1.	Demir çekirdeğin mıknatıslanma eğrisi ( $B = f(H)$ eğrisi) .....	38
2.2.	Transformatör mıknatıslanma akımı .....	39
2.3.	Yuvarlak ve düz kutuplu generatörlerde emk şekilleri .....	44
2.4.	Turbo generatörlerde hava aralığında indüklenen emk şekilleri. ....	46
2.5.	Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri .....	53
2.6.	Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için dalga ve harmonikler....	55
2.7.	Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması .....	56
2.8.	Bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması .....	61
2.9.	Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması .....	64

3.1.	Harmonik akımlarının akış yönü .....	89
3.2.	Çift harmoniklerin temel dalga gerilimine etkisi .....	92
3.3.	Tek harmoniklerin temel dalga gerilimine etkisi. ....	93
3.4.	$R, L, C$ paralel rezonans devresi .....	96
3.5.	Paralel rezonans devresinin empedans ve akım diyagramı.....	98
3.6.	Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşum .....	99
3.7.	$R, L, C$ seri rezonans devresi.....	100
3.8.	Seri rezonans devresi .....	102
3.9.	Harmonikleri toprağa geçiren bir filtre devresi .....	107
3.10.	$\omega$ açısal frekans fonksiyonu olarak $X_L, X_C$ reaktansları ve $Z'$ nin değişimi.....	108
3.11.	Harmonikli bir şebeke ve paralel bağlı filtre .....	109
3.12.	Harmonik süzücü filtre devreleri tasarımının prensip şeması .....	110
3.13.	Filtre düzeneği .....	113
3.14.	Bant geçiren filtre (tek ayarlı filtre).....	116
3.15.	İki tek ayarlı filtre ve çift ayarlı süzgeç .....	117
3.16.	Yüksek geçiren sönümlü filtreler.....	118
3.17.	Paralel Aktif filtrenin prensibi şeması.....	119
3.18.	Seri Aktif filtrenin prensibi şeması.....	120
3.19.	Aktif Güç filtresinin blok şeması.....	121
3.20.	Dönüştürücü Bloğunun prensip şeması.....	122
3.21.	Gerilim beslemeli üç fazlı PWM dönüştürücünün ana akım devresi..	123
3.22.	BJT'li Akım beslemeli dönüştürücünün ana akım devresi.....	124

3.23.	Histerezis metodunun prensip şeması.....	125
3.24.	Üçgen dalga metodunun prensip şeması.....	126
3.25.	$\alpha-\beta$ Dönüşümü.....	128
3.26.	a-b-c koordinatlarında $p-q$ teorisinin güç bileşenlerinin paralel aktif güç filtresi ile kompanzasyonu.....	129
3.27.	$p-q$ teorisi uygulanmış bir paralel aktif filtre için kontrol blok şeması.	130
3.28.	Sayısal örnek için.....	131
3.29.	Filtre devresi için filtre faktörü-frekans ilişkisi.....	132

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

1.1. $f(\alpha)$ değerleri .....	16
1.2. Temel Bileşen İçin Yapılan Hesaplamalar .....	17
1.3. 3. Harmonik İçin Yapılan Hesaplamalar .....	19
1.4. 5. Harmonik İçin Yapılan Hesaplamalar .....	21
1.5. İşveç SEF kuruluşunca izin verilen THD .....	32
1.6. IEEE' nin Amerika Birleşik Devletleri için belirlediği THD sınırları .....	32
1.7. AS 2279 standardına göre Avustralya harmonik sınırlamaları .....	33
1.8. Yeni Zelanda için harmonik sınırları .....	33
1.9. Finlandiya yönetmeliğine göre harmonik sınırları .....	34
1.10. İngiltere yönetmeliğine göre harmonik sınırları .....	34
2.1. Deney motorlarının yükte çalışması sırasında ölçü bobinlerinde indüklenen emk' in dalga biçiminin fourier analizi sonucunda elde edilen harmonik katsayıları .....	50
2.2. Ark fırınının ortalama harmonik değerleri .....	59
2.3. Temel değer in % olarak harmonik içerikleri .....	63
3.1. Nakit Akış Tablosu .....	85
3.2. Aktif Filtre ile Pasif Filtrenin karşılaştırılması .....	134

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
SİMGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
İÇİNDEKİLER .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Harmoniklerin Tanımı.....	1
1.2. Harmoniklerin Tarihçesi .....	4
1.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi .....	7
1.3.1. Fourier Analizi .....	7
1.3.2. Fourier Katsayılarının Analitik Yöntemle Bulunması.....	10
1.3.3. Fourier Katsayılarının Grafik Yöntemle Bulunması.....	12
1.3.4. Fourier Katsayılarının Ölçme Yöntemi ile Bulunması.....	23
1.4. Nonsinüoidal Büyüklükleri içeren Devrelerin incelenmesi.....	25
1.4.1. Sinüoidal Gerilim Beslemeli Nonlineer devreler.....	25
1.4.2. Nonsinüoidal Gerilim Beslemeli devreler.....	26
1.5. Harmonik Özellikler, Tanımlamalar ve Standartlar.....	28

2.	MATERYAL VE YÖNTEM .....	35
2.1.	Harmonik Üreten Kaynaklar .....	35
2.1.1.	Transformatörler.....	37
2.1.2.	Döner Makinalar.....	43
2.1.2.1.	Senkron Generatörler.....	43
2.1.2.2.	Asenkron Motorlar.....	47
2.1.3.	Güç Elektroniği Elemanları.....	52
2.1.4.	Doğru Akım ile Enerji Nakli.....	56
2.1.5.	Statik VAR Generatörleri.....	57
2.1.6.	Ark Fırınları.....	58
2.1.7.	Kesintisiz Güç Kaynakları.....	60
2.1.8.	Gaz Deşarj Aydınlatma.....	62
2.1.9.	Elektronik Balastlar.....	62
2.1.10.	Fotovoltaik Sistemler.....	63
3.	ARAŞTIRMA BULGULARI .....	65
3.1.	Harmoniklerin Etkileri.....	65
3.1.1.	Transformatörler Üzerine Etkileri.....	66
3.1.2.	Döner makinalar Üzerine Etkileri.....	67
3.1.3.	İletim Sistemleri Üzerine Etkileri .....	68
3.1.4.	Kondansatör Grupları Üzerine Etkileri.....	69
3.1.5.	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi.....	71
3.1.6.	Harmoniklerin Reaktans Üzerindeki Etkisi.....	72
3.1.7.	Harmoniklerin Kayıplar Üzerindeki Etkisi.....	73
3.1.8.	Güç Elektroniği Elemanları Üzerine Etkileri.....	76

3.1.9. Koruyucu Sistemler (Röleler) Üzerine Etkileri.....	76
3.1.10. Küçük Güçlü Elektrik Tüketicileri Üzerindeki Etkileri .....	77
3.1.11. Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkisi.....	78
3.1.12. Harmoniklerin Manyetik Alanlar Üzerine Etkileri.....	79
3.1.13. Alçak Gerilim Tesislerinde Harmonik Kayıpları.....	80
3.1.14. Harmonik Kayıpların Enerji Maliyetine Etkisi.....	84
3.2. Harmoniklerin Belirlenmesi .....	86
3.3. Akım ve Gerilim Harmonikleri.....	88
3.3.1. Akım ve gerilim Harmonikleri Arasındaki ilişki.....	89
3.3.2. Akım ve gerilim Harmoniklerinin Ani Değeri.....	91
3.3.3. Akım ve gerilim Harmoniklerinin Efektif Değeri.....	93
3.4. Harmonik Sistemlerde Aktif Güç.....	94
3.5. Harmonik Sistemlerde Görünür Güç.....	95
3.6. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	95
3.6.1. Paralel Rezonans.....	96
3.6.2. Seri Rezonans.....	100
3.6.3. Seri Rezonansı Önleyici tedbirler.....	104
3.7. Harmoniklerin Giderilmesi.....	105
3.7.1. Harmonik Filtreleri.....	106
3.7.2. Filtre Tasarımı.....	111
3.7.2.1. Filtre Tasarım Kriterleri.....	111
3.7.2.2. Filtre Devrelerinin Hesaplanması.....	113
3.7.3. Filtre Çeşitleri.....	115
3.7.3.1. Pasif Filtreler).....	115



3.7.3.1.1. Bant Geçiren Filtreler (Tek Ayarlı Filtreler).....	115
3.7.3.1.2. Çift Ayarlı Filtreler.....	116
3.7.3.1.3. Otomatik Ayarlı Filtreler.....	116
3.7.3.1.4. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler.....	117
3.7.3.2. Aktif Filtreler.....	118
3.7.3.2.1. Paralel aktif Filtreler.....	119
3.7.3.2.2. Seri aktif Filtreler.....	119
3.7.3.2.3. Aktif Filtrenin yapısı.....	120
3.7.3.2.3.1. Dönüştürücü (PWM) bloğu.....	121
3.7.3.2.3.1.a. Gerilim beslemeli dönüştürücü.....	122
3.7.3.2.3.1.b. Akım beslemeli dönüştürücü.....	123
3.7.3.2.3.2. Akım kontrol devresi.....	124
3.7.3.2.3.2.a. Histerezis metodu.....	125
3.7.3.2.3.2.b. Üçgen dalga metodu.....	126
3.7.3.2.3.3. Harmonik belirleme ünitesi.....	126
3.7.4. Sayısal uygulama.....	130
3.7.5. Aktif ve pasif filtrelemelerin karşılaştırılması.....	134
4. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	135
4.1. Araştırmaya Genel Bakış .....	135
4.2. Harmonik Etkilerine karşı Alınabilecek Önlemler.....	140
4.3. Harmonik Etkileri En Aza İndirmek için Öneriler.....	142
4.4. Sonuç.....	143
KAYNAKLAR .....	144

## 1-GİRİŞ

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ucuz ve kaliteli bir hizmet tüketicilerine sunmaktır. Kalite kavramından maksat, sabit şebeke frekansında; sabit genlikli ve sinüsoidal biçimli uç gerilimidir. <sup>(1)</sup>

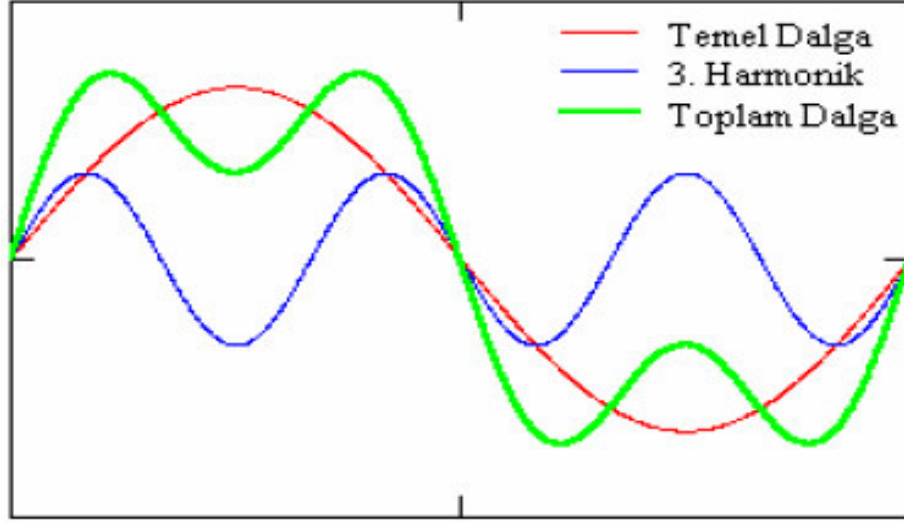
Ancak bu tür enerji pratikte bir takım zorluklarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüzoidal değişimden sapmalar olabilmektedir. Tam sinüsoidal'den sapma, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlikler (Nonlineerlik) gelir. <sup>(2)</sup>

### 1.1. Harmoniklerin Tanımı

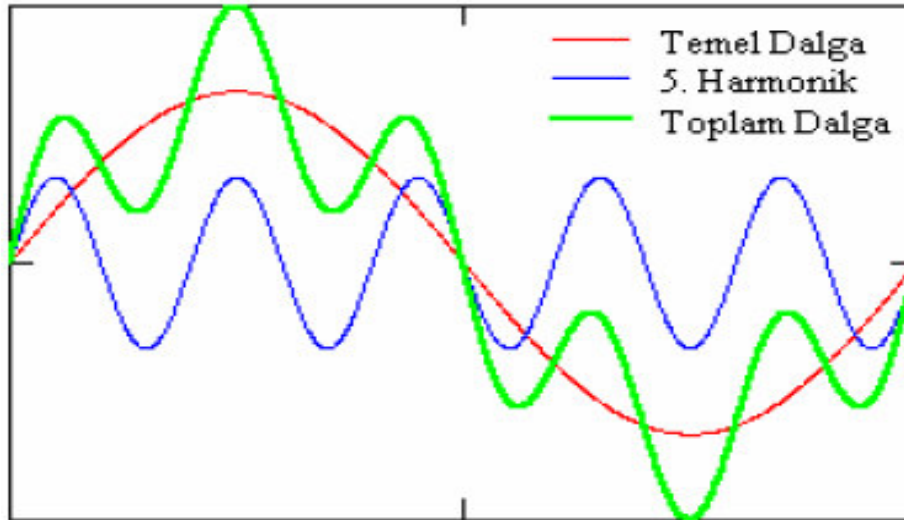
Güç sistemlerinin başlangıcından beri nonlinear elemanlar ve nonlinear yükler var olmuştur. Örneğin; transformatörler nominal çalışma koşullarının dışına çıktığında nonlinear şebeke elemanı olarak davranırlar. Nonlineerlik etkisi ve nonlinear eleman sayısı, harmonik üreten elemanların güç sistemine bağlanmasıyla hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarı iletken anahtarların gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanmasıdır. (D.C. iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, v.b.). <sup>(2)</sup>

Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı nonlinear yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte, frekans ve genliği farklı diğer

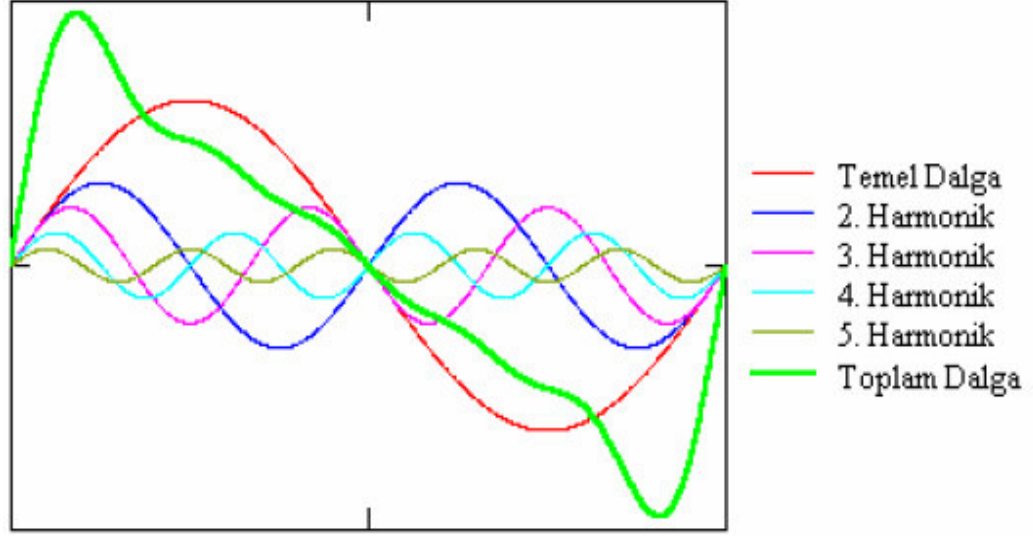
sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara "HARMONİK" adı verilir. Temel dalga ile 3., 5., harmonikler ve bunların bileşkesi olan bileşke örnrk bir dalga Şekil 1.1. de verilmiştir. <sup>(3)</sup>



(a)



(b)



(c)

**Şekil 1.1.** Temel dalga, 3., 5. harmonikler ile bunların bileşkesi olan bileşke dalga. a) 3. harmonik, b) 5. harmonik, c) Toplam Harmonik. <sup>(4)</sup>

Güç sistemlerindeki harmonikler, sistemi gün geçtikçe artan bir oranda etkilemekte, tesislerde güç kesintilerine ve zaman kaybına yol açmaktadırlar. Her ne kadar süzgeç (filtre) devreleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamışsa da; filtreleme tesislerinin, toplam maliyeti arttırması nedeniyle maliyet optimizasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. <sup>(3)</sup>

Sinüoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli akım çekmesi bu alıcının yapısı gereğidir. Yani; alıcı nominal çalışması sırasında harmonik meydana getirecek akım çekiyor demektir. Harmonik üreten bu alıcılardan başka, karakteristikleri itibariyle lineer oldukları halde harmonikli akımlara sebebiyet veren alıcılarda vardır. Bu

durum ise alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüoidal olmasından kaynaklanmaktadır. Alternatif akımın üretilmesi sırasında alternatörlerde yapılan gerekli iyileştirici önlemler yardımıyla elektrik enerjisi mümkün olduğunca sinüoidal' e yaklaştırılmaktadır. Fakat lineer bir alıcıya aynı şebekeye bağlı diğer nonlineer yükler tarafından etki edilmektedir. <sup>(3)</sup>

Uygulamada en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri ana bileşene göre çok küçük olduğundan özel haller dışında önemsenmezler. Daha çok 3., 5. ve 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaya çalışılır. Elektrikli aygıtlara en büyük zararı 5 kHz' den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir.

## **1.2. Harmoniklerin Tarihçesi**

Güç sistemlerindeki harmoniklerin araştırılması yeni bir konu olmayıp alternatif akımın ortaya çıktığı ilk günden itibaren güç mühendislerini ilgilendirmiştir. Transformatörlerin nonlineerliği, üretilen harmonikler ve Y/ $\Delta$  bağlamadaki 3. harmoniklerin oluşumu Clinker ve Curtis tarafından 1914' lü yıllarda araştırılmıştır. Bunun hemen arkasından transformatörlere ilişkin dalga şekilleri Steinmetz tarafından (1916-1917) verilmiş ve harmonik distorsiyonunun azaltılması için filtrelerin kullanılmasını önermiştir. Rissik' in 1935 yılında cıva buharlı konverterlerle ilgili distorsiyonu konu alan yayınları bulunmaktadır. <sup>(2)</sup>

II. Dünya Savaşı sonrası doğrultucuların kullanımı oldukça genişlemiştir. Günümüzde güç sistem mühendisleri ve tasarımcılar tarafından geniş bir şekilde kullanılmakta olan statik konverterlerin harmonik üretimi konusunda Read 1945' li yıllarda çalışmalarda bulunmuştur. <sup>(2)</sup>

Doğru akım iletım sistemlerinin detaylı incelenmesi ve bu sistemlerde kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücülerin her iki çalışma (evirici ve doğrultucu) için karakteristiği ilk kez Kimbark tarafından 1971 yılında verilmiştir. Doğru akımla enerji iletiminde akü ve fotovoltaik sistemlerde sık sık kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücüler bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağı olmaktadır. <sup>(2)</sup>

Reaktif gücü ayarlayarak bara gerilimini kontrol eden statik VAR generatörler de nonlinear bir eleman olarak davranırlar, bu konu ile ilgili Gyugyi 1978 yıllarında çalışmalarda bulunmuştur. <sup>(2)</sup>

Nonlinear aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar; flüoresan lambaların modellenmesi Waymouth tarafından 1971' li yıllarda, cıva ve yüksek basınçlı sodyum lambaların modellenmesi Herrick tarafından 1980' li yıllarda, cıva ark lambalarının elektriki çalışma karakteristiğinin modellenmesi Laskowski ve Donoghue tarafından 1981' li yıllarda yapılmıştır. <sup>(2)</sup>

Transformatörlerdeki 3. ve 3' ün katları harmoniklerin geniş araştırılması ve 3 fazlı transformatörlerle ilişkisi Pender ve Delmar tarafından 1967 yılında ortaya atılmıştır. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışmasının, nüveyi daha çok doymaya götürmesi ve harmonik akımlarının hızlı bir şekilde artmasına sebep olduğu ifade edilmiş, bu durum Mc Graw 1980, Szabados ve Lee tarafından da 1981 yıllarında deneysel olarak ispatlanmıştır. <sup>(2)</sup>

Güç sistemlerinde güç kalitesi konusuna giderek artan ilgi neticesi, uluslararası toplantı ve konferanslarda yoğun tartışmalar yapılmış ve geniş bir bibliyografya meydana gelmiştir. Örneğin; IEEE Power System Harmonic

Working Group Report' da 1910 yılından 1983 yılına kadar güç sistemi harmoniklerinin bibliyografyası 1984 yılında verilmiştir. Bu tarihi perspektiften bakıldıktan sonra harmonik analizi için şunlar söylenebilir. Harmonik analizi için en uygun yöntem güç akışının incelenmesidir. Güç akışının incelenmesi de, üretim ve talep seviyeleri için hat yüklenmesinin hesabından başka bir şey değildir. Dengesiz temel güç akışı analizi üzerindeki çalışmalar ilk olarak El-Abiad ve Tarsi tarafından 1967 yılında ortaya konmuştur. Daha sonra 1983' de Arrillage ve 1985 yılında Wortman tarafından bir çok gelişme kaydedilmiştir. Modern güç sistem analizinde harmonik modellemenin 3 fazlı güç akışı analizi hakkında en önemli çalışmalar, Arrillage 1983 ve Xu' nun 1991 yılında yaptığı çalışmalar kabul edilir. <sup>(2)</sup>

Harmonikli güç akış çözüm tekniği ilk kez Xia ve Heydt tarafından 1982 yılında yapılmıştır. Bu çerçevede bilinen HARMFLO programı, doğrultucuların, HVDC (High Voltage Direct Current – Yüksek Doğru Gerilim) çeviricilerinin ve diğer nonlineer elemanların sebep olduğu harmonikli güç akış analizi için kullanılabilir. Bundan farklı yaklaşımlar 1984 yılında Densem ve 1987 yılında Semlyen tarafından ortaya konulmuştur. <sup>(2)</sup>

Bu güne kadarki hem dengeli hem dengesiz güç akış analizinde transformatörler lineer olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte literatürde anisotropik transformatörün nonlineer modeli Masoum ve Fuchs tarafından 1991 yılında ortaya konmuştur. Bu transformatörlerdeki ilave kayıplar ve nonlineer güç azalması ile bunlara nonlineer yüklerin etkisi Masoum tarafından 1990 ve 1991 yıllarında incelenmiştir. <sup>(2)</sup>

### 1.3. Harmoniklerin Matematiksel Analiz

Harmoniklerin matematiksel analizini dört ana başlıkta inceleyeceğiz.

#### 1.3.1. Fourier Analizi

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

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

$f(t) = f(t + T)$  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 minimum ve 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. <sup>(2)</sup>

Fourier serileri, verilen fonksiyonu sinüoidal hale getirir.



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 cosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir. Bu tanımdan hareketle  $T$  periyod boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen  $f(t)$  dalgası fourier' e göre;

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (1.1)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (1.2)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(t \mp \varphi_1) + C_2 \sin(2t \mp \varphi_2) + C_3 \sin(3t \mp \varphi_3) + \dots + C_n \sin(nt \mp \varphi_n) \quad (1.3)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt \mp \varphi_n) \quad (1.4)$$

şeklinde yazılabilir. <sup>(5)</sup>

Bu denklemlerde;

$t$  : Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde  $t = \omega t$  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 ;  $t$  yerine  $wt$  yazılarak,

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos wt + A_2 \cos 2wt + A_3 \cos 3wt + \dots + A_n \cos nwt + B_1 \sin wt + B_2 \sin 2wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_n \sin nwt \quad (1.5)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nwt + B_n \sin nwt) \quad (1.6)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(wt \mp \varphi_1) + C_2 \sin(2wt \mp \varphi_2) + C_3 \sin(3wt \mp \varphi_3) + \dots + C_n \sin(nwt \mp \varphi_n) \quad (1.7)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nwt \mp \varphi_n) \quad (1.8)$$

şekline dönüşür. <sup>(2)</sup>

$$A_n \cos nwt + B_n \sin nwt = C_n \sin(nwt \mp \varphi_n) \quad (1.9)$$

Eşitliğinde;

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

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  : Harmoniklerin genlikleri olup

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (1.10)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{A_1} \right) \quad \varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{B_n}{A_n} \right) \quad (1.11)$$

eşitlikleri yazılabilir.

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

$w$  : açısal frekans.

Genellikle 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 yada 4 terimi ele alınır. Böylece elde edilecek efektif değerler ideale çok az hata ile yaklaşmış olurlar ve hesaplar kolaylaşır. <sup>(1)</sup>

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.

### 1.3.2. Fourier katsayılarının analitik yöntemle bulunması

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

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (1.12)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos nwt dt \quad (1.13)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin nwt dt \quad (1.14)$$

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline göre açılımda bazı harmonikler bulunmayabildiği 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;

a)  $y = f(t)$  fonksiyonunun değişimini gösteren eğri birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşuyorsa bu taktirde  $f\left(\frac{T}{2} + t\right) = -f(t)$  şartı sağlanır. Şu halde  $A_0 = 0$  olmalı ve aynı zamanda  $t$ ' nin çift katlarının cosinüsleri ve sinüsleri bulunmamalı, yani bunların katsayıları sıfır olmalıdır.

Bu kısaca;

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

$$f(t) = A_1 \cos wt + A_3 \cos 3wt + \dots + B_1 \sin wt + B_3 \sin 3wt + \dots \quad (1.15)$$

şeklini alır.

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

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

$$f(t) = B_1 \sin wt + B_2 \sin 2wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_n \sin nwt \quad (1.16)$$

şeklinde yazılır.

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

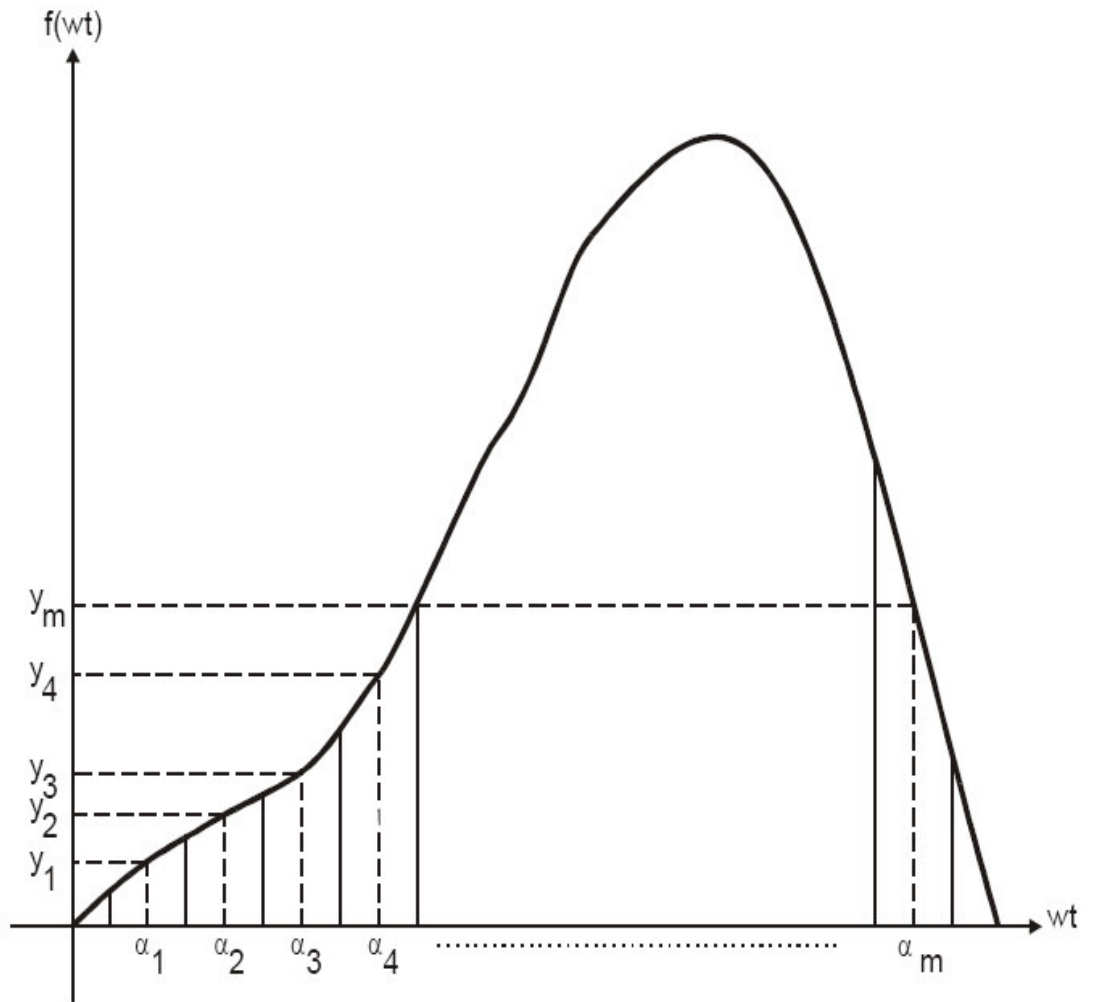
$B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B_n = 0$  şartı bulunarak açılım,

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos wt + A_2 \cos 2wt + A_3 \cos 3wt + \dots + A_n \cos nwt \quad (1.17)$$

şeklinde yazılır.

### 1.3.3. 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 nonsinüsoidal dalgaların bulunduğu koşullarda çalıştığının pratik analizleri de yapılır. Fourier katsayılarının ( $A_0, A_n, B_n$ ) belirlenebilmesi için dalga analizi yapmak gerekir.



**Şekil 1.2.** Grafik metotla fourier analizinin yapılması <sup>(6)</sup>

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 denklemi 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. Bunlar ileride bir örnekle açıklanacaktır. 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.

Şekil 1.2. de  $x$  eksenini boyunca elektriksel derece olarak  $\frac{180}{m}$  aralıklarla

$m$  adet dikey parçaya bölünmüş bir simetrik nonsinüsoidal dalganın 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 aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenebilir;

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cos \alpha_1 + y_2 \cos \alpha_2 + y_3 \cos \alpha_3 + \dots + y_m \cos \alpha_m) \quad (1.18)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \sin \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_2 + y_3 \sin \alpha_3 + \dots + y_m \sin \alpha_m) \quad (1.19)$$

bu denklemleri,

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos \alpha_i) \quad (1.20)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin \alpha_i) \quad (1.21)$$

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

$$A_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos 3\alpha_i) \quad (1.22)$$

$$B_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin 3\alpha_i) \quad (1.23)$$

n. harmonik için;

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \quad (1.24)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \quad (1.25)$$

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;

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 açıların 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. <sup>(6)</sup>

Bunu daha iyi açıklayabilmek için bir örnek verelim:

### **ÖRNEK :**

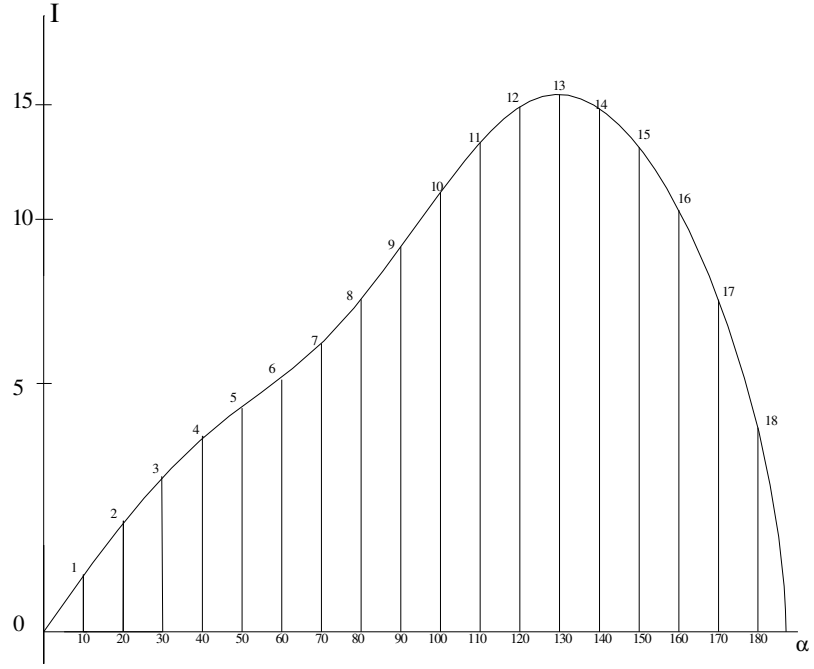
Tipik bir simetrik nonsinüoidal akım olan transformatör uyarma akımının pozitif yarı dalgası Şekil 1.2. 'de gösterilmiştir. Bu dalgayı grafik metot ile analiz edelim. <sup>(6)</sup>

### **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 1.3.** Analiz edilen dalga <sup>(6)</sup>

**Çizelge 1.1.**  $f(\alpha)$  değerleri <sup>(6)</sup>

$\alpha$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I	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

**Çizelge 1.2.** Temel Bileşen İçin Yapılan Hesaplamalar <sup>(6)</sup>

$\alpha$ (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	0.6428	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 1.24 ve denklem 1.25'den 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

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

**Çizelge 1.3.** 3. Harmonik İçin Yapılan Hesaplamalar <sup>(6)</sup>

$\alpha$ (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 1.24 ve denklem 1.25'den 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.

**Çizelge 1.4.** 5. Harmonik İçin Yapılan Hesaplamalar <sup>(6)</sup>

$\alpha$ (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 1.24 ve denklem 1.25'den 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

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

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 1.7' de ki formda elde edebilmek için,  $I_1, I_2, I_3$  akımlarının büyüklüklerini denklem 1.10'dan ve  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  açılarının da denklem 1.11'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;

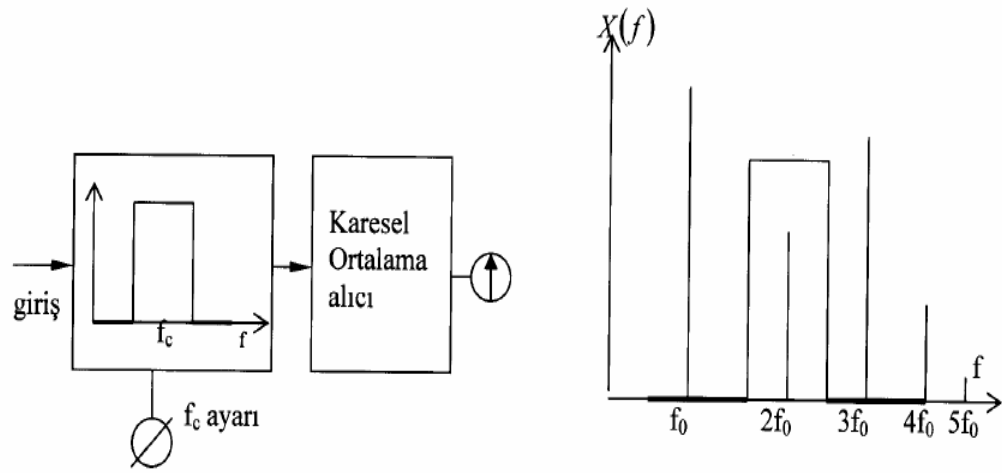
$$i = 12.25 \sin(\alpha - 70.44^\circ) + 3.76 \sin(3\alpha + 25.88^\circ) + 0.80 \sin(5\alpha - 43.47^\circ)$$

şeklinde elde edilir.

### 1.3.4. Fourier katsayılarının ölçme yöntemi ile bulunması

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

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 1.4.'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.4.** Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü <sup>(7)</sup>

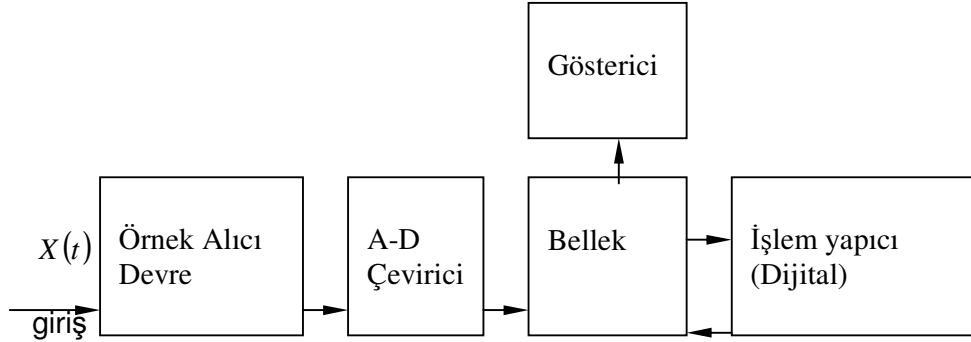
Bu tür düzenler “harmonik genlik analizörü” ya da “dalga analizörü” olarak isimlendirilir. Bunlara harmonik genlik analizörü demek daha doğrudur. Çünkü bu tür analizörlerle harmoniklerin faz açıları ile ilgili hiçbir bilgi elde edilememektedir.



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

Bir dijital harmonik analizörünün basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 1.5.'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 1.5.** Dijital harmonik analizörü

Görülüyor ki örnek alma ve dijital hesaplama ile harmonikler faz açıları ile birlikte ölçülebilmektedir. Üstelik hassasiyette 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. <sup>(8)</sup>

#### 1.4. Nonsinüoidal Büyüklükleri İçeren Devrelerin İncelenmesi

Elektrik enerji sistemlerinde nonsinüoidal işaretlerin ortaya çıkması, besleme kaynağının ve devre parametrelerinin karakteristikleriyle yakından bağlantılıdır. Bu konuda besleme geriliminin sinüoidal ve nonsinüoidal olması durumları için, analiz aşağıda özetlenmiştir.

##### 1.4.1. Sinüoidal gerilim beslemeli nonlineer devreler

Pratikte en çok karşılaşılan durum olup elemanlarından en az biri nonlineer olan tek fazlı bir devreye,

$$e = V_m \sin wt = \sqrt{2}V \sin wt \quad (1.26)$$

biçiminde sinüoidal bir gerilim uygulanması halinde devreden,

$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \sin(nwt + \varphi_n) \quad (1.27)$$

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

$$P = VI_1 \cos \varphi_1 \quad (1.28)$$

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

Bu devredeki diğer değerlerden; efektif gerilim,

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (1.29)$$

efektif akım,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (1.30)$$

görünür güç,

$$S = VI \quad (1.31)$$

reaktif güç,

$$Q = VI_1 \sin \varphi_1 \quad (1.32)$$

güç faktörü,

$$\frac{P}{S} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \quad (1.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. <sup>(2)</sup>

#### 1.4.2. Nonsinüoidal gerilim beslemeli devreler

Lineer bir tek fazlı devreye ,

$$e = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.34)$$

şeklinde n mertebede harmonik içeren bir sinüoidal bir gerilim uygulansın.

Bu durumda akacak akım harmonikleri yük empedansı lineer olması sebebiyle sadece besleme gerilimi harmoniklerine bağlı olacaktır. Böylece devreden,

$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \phi_n - \phi_n) \quad (1.35)$$

akımı akacaktır. Burada,

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad \bar{Z}_n = Z_n \angle \phi_n \quad Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} \quad (1.36)$$

şeklindedir.

$Z_n$  :  $n$ . harmoniğe ilişkin empedansın genliği

$\phi_n$  :  $n$ . harmonik akımın faz açısı

Gerilim ve akımın efektif değeri;

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (1.37)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (1.38)$$

olup böyle bir devrede aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \phi_n \quad (1.39)$$

Görünen güç ise,

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (1.40)$$

eşitlikleri ile verilebilir. Burada,

$$S^2 \neq \sum_{n=1}^N V_n^2 I_n^2 \quad (1.41)$$

eşitsizliği gerçekleşmektedir.

Güç faktörü,

$$\frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \phi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \quad (1.42)$$

reaktif güç,  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

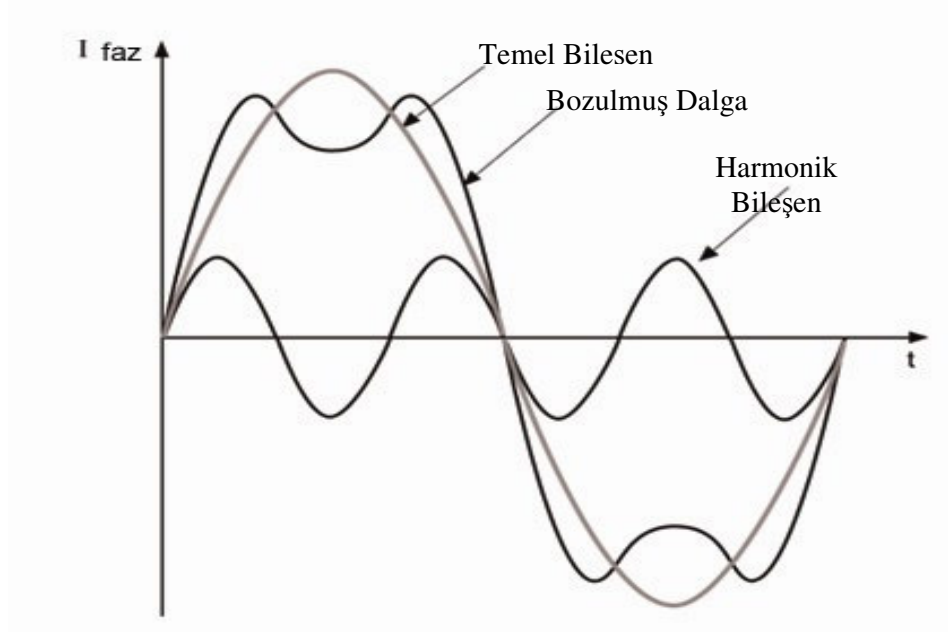
$$Q = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2 I_n^2 \sin^2 \phi_n + \sum_{m=1}^{m-N} \sum_{n=1}^N (V_n^2 I_m^2 - V_n V_m I_n I_m \cos(\phi_n - \phi_m))} \quad (1.43)$$

olacaktır. <sup>(2)</sup>

## 1.5. Harmonik Özellikler, Tanımlamalar ve Standartlar

Harmonik kaynaklarının geçen son on yılda önemli derecede artması sonucu, çeşitli ülkeler harmoniklere bazı sınırlamalar getirmeyi uygun bulmuştur. Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt, "Toplam Harmonik Distorsiyonu" (THD) dir. <sup>(9)</sup>

AC endüstriyel güç kaynağı şebekelerinde akım ve gerilimin zamanla değişimi tam sinüs dalgasından oldukça farklıdır.



**Şekil 1.6.** Bozulmuş dalganın şekli

Asıl dalga şekli, farklı frekanstaki sinüs dalgaların bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Bu dalgalardan bir tanesi besleme kaynağında bulunan dalgadır. Bu dalga temel bileşen veya kısaca ‘temel’ olarak adlandırılır.

*Harmonik bileşen* veya kısaca “Harmonik” terimi yukarıda bahsedilen ve frekansı temelin katları olan sinüzoidal bileşenlerden birini ifade etmektedir. Bu harmoniğin genişliği genellikle temelin düşük bir yüzdesine eşittir.

*Harmonik derecesi* veya bir başka deyişle harmonik sayı ile temelin bir harmoniği olan bir  $f_n$  frekansının oranı anlatılmaktadır.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (1.44)$$

Tanım olarak  $f_1$  temelinin harmonik derecesi 1’e eşittir.  $n$ . derecedeki harmonik, genelde kısaca,  $n$ . harmonik olarak adlandırılır.

*Spektrum* farklı harmoniklerin genişliklerinin, bir harmonik sayı fonksiyonu olarak dağılımıdır.

Bozulmuş dalganın ifadesi; herhangi bir periyodik olay fourier serileri ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n) \quad (1.45)$$

Burada;

- $Y_0$ =DC bileşenin genliğidir ve elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinde genellikle 0 dır.(sabit durum)
- $Y_n$ =n. Harmonik bileşenin efektif değeri
- $\Phi_n$ = t=0 da n. Harmonik bileşenin faz açısı

Harmonik dizi genlikleri genellikle frekans arttıkça azalır. Standartlara göre 40'ın üzerindeki harmonik terimler ihmal edilebilirler.

Bozulmuş bir dalga'nın efektif (rms) değeri, genellikle efektif değeri biçiminde ifade edilir. Çünkü bozulmuş dalga'nın termik etkisi bu değere bağlıdır. Bu sinüzoidal dalga için efektif değeri,  $\sqrt{2}$  ye bölünen maksimum değerdir. Sabit durum altındaki bir bozulma durumunda joule etkisi ile harcanan enerji miktarı her bir harmonik bileşende harcanan enerjilerin toplamına eşittir.

$$R \cdot I^2 t = R \cdot I_1^2 t + R \cdot I_2^2 t + \dots + R \cdot I_n^2 t \quad (1.46)$$

$$I^2 = I_1^2 + \dots + I_n^2 \quad (1.47)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2} \quad (1.48)$$

Bozulmuş bir dalga şeklinin efektif değeri direk olarak gerçek efektif değerini ölçmek için tasarlanmış aletlerle, sıcaklığını kullanarak veya spektrum analizör ile ölçülebilir.

Tek harmonik oran ve toplam harmonik bozulma, endüstriyel harmonik oranlar ve toplam harmonik bozulma, bir şebekede bulunan harmonik bozulmayı belirler

- Harmonik Oran (yada harmonik yüzde)

Harmonik oran temel olarak her bir harmoniğin büyüklüğünü ifade eder.

n. harmonik oran, temelin n. harmoniğin efektif değerinin oranıdır.  $I_n$ ' nin harmonik oranı  $I_n/I_1$ 'dir veya % olarak ifade etmek gerekirse  $100 \cdot (I_n / I_1)$ 'dir.

- Toplam Harmonik Bozulma (THD)

THD tüm harmoniklerin ısısal ya da termik etkisini belirler. Bu aşağıdaki iki türden birinin, bütün harmoniklerinin efektif değerinin oranıdır.

i. Çok yüksek bir değer verebilen temel.

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.49)$$

ii. Veya (bazen)  $0 < THD < 1$  durumunda ölçülen bozulma miktarı.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} I_h^2}} \quad (1.50)$$

Harmonik etkilerinin incelenmesinde kullanılan, Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD), gerilim ve akım için şöyle tanımlanır:

Gerilim için;

$$THD_V = \sqrt{\sum_{n=2}^n \frac{U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.51)$$

Akım için;

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^n \frac{I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.52)$$

dir. <sup>(10)</sup>

Dünyadaki harmonik standartları, ülkelere göre şöyle uygulanmaktadır:

- ◆ **Fransa** : Bu ülkede, ilgili kuruluş EDF' nin kayıtlarına göre, bağlantı noktasındaki tek harmoniklerin %1.0 çift harmoniklerin ise %0.6 değerini aşmaması öngörülmüştür. Bu oranlar temel bileşen cinsinden verilmektedir. <sup>(9)</sup>
- ◆ **Almanya** : Bu ülkede, DIN 57160 normuna göre, toplam harmonik gerilimi temel bileşenin %10' unu aşmamalıdır. Ayrıca, 15. harmoniğe kadar izin verilen gerilim harmoniği %5 iken 100. harmoniğe kadar ise %1' lik gerilim harmoniğine izin verilebilmektedir. <sup>(9)</sup>



- ◆ **İşveç** : Bu ülkedeki ilgili kuruluş SEF' in toplam harmonik distorsiyonu (THD) ile ilgili sayısal verileri Çizelge 1.5.' de verilmiştir. (SEF Thyristor Committee Report, 1974).<sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.5.** İşveç SEF kuruluşunca izin verilen THD <sup>(9)</sup>

İşletme Gerilimi	THD (%)
400/250 V	4.0
3.3kV,.....,24 kV	3.0
84 ≥ kV	1.0

- ◆ **Amerika Birleşik Devletleri** : Bu ülkede IEEE' nin THD ile ilgili sınırlamaları genel enerji sistemleri için Çizelge 1.6.' de verilmiştir. <sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.6.** IEEE' nin ABD için belirlediği THD sınırları <sup>(9)</sup>

İşletme Gerilimi	THD(%)
2.4kV,.....,69kV	5.0
115kV ve üzeri	3.0

- ◆ **Avustralya** : Avustralya standardı AS 2279, gerilim kademesini dikkate alarak değerlendirme yapmıştır. (Australian Standarts Authority, 1979). Örneğin, tek ve çift harmonik sınırlamaları şu şekilde belirtilmiştir: <sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.7.** AS 2279 standardına göre Avustralya harmonik sınırlamaları <sup>(9)</sup>

İşletme Gerilimi	THD (%)	Tek (%) Harmonikler	Çift (%) Harmonikler
33kV' a kadar	5	4	2
22-33-66 kV	3	2	1
110kV ve üzeri	1.5	1.5	0.5

- ◆ **Yeni Zelanda** : Bu ülkenin 1981 yılında yayımlanan ilgili yönetmeliği, akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlarını 66 kV ve üzerindeki gerilim kademeleri için vermektedir. Harmonik mertebesine göre gerilim harmoniklerinin sınırları Çizelge 1.8. 'de verilmiştir. (New Zeland Ministry, 1981). <sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.8.** Yeni Zelanda için harmonik sınırları <sup>(9)</sup>

Harmonik Mertebesi (n)	$U_n$ /Nominal Faz Gerilimi
3	2.3
5	1.4
7	1.0
9	0.8
11	0.7
13	0.6
15	0.5
17-21	0.4
23-49	0.3
2	1.2
4	0.6
6	0.6
8 ve 10	0.3
12-50	0.2

- ◆ **Finlandiya** : Benzer yaklaşımla hareket eden Finlandiya yönetmeliğinin sınır değerleri de aşağıda Çizelge 1.9. da verilmiştir. (Finnish Association of Electricity Supply Undertakings, 1978). <sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.9.** Finlandiya yönetmeliğine göre harmonik sınırları <sup>(9)</sup>

İşletme Gerilimi	Gerilim İçin THD (%)	Akım İçin THD (%)
1 kV	5	-
3kV,.....,20kV	4	10
30kV,.....,44kV	3	7
110 kV ve üzeri	1.5	5

- ◆ **İngiltere** : İngiltere' de ilgili yönetmelik G5/3 (Electricity Council, 1976)' e göre THD sınır değerleri Çizelge 1.10.' da verilmiştir. <sup>(9)</sup>

**Çizelge 1.10.** İngiltere yönetmeliğine göre harmonik sınırları <sup>(9)</sup>

Kaynak Gerilimi (kV)	Toplam Harmonik Distorsiyonu (%)	Harmonik Distorsiyonu (%)	
		Tek	Çift
0.415 KV	5	4	2
6.6 ve 11 KV	4	3	1.75
33 KV	3	2	1.
132 KV	1.5	1	0.5

## 2-MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Harmonik Üreten Kaynaklar

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüoidal kaynaklardan herhangi biri veya ikisinin de aynı anda sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin, güç sistemlerinde bulunması sinüoidal dalga'nın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüoidal dalga olarak adlandırılır. Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinde ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüoidal dalgalar, frekansları farklı sinüoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar. <sup>(11)</sup>

Son 50 yıldır yapılan teorik ve uygulamalı araştırmaların sonucuna göre; harmonik kaynakları, günümüzde mevcut olan klasik harmonik kaynakları ve gelecekte oluşabilecek yeni harmonik kaynakları olarak iki grupta incelenebilir.

Klasik harmonik kaynakları:

- ◆ Elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler
- ◆ Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler
- ◆ Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar

- ◆ Senkron makinelerin hava aralığı döner alanının harmonikleri
- ◆ Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları
- ◆ Şebekedeki nonlineer yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler, v.b.

Yeni harmonik kaynakları:

- ◆ Motor hız kontrol düzenleri
- ◆ Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)
- ◆ Statik VAR generatörleri
- ◆ Kesintisiz güç kaynakları
- ◆ Gelecekte Elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri
- ◆ Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler
- ◆ Direkt frekans çevirici ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar <sup>(1)</sup>

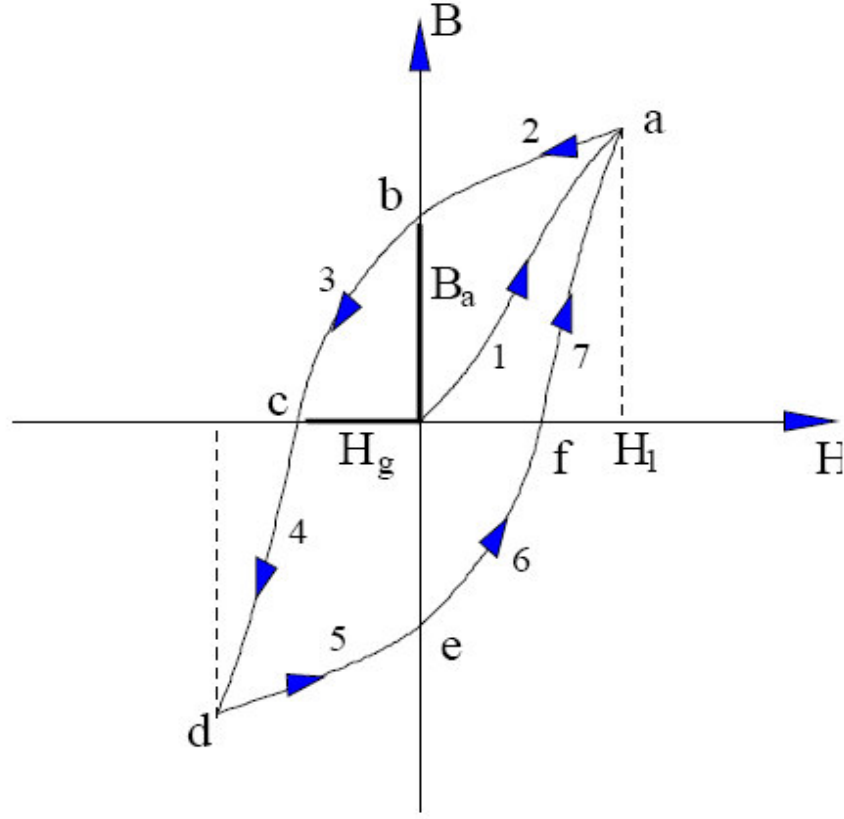
Harmonik üretilmesine neden olan en önemli elemanları ise şöyle sıralayabiliriz:

- 1) Transformatörler
- 2) Döner makineler
- 3) Güç elektroniği elemanları
- 4) Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)
- 5) Statik VAR generatörleri
- 6) Ark fırınları
- 7) Kesintisiz güç kaynakları
- 8) Gaz deşarjlı aydınlatma

- 9) Elektronik balastlar
- 10) Fotovoltaik sistemler
- 11) Bilgisayarlar

### **2.1.1 Transformatörler**

Enerji sisteminde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açarlar bu tür elemanların başında güç sistemindeki en önemli elemanlardan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün doymasından kaynaklanmaktadır. Demir çekirdeğin  $B = f(H)$  eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Mıknatıslanma eğrisi, Şekil 2.1.'de verilmiştir. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüoidal uyarma akımı sonucu sinüoidal akı ve gerilim oluşmamaktadır. <sup>(11)</sup>

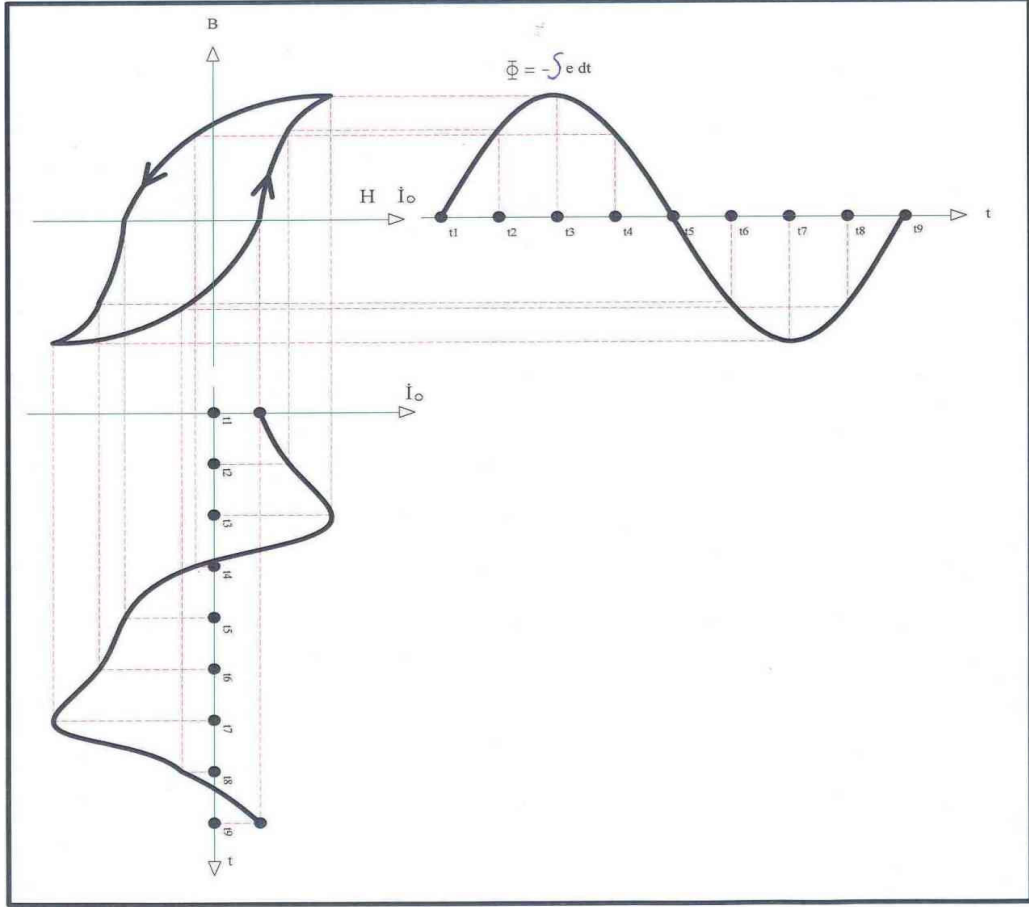


$H = H(A/m)$ ,  $B = B(W/m^2)$  olmak üzere

**Şekil 2.1.** Demir çekirdeğin mıknatıslanma eğrisi ( $B = f(H)$  eğrisi) <sup>(12)</sup>

$V(t) = V_m \sin \omega t$  biçiminde sinüsoidal şebeke geriliminin uygulanması halinde uyarma akısı  $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$  şeklinde yine sinüsoidal bir akı üretilecektir. Transformatörler, normal işletme şartlarında sinüsoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüsoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir. Transformatörün mıknatıslanma akımı Şekil 2.2.'de verilmiştir.

Transformatörlerin mıknatıslanma akımları harmonikler içerir. Kararlı çalışma durumunda manyetik endüksiyon bir sinüs formu olup histerizis ihmal edilirse, mıknatıslanma eğrisi sıfır noktasına göre simetrik olduğundan mıknatıslanma akımı  $n = 1,3,5,7,9,\dots$  tek dereceden sinüsoidal bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilebilir.



**Şekil 2.2.** Transformatör mıknatıslanma akımı

Mıknatıslanma akımının eğrisi sinüs formundan uzak bir şekilde bulunur. Bu akım da periyodik bir akımdır ve içinde 1, 3, 5, 7, 9,... gibi tek dereceli harmonikler bulunur.  $F$  demir çekirdek kesiti olmak üzere,  $B = \frac{\Phi}{F}$  olduğundan şayet  $F$  demir kesiti küçük tutulursa  $B$  büyür, mıknatıslanma



akımında yüksek harmonikler oluşur. Şayet  $F$  büyük tutulursa mıknatıslanma akımının sinüs forma yaklaşması sağlanır. <sup>(12)</sup>

Mıknatıslanma akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü o saatlerde sistemdeki yük az olduğundan temel bileşen akımı azalmakta ve THD yükselmektedir. Aşırı uyarımayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olurlar. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3. ve 3'ün katları arasındaki harmonikler fazlar arasında 360 derecenin tam katları kadar ( $n$ , harmonik dereceleri olmak üzere  $n$ . harmonik bileşenleri arasında  $n \times 120^\circ$ 'lik) faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır. <sup>(11)</sup>

Transformatörlerde uyarma gerilimi kesildiğinde transformatör saclarında bir artık akı yoğunluğu kalması sonucu, gerilim yeniden uygulandığında bu akı yoğunluğu sebebiyle transformatörün aşırı doyma değerine sürülmesine ve mıknatıslanma akımının değerinin 5-10 kat değerine yükselerek bir darbe akımı meydana gelmesine neden olmaktadır. <sup>(11)</sup>

Güç sisteminde generatör, hat ve transformatörden meydana gelen sistemde harmonik akımları, generatörün reaktansı, transformatörün primer reaktansı ve hattın reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir. Generatörde sinüs şeklinde elektromotor üretildiği halde çıkış uçlarında gerilimin şekli bozulabilir. <sup>(11)</sup>

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır;

- ◆ Transformatörün bağlantı grubu,
- ◆ Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması,

- ◆ Transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısı.

a) Yıldız/Yıldız bağlı transformatörler:

Primer yıldız noktası nötre bağlı ise; Faz akımlarının  $n$ . harmonikleri arasındaki faz farkı şunlara eşittir,

$$\varphi_n = n\varphi_1 = n\frac{2\pi}{3} = n120^\circ \quad (2.1)$$

bu bağıntıdan da görüleceği gibi, üçlü harmonikler her üç fazda da aynı fazda olduklarından, nötr hattında birbirlerine eklenirler. Buna karşılık, diğer harmoniklerin toplamı, aralarında  $120^\circ$  faz farkı olduğundan sıfır olacaktır. <sup>(10)</sup>

Primer yıldız noktası nötre bağlı değil ise; üçlü harmonikler yıldız noktasına yığılırlar. Dolayısıyla, sargılarda üçlü harmonikler dışında diğer tek mertebeli tüm harmonikler dolaşır. Böylece, indüklenen emk' lar sinüs biçiminden ayrılırlar. Yıldız noktasında yığılan bu akımların oluşturduğu akılarda her üç fazda aynı yöndedirler. Bu akılar devrelerini tamamlamak için yol arayarak, hava veya yağ içinde kendilerine yol seçerler. Eğer imkan bulurlarsa kazana atlarlar ve kazanda emk' lar indükleyerek kazanın ısınmasına neden olurlar. Ayrıca, bu üçlü harmonikler, her üç fazda aynı fazlı gerilim düşümü meydana getirerek yıldız noktasının kaymasına sebep olurlar. <sup>(13)</sup>

b) Yıldız/Üçgen bağlı transformatörler:

Primer yıldız noktası nötre bağlı ise; karşılaşılan durum Yıldız/Yıldız bağlı transformatörlerdeki ile aynıdır.

Primer yıldız noktası nötre bağlı değil ise; 3. ve 3'ün katı akı harmonikleri üçgen sargıda 3 ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının

geçmesine sebep olur. Bu akımlar kendisini indükleyen akıya zıt etkileyerek bunları söndürürler. <sup>(11)</sup>

c) Üçgen/Yıldız bağlı transformatörler:

Primer sargısı üçgen bağlı transformatörün mıknatıslama akımının aynı fazda olan üçlü harmonik bileşenleri üçgen sargıda dolaşırlar. Üçlü harmonik bileşenler primer şebekeye geçemediklerinden, şebeke hatlarında diğer tek mertebeli harmonikler (5., 7., 11., v.b.) görülür.

Primer sargısının üçgen olması halinde, bacaklardaki simetrisizliğin neden olduğu mıknatıslama akımlarındaki eşitsizliğinde bir sakıncası kalmaz. Çünkü orta bacağıın mıknatıslama akımı diğer iki dış bacağıın mıknatıslama akımlarından küçük olmasına rağmen, şebekeden çekilen her üç koldaki akımlar birbirine eşittir. <sup>(13)</sup>

Transformatörler nasıl bağlanırsa bağlansın, primer şebekenin nötrüne bağlansın yada bağlanmasın, nüve tipi nasıl olursa olsun şebekeden temel bileşenlerin yanında 5., 7., 11., 13. gibi harmonik bileşenli mıknatıslama akımlarını daima çekerler. <sup>(11)</sup>

Üçlü harmoniklerin kötü etkilerinden kurtulmak için tersiyer sargı kullanılır. Görmüş olduğu görevden dolayı buna dengeleyici sargıda denir. Tersiyer sargı, transformatörün anma gücünün  $\frac{1}{3}$  mertebesinde olan üçüncü bir sargıdır ve üçgen şeklinde bağlanır. Tersiyer sargı üzerinden mıknatıslama akımının üçlü harmoniklerinin dolaşması ile, alan ve faz sargıları bu harmoniklerden kurtulmuş olur. <sup>(13)</sup>

### **2.1.2. Döner Makineler**

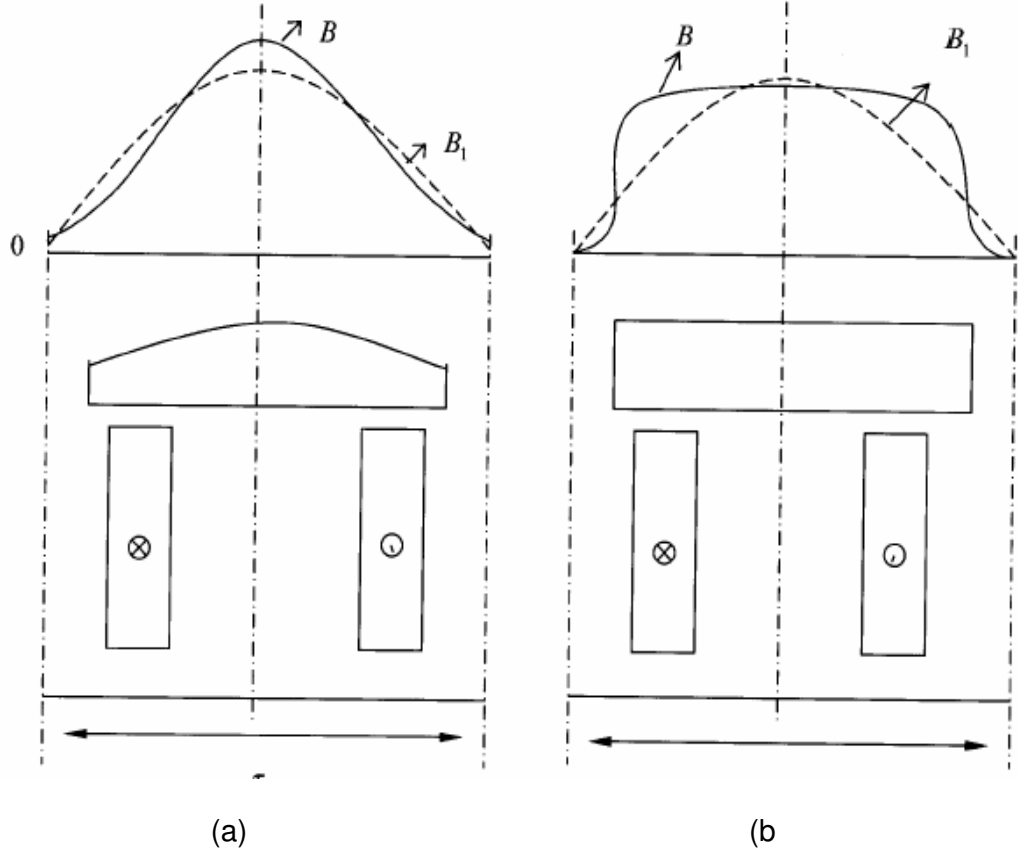
Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; Alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Bir makine için gerçek alan şekli makine tasarımının bir fonksiyonudur. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir. <sup>(1)</sup>

#### **2.1.2.1. Senkron generatörler**

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması, kaçak akımlar, sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Döner makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler, generatör gücü 100 kVA' dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmaz. <sup>(11)</sup>

Yuvarlak (içten kutuplu) rotorlu generatörler ile, çıkıntılı kutuplu generatörlerin hava aralığında meydana gelen alan şekilleri birbirinden farklıdır. Çıkıntılı kutuplu bir generatörde kutup yüzeyinin şekli ve kutup yayının, kutup adımına oranı, manyetik akının hava aralığındaki dağılışına etki eden faktörlerdir. Şekil 2.3.' de görüldüğü gibi kutup şekilleri ile bunların

hava aralığında meydana getirdikleri manyetik akılar birbirinden farklıdır. <sup>(14)</sup>



**Şekil 2.3.** Yuvarlak ve düz kutuplu generatörlerde emk şekilleri <sup>(14)</sup>

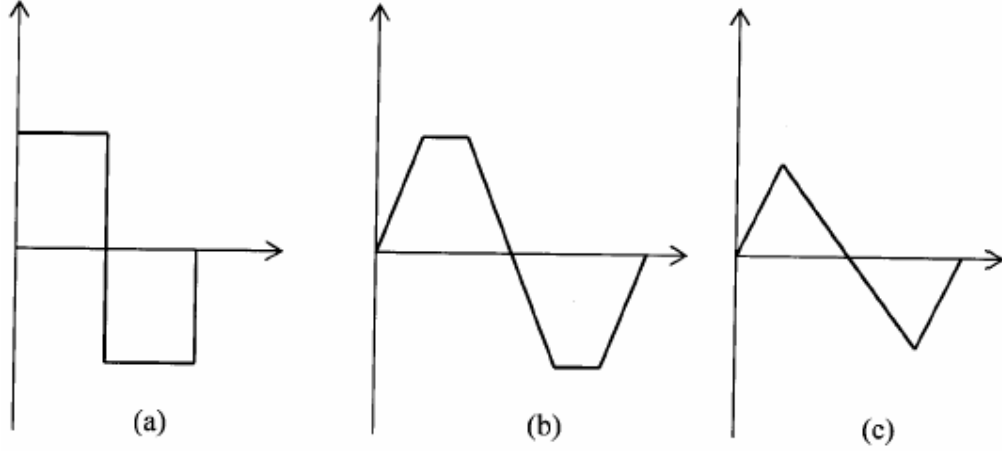
Kutup şekli düz iken meydana gelen emk köşelidir. Buna karşılık kutup yüzeyi yuvarlak iken daha çok sinüsoidal' e yaklaşan bir emk elde edilmiştir. Şekil 2.3.a' da  $B_1/B = 0,98$  , Şekil 2.3.b' de ise  $B_1/B = 1,1$  orantısı yazılabilir. Bu duruma göre  $0,98/1,1 = 0,89$  eşitliği bize düz kutuplu generatörün daha az manyetik akı meydana getirdiğini göstermektedir. Senkron motorlarda daha çok düz kutuplar kullanılır. Generatörlerde ise indüklenen gerilimde harmonikler dikkate alarak yuvarlak kutuplar kullanılır. <sup>(14)</sup>

Generatörlerde hava aralığındaki manyetik akının durumu, indüklenen emk' ya aynen etki ettiğinden, emk' nın sinüsoidal olması için akı dağılışını yapılabildiği kadar sinüsoidal yapmak gerekir. Bunu için sargıların dağıtılması, sargı adımının kesirli olması, bir kutup altında bir faza ait oluk sayısının kesirli olması ve bunlara benzer faktörler yanında, endüvi-çıkıntılı kutup yüzeyi arasındaki akı dağılışının sinüsoidal yapılması, indüklenen gerilimin sinüsoidal olmasını sağlar. <sup>(14)</sup>

Hava aralığındaki manyetik akının sinüsoidal yapılabilmesi, çıkıntılı kutuplu generatörlerde Şekil 2.3.a' da görüldüğü gibi kutup yüzeyinin kavisli yapılması ile sağlanır. Buradaki kutup şeklinde hava aralığı kutbun her yerinde aynı değildir. Kutup ekseninde hava aralığı, kutup kenarlarına göre daha azdır. Buna göre manyetik akı kutup ekseninde en fazla olup kutup kenarlarına doğru gidildikçe eğrisel şekilde azalır. Bu durumda akı dağılışı sinüsoidal' e yaklaştığından indüklenen emk' da daha düzgün bir sinüs dalgası verir. <sup>(14)</sup>

Yuvarlak rotorlu generatörlerin alan şekline gelince, bunların alan şekilleri biraz farklıdır. Şekil 2.4.a' da bütün sargıların bir çift oluğa toplu olarak yerleştirildiği zaman meydana gelen alan şekli görülüyor. Bu tür sargı dikdörtgen veya kare şeklinde bir alan meydana getirir. Bu tür sarımdan kaçınılarak rotordaki oluklara sargıların dağıtılması sağlanmalıdır. Şekil 2.4.c' de oluşan dalgada uygun değildir. Çünkü bütün rotor yüzeyi sarımda kullanılacak olursa, alanın şekli sivri tepeli yani üçgen şeklinde olur. EMK' nın da aynen üçgen şeklinde olması, bu tür sarımında kullanılmaması gerektiğini ortaya çıkarır. Şekil 2.4.b' de ise rotor yüzeyinin 1/3' ü boş bırakılarak geri kalan 2/3 yüzeydeki oluklara sargıların sarıldığı durumdaki dalga şekli

görülmektedir. Bu şekildeki sarım kullanıldığında meydana gelen emk' nın şekli sinüs dalgasına çok yaklaşmıştır. Bunun için uyarım sargıları  $120^\circ - 150^\circ$  ye veya rotorun  $2/3$  ' üne sarılarak hem daha az bakır kullanılmış hem de işçilik masrafı en aza indirilmiş olur. <sup>(14)</sup>



**Şekil 2.4.** Yuvarlak rotorlu generatörlerde (turbo generatör) hava aralığında indüklenen emk şekilleri. <sup>(14)</sup>

Generatörlerin bağlantı şekilleri de harmonikler için belirleyici özellikler taşır:

Generatör sargısı Yıldız bağlı ise; 3 ve 3' ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerinde bulunmazlar.

Yıldız bağlı bir generatöre üç fazlı simetrik ve doğrusal bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmaz ise; 3 ve 3' ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3' ün katı frekanslı  $I_0$  akımı, nötr üzerinden de

bunların toplamı olan  $3I_0$  değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Generatör sargısı Üçgen bağlı ise; bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur. <sup>(11)</sup>

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Fakat generatörün 4 iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun dizayn edilerek 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir. <sup>(11)</sup>

#### **2.1.2.2. Asenkron motorlar**

Asenkron makinenin çalışması bir döner alan varlığına dayandığından bu döner alanın oluşturulması için asenkron motorun statorunun açılmış olan oluklarına sargılar yerleştirilmiştir. Oluklara sarılan bu sargının iletken dağılımı sinüs formunda yapılamadığından dolayı, amper-sarım dağılımı da sinüs formunda olmamaktadır. Sargılara sinüsoidal gerilim uygulandığında her bir faz sargısından geçen akım, akı ve amper-sarım ifadesi sinüsoidal olmadığı için seri harmonikler içerir. Bu harmoniklere, “hava aralığı” veya “uzay” harmonikleri adı verilir. Meydana gelen hava aralığı harmonikleri, temel dalga ile birlikte asenkron motoru etkiler. Çünkü



frekansları farklı olan bu harmonikler devre parametrelerini değiştirmekte ve bunlara bağlı kayıpların farklı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca hava aralığında stator sargısına bağlı olarak meydana gelen yüksek harmonikler zararlı döndürme momenti ve kuvvetlerin meydana gelmesine yol açarlar. Bu durum özellikle kafesli asenkron motora yol vermede oldukça önemlidir. <sup>(15)</sup>

Farklı sargılı rotorlu asenkron motorların hava aralığında meydana gelen dalga şeklinin analizi ile ilgili yapılan bir deneysel çalışma aşağıda verilmiştir. Hava aralığında oluşacak dalga şeklinin yalnız stator sargılarına bağlı olarak değişip değişmediğini incelemek için deneyde kullanılan üç motorda da aynı rotor ve kapaklar kullanılmıştır. Böylece stator sargısına bağlı değişimler incelenmiştir.

Deneysel çalışmada aynı güçteki ve tipteki üç asenkron motora şu sargılar uygulanmıştır: 1. motora; bir tabakalı iki katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş sargı. 2. motora; bir tabakalı bir katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş dağıtılmış bileşik sargı. 3. motorda; iki tabakalı çap (tam) adımlı sargıdır. Ayrıca deney motorlarında hava aralığındaki elektromotor kuvvetini (emk) ölçebilmek için motorlara uygulanan sargıların simetriği olan ölçü bobinleri sarılmıştır. Çalışmada diğer etkileri ortadan kaldırmak için üç motorla yapılan deneyde aynı rotor ve kapaklar kullanılmıştır. Ayrıca deney anında şebekedeki gerilimin ve frekansın değişimlerini önlemek için gerilim doğru akım tarafından tahrik edilen bir generatörden alınmıştır. Doğru akım motorunun beslemesi de bir servo regülatörden yapılarak generatördeki gerilimin ve frekansın sabit olması sağlanmıştır.

Deneysel çalışma anında motorlar fuko freni ile  $5,5Nm$  ile yüklenmiş durumda ölçü bobinlerinde indüklenen gerilimin dalga şekli bir osiloskop ile alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu dalga şekillerinden, farklı stator sargılı asenkron motorların hava aralığındaki dalga şekillerinin farklı olduğu görülmüştür. Farklı olan bu dalga şekillerinin üst harmoniklerin genliğinin ve yönünün bulunabilmesi için dalga biçimleri fourier serisine açılmıştır. Yapılan fourier analizi sonucunda elde edilen üst harmonik katsayıları Çizelge 2.1.' de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Deney motorlarının yükte çalışması sırasında ölçü bobinlerinde indüklenen emk' in dalga biçiminin fourier analizi sonucunda elde edilen harmonik katsayıları <sup>(15)</sup>

Harmonik Frekans (Hz)	Harmoniklerin $B_n$ Katsayıları *10 <sup>-3</sup>		
	1. motor	2. motor	3. motor
$B_1$ (50)	2.2576	2.5003	2.4893
$B_3$ (150)	0.0659	0.0633	0.0524
$B_5$ (250)	-0.0052	-0.0175	-0.0054
$B_7$ (350)	-0.004	-0.0145	0.0006
$B_9$ (450)	-0.0004	-0.0029	0.0087
$B_{11}$ (550)	-0.0039	-0.0127	-0.0087
$B_{13}$ (650)	0.0217	-0.002	0.0082
$B_{15}$ (750)	-0.0232	0.0211	0.0146
$B_{17}$ (850)	-0.0179	-0.006	-0.0139
$B_{19}$ (950)	-0.0051	0.0031	-0.0009
$B_{21}$ (1050)	0.0071	-0.0007	0.0002
$B_{23}$ (1150)	0.0004	-0.0013	0.0002

Bu Çizelge incelendiğinde hava aralığında oluşan yüksek harmoniklerin üç motorda da farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu harmonik katsayılarının işaretleri incelendiğinde tüm motorlarda 1. ve 3. harmonik katsayılarının pozitif değerde olduğu görülmektedir. Diğer üst harmonik katsayıları deney motorlarında farklılık göstermektedir. Harmonik katsayıları pozitif olan dalgalar temel dalga ile aynı yönde dönmekte, negatif olan dalgalar ise temel dalgaya göre ters yönde dönmektedir. Bu durumda hava aralığındaki dalga şeklinin sinüs formunun bozulmasına neden olmaktadır.

Hava aralığında oluşan dalga şeklinin sinüs formunda olmaması rotor devresinde indüklenen gerilimin dalga şeklinin bozuk olmasına neden olmaktadır. Bu durum döndürme momentini ve kuvvetini olumsuz yönde etkilemekte ve motorun ısınmasına neden olmaktadır. Çünkü her üst harmoniğin kendine özgü bir döndürme momenti ve kuvveti vardır. Bu döndürme moment ve kuvveti ana döndürme moment ve kuvveti ile aynı yönde olduğunda desteklemekte, tersi olduğunda ise zayıflatmaktadır.

Bu durumlar dikkate alındığında; bir tabakalı bir katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş dağıtılmış bileşik sargı tipinin hava aralığında meydana getirdiği döndürme momenti ve kuvvetinin en iyi olduğu ve ikinci sırada iki tabakalı çap (adım) adımlı sargı tipinin yer aldığı ve bir tabakalı iki katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş sargı tipinin ise diğer sargı tiplerine göre düşük değerde olduğu yapılan deneysel çalışma ve analiz sonunda bulunmuştur. <sup>(15)</sup>

### 2.1.3. Güç Elektroniği Elemanları

Çeşitli güç elektroniği elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar bir çok alanda kullanılmaktadır. Yüksek çalışma verimine ve istenilen çalışma durumlarına sahip olmaları nedeni ile geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

Televizyon alıcıları, bilgisayarlar ve diğer elektronik uygulamaları kapsayan küçük güçlü tek fazlı elektronik güç dönüştürücülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Üç fazlı güç elektroniği elemanları ise geniş bir kullanım ve tasarım alanına sahiptirler. Başlıca güç dönüşüm grupları şunlardır:

- ◆ Doğrultma
- ◆ Frekans kontrolü
- ◆ Gerilim kontrolü
- ◆ Evirme
- ◆ Diğer uygulamalar

Sanayide enerji iletimine kadar her alanda yaygın olarak kullanılan çeviriciler, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (doğrultucular=redresör) veya doğru akımı alternatif akıma dönüştüren (eviriciler=inverterler) elemanlar olarak tanımlanır. Bunların içinde güç sistemlerinde en çok kullanılan grup, doğrultucu grubudur. Doğrultucuların güç sistemlerinde başlıca kullanım alanları; Yüksek doğru gerilimle iletim (HVDC), doğru akım motorlarının beslenmesi ve kimyasal süreçlerdir.

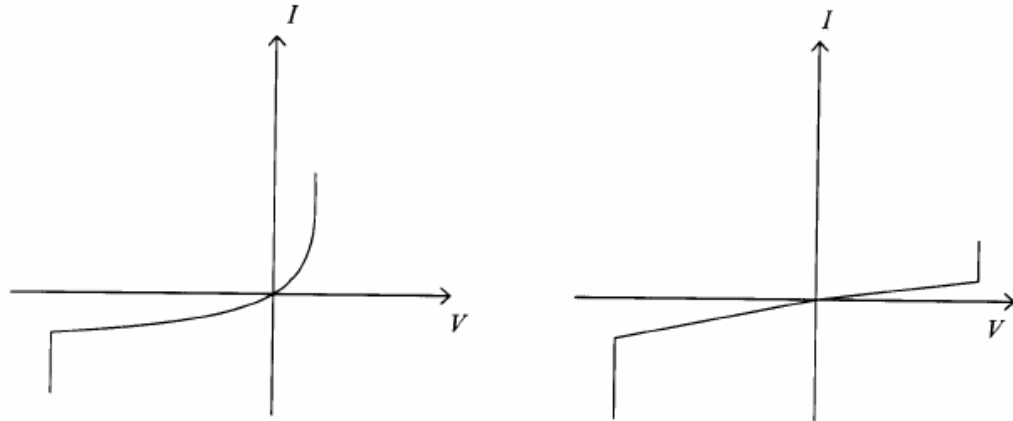
Çeşitli darbe sayılarına sahip doğrultucular bulunmaktadır. 6 ve 12 darbeli doğrultucular en yaygın olanlarıdır. Küçük güçlü uygulamalarda 3

darbeli, daha güçlü uygulamalarda ise 18 ve daha büyük darbeli doğrultucular kullanım alanı bulmaktadır. Darbe sayısının seçimi ekonomik koşullara da bağlıdır.

Frekans ve gerilim kontrolü grubu, senkron ve indüksiyon motorların ve benzeri yüklerin farklı frekans ve gerilimlerde beslenmesi amacıyla kullanılır. Böylece motorların tüm yük seviyelerinde daha verimli çalışması sağlanır.

Güç elektroniği elemanlarındaki toplam harmonik distorsiyonu tipik olarak yük akımının %10–30' u arasındadır. <sup>(1)</sup>

Yarı iletken elemanlar çalışma karakteristiğinin nonlineerliğinden kaynaklanan harmonikler üretirler. Şekil 2.5.' de örnek olarak bir diyot ve tristöre ait çalışma karakteristiğinden de görüldüğü gibi akım ve gerilim lineer olarak değişmediği için şebekede harmoniklerin oluşmasına neden olurlar. <sup>(11)</sup>



a) diyot

b) tristör

**Şekil 2.5.** Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri <sup>(16)</sup>

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. Belirli şartlarda, alternatif akım ile enerji iletimine göre daha ekonomik iletim sağlayan doğru akım enerji iletim sistemleri (HVDC) ile akü, fotovoltaik sistemler ve bazı endüstriyel donanımlar hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler. <sup>(11)</sup>

Örneğin yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresinde sinüsoidal dalga tristörlerin tetikleme açısına ( $\alpha$ ) bağlı olarak belirli bir  $\phi$  açısından kesildiğinde devrede nonsinüsoidal dalga meydana gelmektedir. Şekil 2.6.a' da nonsinüsoidal dalga, Şekil 2.6.b' de ise bu dalga ile oluşan harmonikler gösterilmiştir.

Bir konverterin meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin; 6 darbeleri bir konverterin akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \quad (2.2)$$

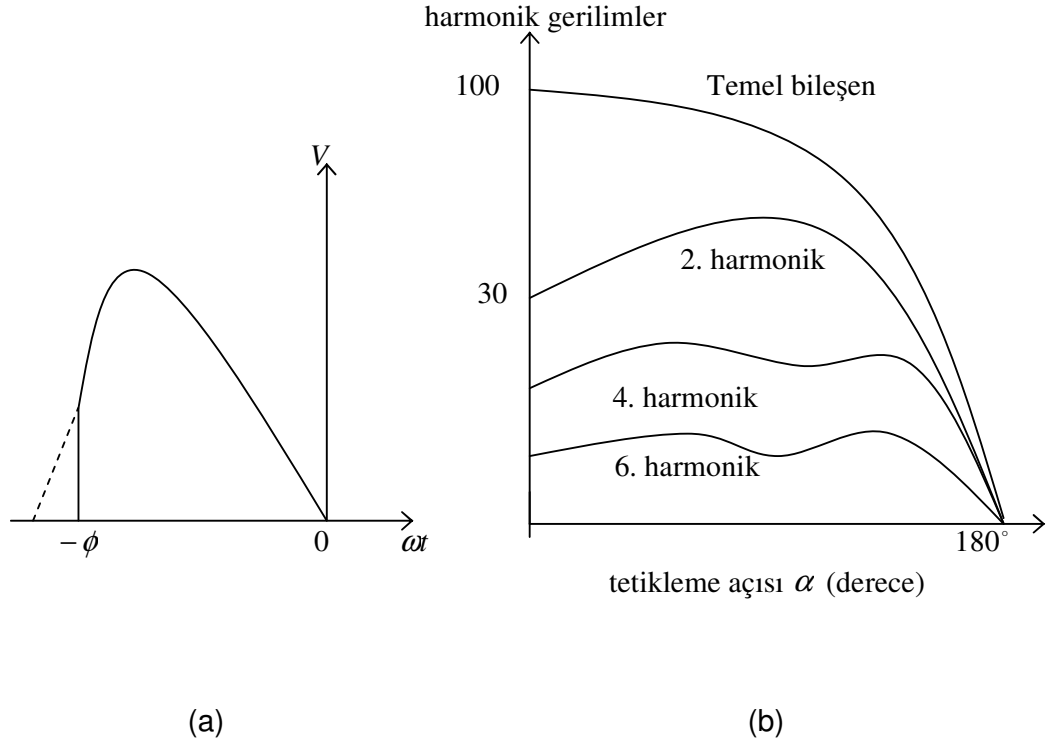
Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı  $P = 6, 12, 18$  ve  $36$ ' dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = kp + 1 \quad (2.3)$$

$n$  : harmonik mertebesi

$p$  : çeviricinin darbe sayısı

$k$  : pozitif bir tam sayıdır. (1,2,3,4,5 .... gibi) <sup>(11)</sup>



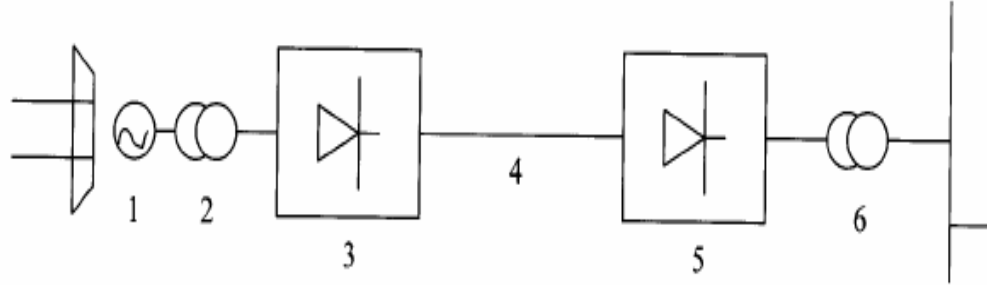
**Şekil 2.6.** Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için

(a) dalga şekli, (b) oluşan harmonikler <sup>(11)</sup>



#### 2.1.4. Doğru Akım ile Enerji Nakli (HVDC)

1960' lı yıllardan başlayarak, yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle, doğru akım ile enerji nakli (HVDC-High Voltage Direct Current) gündemdedir. Kararlılık probleminin olmaması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirme olanağının olması, doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır. Bu teknikte alternatif-doğru ve doğru-alternatif çeviricileri kullanılmaktadır. Alternatif olarak üretilen gerilim doğrultulmakta ve enerji nakil hattını beslemekte, hattın ucunda tekrar alternatifte çevrilerek tüketiciye iletilmektedir. Şekil 2.7.' de bir doğru akımla enerji iletim hattının basit bağlantı şekli verilmiştir.



**Şekil 2.7.** Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması,

(1: Generatör, 2: Yükseltici transformatör, 3: Doğrultucu,  
4: İletim hattı, 5: Evirici, 6: Alçaltıcı transformatör )

Doğru akım enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan büyük güçlü çevriciler (doğrultucu ve evirici bloklar) yarı iletken elemanlardan oluştuklarından, birer harmonik kaynağı olmaktadır.

Örneğin, altı yollu çevricilerin kullanıldığı bir doğru akımla enerji iletim hattında faz akımının efektif değerı;

$$I = I_1 \left[ 1 + \left( \frac{1}{5} \right)^2 + \left( \frac{1}{7} \right)^2 + \left( \frac{1}{11} \right)^2 + \dots \right]^2 \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $I_1$ , temel bileşenin efektif değeridir. Uygulamada harmoniklerin olabildiğince az olduğu çevirici dűzenlerden yararlanılır. Yapılan incelemelerden, tek kutuplu iletim modelinde 5., 7., 17. ve 19. harmoniklerin ortaya çıktığı, buna karşılık iki kutuplu iletim modelinde bu mertebeden harmoniklerin oluşmadığı gözlenmiştir. <sup>(1)</sup>

### 2.1.5. Statik VAR Generatörleri

Statik VAR generatörleri; alternatif akım kısıyıcısı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Zira, geleneksel kompanzasyon dűzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneđin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz. Fakat yarı iletken elemanların sağladığı imkanlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanılır. <sup>(1)</sup>

Tristörler, bir senkron anahtarı gibi çalışırlar. Kumanda devrelerine uygun sinyal verilerek devreye uygulanan gerilimin efektif değeri ve buna bağlı olarak ta devreden geçen akım kayıpsız olarak istenildiği gibi ayarlanabilir.

Bu sistem tristör ile kumanda edilen, reaktör ile dengelenen, sabit kondansatör ile kompanzasyon metodudur. Doymalı reaktörler kompanzasyon ark fırınları için ideal bir çözüm getirmemektedir. En uygun çözüm, fırının reaktif gücünün ani değerini ölçmek ve buna göre gerekli endüktif gücü, gerekli sayıda reaktörü devreye sokup çıkarmakla sağlamaktır. Bu suretle fırın gücü ile reaktör gücünün toplamı sabit tutulur ve sabit kondansatör tarafından kompanze edilir.

#### **2.1.6. Ark Fırınları**

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmonikler içeren yüklerin önemli bir örneğidir. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir.

Ark fırınının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler ihtiva eder. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır. Çizelge 2.2.' de ark fırınının ortalama harmonik değerleri verilmiştir. <sup>(17)</sup>

Ark fırınlarının çalışma şartlarında ki bu değişmelerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlar da gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formunda uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir.

Ark fırınlarında harmonik dağılımın kuramsal olarak saptanması için güç sistemi modelinin tam olarak kurulması gerekir. Bu modele harmonik meydana getiren elemanların modellerinin eklenmesi gerekir. Daha sonra sistem çözümlenerek harmoniklerin baralara göre dağılışı elde edilir. <sup>(17)</sup>

**Çizelge 2.2.** Ark fırınının ortalama harmonik değerleri <sup>(17)</sup>

Harmonikler	Ortalama Genlik (%)
2	4-9
3	6-10
4	2-6
5	2-10
6	2-3
7	3-6
9	2-5

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik generatörü gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların

gerçekleşmesi halinde rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer. <sup>(17)</sup>

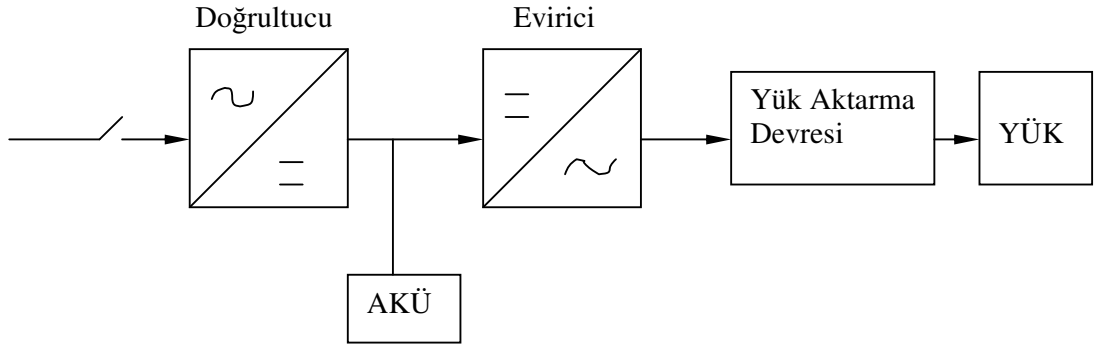
### **2.1.7. Kesintisiz Güç Kaynakları**

Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır.

Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin fourier serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır. Bu durum gerek yükte gerekse kaynakta gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara v.b. istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Ortaya çıkan bu harmonikler işletme cihazlarında çoğu kez istenen performansın alınabilmesini engellediği için istenmez. Sonuçta çıkış işaretindeki harmoniklerin belirli miktarlarda bastırılması çoğu kez gerekli bir işlem olmaktadır.

Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir.

Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüsoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenlerde vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez. Şekil 2.8.' de bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması görülmektedir. <sup>(1)</sup>



**Şekil 2.8.** Bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması <sup>(1)</sup>

### 2.1.8. Gaz Deşarjlı Aydınlatma

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin flüoresan, cıva, ark, neon v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlarından ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Üç fazlı sistemde, faz nötr gerilimle beslenen aydınlatmada (üç fazlı dört telli montajda) 3. harmonik akımı nötr iletkeninden toprağa geçer. Harmonik etkinliği açısından bakıldığında, flüoresan aydınlatmada tek mertebeli harmoniklerin büyüklüğü önemli oranda devreyi etkiler. <sup>(11)</sup>

### 2.1.9. Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7. ve 9. bileşenlerdir, 13. harmonikten sonra temel bileşenin 1/3' ünden daha küçük değerlerde harmonik bileşenlere sahiptirler. <sup>(11)</sup>

Enerji tasarrufu sağladığı söylenerek, promosyonu yapılan kompakt flüoresan lambalar, elektronik balastları tarafından şebekeye harmonik

akımlar gönderirler. İngiltere’deki Eastern Electricity tarafından çeşitli kompakt flüoresan lambalar kullanılarak yapılan araştırmaların sonucu Çizelge 2.3.’de verilmiştir. <sup>(1)</sup>

**Çizelge 2.3.** Temel değerin % olarak harmonik içerikleri <sup>(1)</sup>

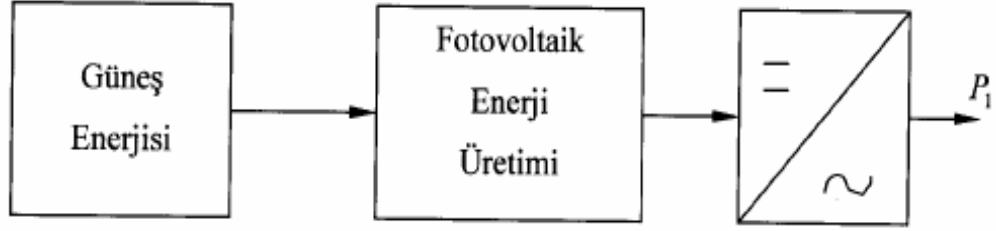
2. Harmonik	0.12	0.23	0.25	0.82	0.1
3. Harmonik	21.11	25.13	78.87	88.83	1.04
5. Harmonik	29.84	15.53	54.08	71.77	2.7
7. Harmonik	8.44	3.61	41.75	56.00	0.40
9. Harmonik	6.27	2.03	35.36	47.70	1.12
11. Harmonik	12.11	6.33	24.39	45.03	0.01
13. Harmonik	4.45	1.2	12.77	43.25	0.27
THD	41.47	40.18	118.21	176.27	4.00

#### **2.1.10. Fotovoltaik Sistemler**

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğine sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır.



Şekil 2.9.' da fotovoltaik enerji üretiminin blok şeması verilmiştir. <sup>(11)</sup>



Şekil 2.9. Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması <sup>(18)</sup>

## 3-ARAŞTIRMA BULGULARI

### 3.1. Harmoniklerin Etkileri

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

- ◆ Generatör ve şebeke geriliminin bozulması
- ◆ Gerilim düşümünün artması
- ◆ Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi
- ◆ Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması
- ◆ Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi
- ◆ Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
- ◆ Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları
- ◆ Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar
- ◆ Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları
- ◆ İzolasyon malzemesinin delinmesi
- ◆ Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması
- ◆ Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
- ◆ Mikro bilgi işlemciler üzerinde hatalı çalışma

Bu etkiler içinde teknik ve ekonomik yönden en olumsuz sonuçlara yol açanları, kayıplardaki artış ve sistem ölçü cihazlarındaki hata paylarının artması şeklinde özetlemek mümkündür. Bunlardan birincisi omik direnç içeren tüm

tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. İkincisi ise ölçü ve kayıt cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşması, bir başka deyişle kayıt/ölçüm hatalarının artmasıdır. <sup>(2)</sup>

### 3.1.1. Transformatörler Üzerine Etkileri

Transformatörlerde meydana gelen akım ve gerilim harmoniklerinin neden olduğu problemler şöyle sıralanabilir: Akım harmonikleri sargı bakır kayıplarında  $(I^2R)$  ve kaçak akı kayıplarında artışa, çekirdek kaybının artmasına ve haberleşme sistemlerinde kötü etkiye neden olur. Gerilim harmonikleri ise fuko ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve yalıtımın zorlanmasına neden olur.

Transformatör endüktansı ve transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana gelebilir. Akım ve gerilim harmonikleri transformatörlerde ek ısınmalar oluşturur.

Harmonik akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekteki alternatif manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan manyetik çekirdekteki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişken manyetik alan çekirdek dilimlerinde eddy akımları oluşturur. Buda ek kayıplara neden olur. Yani frekans arttıkça transformatördeki eddy kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonikli bileşenler, düşük frekanslı harmonikli bileşenlerden daha önemlidir.

IEEE transformatörün yük akımındaki harmonikler için bir limit saptamıştır. Buna göre akım için THD limiti %5' tir. Gerilim için ise yük durumuna göre bazı limitler saptanmıştır,

Yüksüz durumda %10 , Anma yükünde %5' tir. <sup>(3)</sup>

### 3.1.2. Döner Makineler Üzerine Etkileri

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makineler üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu etkilerden birincisi, ek (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 alanlarda ek kayıplar meydana getirir. Örneğin 16 kW' lık bir indüksiyon motoru 60 Hz temel frekanslı sinüsoidal gerilimle beslenirken oluşan toplam kayıp 1303 W iken, kare dalga ile bir besleme yapıldığında toplam kayıpların 1600 W' a çıktığı gözlenir.

Harmoniklerin yol açtığı diğer bir olay da, harmonik momentleridir. Nonsinüsoidal gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur. Harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi çoğu zaman ihmal edilebilir ancak önemli sayılabilecek moment salınımlarına yol açabilir.

Sinüs biçimli olmayan bir beslemeye sahip üç fazlı bir indüksiyon motorundaki harmonik akımlarının oluşturduğu akı yoğunluğu dalgaları arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir. Ayrıca harmoniklerin, hava aralığında bir bileşke akı üretmesi nedeni ile indüksiyon motoru kalkış yapamayabilir veya limitlerin çok altındaki düşük hızlarda çalışabilir. <sup>(10)</sup>

Çeşitli harmonik çiftleri (5. ve 7. gibi) motor-yük sisteminde veya türbin-generatör gruplarında mekanik salınımlara neden olurlar. Harmonik akımları ve temel frekans manyetik alanı arasındaki etkileşimin nedeni olduğu salınım momentleri bir mekanik rezonans frekansına uyduğu zaman mekanik salınımlar oluşur. Örneğin; 5. ve 7. harmonikler generatör rotorunda 6. harmonik

frekansında sürekli bir bükülmeye neden olurlar. Eğer mekanik titreşimin frekansı elektriksel frekansa yakın olursa yüksek mekanik cevaplar oluşabilir. <sup>(1)</sup>

Standartlar, motorlar için kesin gerilim veya akım harmonik sınırlamaları vermemesine rağmen, indüksiyon motorları için %5' lik bir gerilim harmoniği sınırlaması kabul edilebilir. <sup>(1)</sup>

### 3.1.3. İletim Sistemleri Üzerine Etkileri

İletim sistemi (hava hattı veya yer altı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi akım bileşenlerinin oluşturduğu ek  $I^2R$  kayıplarıdır. Bu kayıplar;

$$P_K = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (3.1)$$

şeklinde verilebilir. Deri etkisi ihmal edilir ise  $R_n \rightarrow R$  (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;

$$(\Delta V)_n = I_n Z_n \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttıırırlar. Buda kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda hata sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. Aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıç koruma ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri,

gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi ise, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır. <sup>(10)</sup>

#### 3.1.4. 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.

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

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (3.3)$$

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;

$$I_n = n\omega CU_n \quad (3.4)$$

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

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (3.5)$$

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

$$I_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.6)$$

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

Gerilim bozulması durumunda kondansatörlerde oluşacak ek kayıplar;

$$\text{Ek kayıplar} = \sum_{n=2}^n C(\tan \delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (3.7)$$

Olarak ifade edilir. Burada;

$(\tan \delta)_n$  : kayıp faktörü

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

$V_n$  : n. Geriliminin 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;

$$Q_T = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (3.8)$$

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. <sup>(13)</sup>

### **3.1.5. Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi**

Harmoniklerin frekansının artması ile deri etkisi (skin effect) sonucu iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin temel bileşen omik direnç değerine harmoniklerden dolayı  $R_h$  direnci ilave olmaktadır. Harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri  $R = R_0 + R_h$  olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan



direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören ampirik bir bağıntıyla hesap edilebilir.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (3.9)$$

olmak üzere,

$$0 \leq x \leq 3 \quad \text{için} \quad R = R_0 K_1$$

$$x > 3 \quad \text{için} \quad R = R_0 K_2 \quad (3.10)$$

dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{x^4}{48}} + 1 \right] \quad (3.11)$$

$$K_2 = \left[ \frac{x}{2,828} + 0,26 \right] \quad (3.12)$$

dir.

Burada,

$f$  : frekans

$R_0$  : Doğru akım direnci

$R$  : Deri etkisi dahil direnç

olarak tanımlanmıştır. <sup>(2)</sup>

### 3.1.6. Harmoniklerin Reaktans Üzerindeki Etkisi

Elektrik şebekelerinin (hatların, motorların, transformatörlerin v.b.) modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki değeri  $X_L$  olan bir endüktif reaktansın,  $n$ . harmonikteki endüktif reaktansı;

$$X_{L_n} = nX_L \quad (3.13)$$

değerini alır. Benzer şekilde, temel frekanstaki değeri  $X_C$  olan bir kapasitif reaktansın,  $n$ . harmonikteki kapasitif reaktansı;

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (3.14)$$

değerini alır. Her iki durum içinde, reaktansın lineer bir eleman olduğu kabul edilmektedir. <sup>(1)</sup>

### 3.1.7. Harmoniklerin Kayıplar Üzerindeki Etkisi

Harmonikli akım akan devreler şebekeden,

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^N S_n^2} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilen görünür güç çekerler. Burada  $S_n$ ,  $n$ . harmoniğe ait görünür güçtür.  $n=1$  temel bileşen gücü olduğu için, şebekeden çekilen harmonik güç,

$$S_h = \sqrt{\sum_{n=2}^N S_n^2} \quad (3.16)$$

olacaktır. Omik direnci  $R$  olan bir iletkenin geçen ve  $N$  tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri;

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i_n(t) \quad (3.17)$$

olmak üzere efektif değerinin,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3.18)$$

olduğu bilinmektedir. Bu durumda  $n$ . harmonik için “akım harmoniği oranı” tanımlanırsa;

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (n = 2, 3, \dots, N) \quad (3.19)$$

dir. Üç fazlı sistemlerde oluşacak toplam omik kayıplar;

$$P_K = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 \quad (3.20)$$

dir. Burada,

$R_n$  :  $n$ . harmonik frekansındaki direnç

$I_n$  :  $n$ . harmonik akımının efektif değeridir.

Dirençin frekansla değerinin artması ihmal edilirse toplam omik kayıplar;

$$P_K = 3RI^2 = 3RI_1^2 \left( 1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) \quad (5.21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Formülden de görüldüğü gibi, akım harmoniği arttıkça omik kayıplarda artmaktadır. <sup>(2)</sup>

Manyetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör v.b.) oluşacak demir (nüve) kayıpları ise şu şekilde ifade edilebilir;

Manyetik çekirdekli bir elemana uygulanan gerilimin ani değeri,

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (3.22)$$

ve efektif değeri,

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (3.23)$$

olmak üzere oluşacak demir kayıpları

$$P_{Fe} \cong C_m V^2 = C_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (3.24)$$

veya  $n$ . harmonik için tanımlanan “gerilim harmoniği oranı” ifadesi,

$$\beta_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.25)$$

kullanılarak,

$$P_{Fe} \cong C_m V_1^2 \left( 1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2 \right) \quad (3.26)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$P_{Fe}$  : demir kaybı

$C_m$  : makinenin yapısı ile ilgili bir sabit

$\beta_n$  : gerilim harmoniği oranıdır.

Harmonikli gerilim uygulanan bir kapasite elemanındaki kayıplar ise;

$$\sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (3.27)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada;

$$\tan \delta = R \left( \frac{1}{\omega C} \right) \quad (3.28)$$

ile ifade edilir.

$\tan \delta$  : kayıp faktörü

$\omega_n = 2\pi f_n$  :  $n$ . harmonik için açısal frekans

$V_n$  :  $n$ . harmoniğin efektif değeri. <sup>(2)</sup>

### 3.1.8. Güç Elektroniği Elemanları Üzerine Etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda çok önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktası birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Harmonik bozulmasının bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan elemanlarda da sorunlar çıkabilir. Buna en güzel örnek diyottur. Eleman, dalga şeklinin etkin değerine tam olarak karşılık gelmeyen tepe değerine karşı duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir. Güç elektroniği cihazlarına ait diğer arızaları şöyle sıralayabiliriz;

- a) ölçme cihazlarında hatalar
- b) röleler ve kesicilerde oluşan arızalar
- c) sıfır gerilim geçişli ateşleme devrelerinin kararsız çalışması
- d) motor kontrolleriyle ilgili parazitler. <sup>(13)</sup>

### 3.1.9. Koruyucu Sistemler (Röleler) Üzerine Etkileri

Bilindiği gibi koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik distorsiyonundan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Olabilecek harmoniklerin süzöldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse, elektromanyetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük

oranda ölçme değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim harmoniklerinin mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır;

- ◆ Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleri ile hızlı çalışma eğilimi gösterirler.

- ◆ Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.

- ◆ Aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.

- ◆ Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.

- ◆ Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.

- ◆ Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.

- ◆ Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerinde yapılan testlerden %20' lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı gözlenmiştir. <sup>(10)</sup>

### **3.1.10. Küçük Güçlü Elektrik Tüketicileri Üzerindeki Etkileri**

Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir;

- ◆ Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesini bozabilir.

◆ Flüoresan ve cıva 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 olur ise ısınma ve arızalar oluşur. Flüoresan lambaların kullanıldığı aydınlatma tertibatında yaşlanma etkileri görülür.

◆ Bilgisayarlar, elektrikli cihazlar içinde harmonikle en duyarlı cihazlardır. Ayrıca kendileri de harmonik üretirler. <sup>(10)</sup>

### **3.1.11. Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri**

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüsoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuyabilmektedirler.

Elektrik saatleri ve aşırı akım röleleri gibi indüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akının ve diskte indüklenen girdap akımlarının çarpımı ile orantılıdır. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik distorsiyonunun oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Genelde önemli hataların oluşması için distorsiyon seviyesinin %20' den büyük olması gerekir. <sup>(10)</sup>

### 5.1.12. Harmoniklerin Manyetik Alanlar Üzerine Etkileri

Enerji sistemlerindeki alanların genel formülasyonu; Toprak yüzeyine paralel konumda ve  $z$  eksenini boyunca yerleştirilmiş  $l$  uzunluğundaki bir iletkenin içinden, frekansı  $f$  ve efektif değeri  $I$  olan bir akımın geçmesi halinde ortaya çıkan manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ),  $x, y, z$  uzay koordinatlarında ifade edilebilir.  $B$  alanlarının  $z$  bileşeni sıfır olup,  $x, y$  eksen bileşenleri;

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \frac{h}{x^2 + h^2} + \frac{d}{x^2 + d^2} \right] \quad (3.29)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \frac{x}{x^2 + h^2} + \frac{x}{x^2 + d^2} \right] \quad (3.30)$$

olarak ifade edilir. Burada;

$B_x$  :  $B$  alanının  $x$  eksen bileşeni

$B_y$  :  $B$  alanının  $y$  eksen bileşeni

$\mu_0$  : havanın geçirgenliği

$I$  : akımın efektif değeri

$h$  : iletkenin toprak yüzeyinden yüksekliği

$x$  : mesafe

$d$  : toprağın iletkenliği ile frekansın bir fonksiyonudur.

Başka yaklaşımların kullanılmasıyla bileşke alan;

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{\mu_0 I d}{2\pi \sqrt{x^2 + d^2}} \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Diğer taraftan toprağın homojen yapıda olduğu kabul edilirse, her hangi bir nedenle toprağa bir  $I$  akımının akması halinde, bu akım o noktadan



derinliğe doğru tüm yönlerde yayılır. Akımın geçiş noktası merkez olmak üzere çizilen her yarı küre yüzeyinde, homojen bir  $j$  akım yoğunluğu varolacaktır.

Geçiş noktasından  $x$  uzaklığındaki elektrik alan şiddeti;

$$E = \rho I_t (2\pi x^2)^{-1} \quad (3.32)$$

olacaktır. Burada;

$E$  : elektrik alan şiddeti

$\rho$  : toprağın özgül direnci

$I_t$  : toprağa akan akım

$x$  : toprağa geçiş noktasına olan uzaklık dır.

Harmonikli yükler  $B$  ve  $E$  alanlarında değişikliğe yol açmaktadır.

Sistemin lineer olduğu kabulü ile belirli bir mesafedeki alan değerleri hesaplandığında,  $E$  alanının;

- ◆ Toprağın özgül direnci ile arttığı,
- ◆ Mesafeye bağlı olarak azaldığı,
- ◆ Harmonik mertebesine bağlı olarak düşme gösterdiği, gözlenmiştir.

(19)

### 3.1.13. Alçak Gerilim Tesislerinde Harmonik Kayıpları

Son yıllarda alçak gerilim tesislerinde yaygın olarak görülen sinüsoidal olmayan yükler dolayısıyla, besleme transformatöründen (şebeke girişinden) itibaren tesisin tüm iç fiderlerinde/hatlarında ek harmonik kayıplarının oluşması kaçınılmazdır.

Alçak gerilim tesislerinde harmoniklerin yol açtığı kayıpların bulunması sırasında aşağıdaki ön kabuller göz önüne alınmalıdır:

- ◆ Tüm kaçak şönt kapasiteler ihmal edilebilir düzeydedir.
- ◆ Yükler dışında tüm şebeke elemanları lineer özelliktedir.
- ◆ İletken kısımlardaki deri etkisi ihmal edilmiştir.
- ◆ Analiz, geçici olayların sona erdiği sürekli işletmeye ilişkindir.
- ◆ Göz önüne alınan dönem boyunca, hem yüklenme programı hem de harmonikli yükler değişmemektedir.

- ◆ Karşılıklı kuplaj etkisi ihmal edilmiştir.
- ◆ Toprağın direnci dikkate alınmamıştır.
- ◆ Harmoniklerin besleme transformatörünün demir kayıpları üzerindeki etkisi üzerinde durulmamıştır. (akım harmoniklerinin neden olduğu gerilim harmonikleri oldukça düşük değerlidir; transformatörün “demir kayıpları / bakır kayıpları” oranı da göz önüne alındığında, harmonik demir kayıplarının fazlaca önemli olmadığı açıktır. <sup>(20)</sup>

◆ Harmonik kayıp analizi yapılacak olan tesiste, yapılacak olan ön çalışmalar ise şöyle özetlenebilir:

◆ Tesiste mevcut harmonikli yükler bir fazlı ve üç fazlı olarak ayrılmalıdır.

◆ Tesisin topolojisi, hat parametreleri, mevcut reaktif güç kompanzasyon üniteleri, bunların harmoniklerin süzülmesine katkıları ortaya konulmalıdır.

- ◆ Günlük veya haftalık yüklenme periyodu boyunca yüklerin;
  - yükleme karakteristiği (harmonik spektrumu)
  - (varsa) akım dengesizliği (fazların harmonik spektrumu)

- özel yüklenme zamanları (hafta sonu v.b.) belirlenmelidir.

◆ Şebeke girişindeki (besleme transformatöründeki) giriş akımı belirlenmelidir.

◆ Tesisin devre topolojisi, hat parametreleri, mevcut reaktif güç üniteleri göz önünde bulundurulmalıdır. <sup>(20)</sup>

Açık gerilim tesisinde harmonik kayıpları, pratik olarak, ölçme ve analitik yaklaşımın bir arada kullanılmasıyla ortaya konulabilir. Bu çerçevede ölçme kapsamında yapılacak işler şöyle özetlenebilir;

◆ Her hat parçasındaki faz akımlarının (R-S-T) harmonik bileşenleri ölçülür, besleme transformatörünün akımı da ölçülür.

◆ Nötr iletkeninin her parçasında (tek yük olması halinde nötr iletkeninin her hangi bir yerinde) akımın harmonik bileşenleri ölçülür.

◆ (varsa) transformatörün yıldız noktası ile toprak arasındaki direnç ( $R_0$ ) ölçülür; deri etkisi ihmal edildiği için, hat ve nötr iletkeni parçalarının omik dirençleri (ohm/metre) ile uzunlukların çarpımına eşittir. <sup>(20)</sup>

Bu ölçme sonuçları yardımıyla tesis üzerindeki harmoniklerden kaynaklanan “Ek kayıp güç” hesaplanabilir. Ancak kayıp ifadelerinin, belirli bir zaman aralığında ( $(t_1, \dots, t_2)$ ) gibi verilmesi gerekir. İncelenen işletme süresi ( $T$ ) “gün” alındığında;

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_M \quad (3.33)$$

yazılabilir. Burada;

$M$  : göz önüne alınan farklı işletme periyodu sayısı

ek harmonik kayıp güç ise ;

$$\Delta P_{hat} = \sum_{j=1}^L R_j \left( \overrightarrow{I_{Rj}}^2 + \overrightarrow{I_{Sj}}^2 + \overrightarrow{I_{Tj}}^2 + \overrightarrow{I_{n\ddot{o}tr}}^2 \right) \quad (3.34)$$

olarak yazılabilir. Burada;

$L$  : tesisteki hat/kablo parçalarının sayısı

$R_j$  :  $j$ . hat parçasının omik direncini

$I$  : sinüsoidal akımdan (temel bileşen akımdan) arındırılmış akımlardır.

Burada  $n$  harmonik mertebesi olmak üzere,

$$\vec{I} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} \quad (3.35)$$

şeklindedir.

Diğer taraftan besleme transformatöründeki sargı (bakır) kayıpları harmoniklerin etkisi ile artış gösterecektir. Söz konusu ek kayıplar;

$$\Delta P_{Cu} = \left( \frac{P_{CuN}}{3} \right) \left[ \left( \frac{\overrightarrow{I_R}}{I_N} \right)^2 + \left( \frac{\overrightarrow{I_S}}{I_N} \right)^2 + \left( \frac{\overrightarrow{I_T}}{I_N} \right)^2 + R_0 \text{Fonk}(\overrightarrow{I_{n\ddot{o}tr}}) \right] \quad (3.36)$$

olacaktır. Burada;

$P_{CuN}$  : transformatörün etiketinde yazılı olan dengeli sinüsoidal yüklenmedeki anma bakır kayıpları

$I_R, I_S, I_T$  : faz akımlarını

$I_N$  : transformatörün anma akımını

$R_0$  : yıldız noktasını toprağa bağlayan direncin değeridir.

Burada transformatörün yıldız noktasının toprağa bağlayan  $R_0$  direnci üzerinden toprağa akım geçmesi halinde denklem 3.36' da ki son bileşen hesaba girmiş olacaktır. Yıldız noktasının doğrudan topraklı olması halinde  $R_0 = 0$  alınacaktır.

Böylece harmonikler dolayısıyla oluşan toplam ek kayıp güç (3.34) ve (3.36) nolu denklemlerin toplamına eşit olacaktır,

$$\Delta P_K = \Delta P_{har} + \Delta P_{Cu} \quad (3.37)$$

Bu kayıp güç, göz önüne alınır  $T$  periyodu boyunca değişiklik göstereceğinden “toplam harmonik kayıp enerji miktarı  $t_1, t_2, \dots$  için hesaplanmalıdır.”<sup>(20)</sup>

### 3.1.14. Harmonik Kayıpların Enerji Maliyetine Etkisi

Harmonik meydana getirdiği kayıp enerji maliyetinin belirli bir fatura dönemindeki (örneğin, bir aylık dönemde) maliyeti, “toplam harmonik kayıp enerji” ile o dönemde geçerli olan enerji tarifesi ( $YTL/kWh$ ) çarpımına eşittir. Enerji tarifesinin uzun süre sabit olmadığı bilinmektedir. Bir yıl boyunca enerji tarifi ( $YTL/kWh$ ) cinsinden  $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{12})$  gibi bir dizi ile gösterilebilir. Buradan, fiyat artışı sebebi ile  $a_{12} = a_{max}$  olacaktır; 12. ay sonunda aylık harmonik enerji maliyeti maksimuma ulaşacaktır. Bu durum nakit akış tablosu ile ortaya konulabilir. Nakit akış tablosu örneği Çizelge 3.1’de verilmiştir.<sup>(20)</sup>

Zaman (Ay)	Harmonik Kayıp Enerji Maliyeti
1	
2	
...	...
12	

**Çizelge 3.1.** Nakit Akış Tablosu <sup>(20)</sup>

( $YTL/kWh$ ) enerji tarifesinin her ay belirli bir düzende artış göstermesi, gradyent veya geometrik seri yaklaşımlarının kullanılmasına imkan verir. Harmonik kayıp maliyetinin en aza indirilmesi kapsamında, en etkin harmonikten başlayarak bazı harmoniklerin süzülmesi gerekir.  $N$ . harmoniğin toplam harmonik kayıp enerji içindeki payı  $(I_n/I)^2$  ile orantılıdır. (3.34), (3.35), (3.36) ve 3.37)nolu ifadeler yardımıyla harmonik bileşenlerin yol açtığı kayıplar hesaplanabilir. Bu durumda  $n$ . harmoniği süzmek için kurulacak filtrenin maliyeti  $M_{Fn}$ , malzeme montajı, işletme v.b. maliyet bileşenleri halinde ortaya konulabilir. Filtre devresinin  $T$  zaman boyunca maliyetinin şimdiki değeri;

$$M_{Fn-SD} = M_{Fn} + M_{Fn} \frac{(1+i)^T - 1}{i(1+i)^T} - HD_{Fn} (1+i)^{-T} \quad (3.38)$$

yazılabilir. Burada;

$M_{Fn}$  : dönemlik işletme maliyeti

$i$  :  $T$  dönemi süresince paranın geçerli zaman değeri

$T$  : zaman

$HD$  : hurda değeridir.

Hurda girişi işletmeye nakit girişi sağlayacağı için, şimdiki değer maliyetini azaltıcı rol oynamaktadır. Bir işletme için paranın şimdiki değeri (kasasındaki para akışının şu anki değeri) nem taşımaktadır. Alçak gerilim tesislerinde  $M_{Fn}$  ile  $HD$  ihmal edilebilir düzeye olduğu için, doğrudan malzeme ve montaj maliyeti dikkate alınabilir. <sup>(20)</sup>

### 3.2. Harmoniklerin Belirlenmesi

Harmoniklerin belirlenmesi için şu yollardan herhangi biri izlenebilir;

a) Osiloskop ıktısı alındıktan sonra, zaman eksenini boyunca dalga olabildiğince sık dilimler ayrılır; ikinci bölümde anlatılan fourier katsayılarının grafik yöntemle bulunması metodunu uygulayarak fourier katsayıları  $(A_n, B_n)$  hesaplanır ve sonuçta harmonikler hesaplanmış olur.

b) Portatif harmonik ölçü aleti yardımıyla, elemanın bağlantı noktasından ölçüm yapılır. Klamp (pens) tipi harmonik ölçü aletleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Klamp içinden faz iletkeni veya nötr iletken geçirilerek akım harmonikleri ölçülürken, ilgili klemens uçlarına gerilim problemleri bağlanarak gerilim harmonikleri de ölçülebilmektedir.

c) “Harmonik Analizör” ile ölçülebilir. Burada anlık lme yada kayıtlı lme yapılabilir. Harmonik analizörler bilgisayar destekli lme üniteleridir. PC veya diz üstü bilgisayarlardan özel yan donanım kullanılarak yararlanılabileceği gibi, geliştirilmiş özel harmonik analizörlerde mevcuttur. <sup>(18)</sup>

lme yapılacak yerde harmonikler sürekli olarak genlik ve merteye bakımından değişiklik gösteriyorsa ve çok sayıda noktanın ölçüm değeri belirlenecekse, (a) şıkkındaki yöntem çok sayıdaki dalgenin sık dilimleri için ayrı ayrı data girişi söz konusu olduğundan hayli zaman alacağından pratik

olmaz. T zaman boyunca (örneğin, 24 saat) bir noktadan (çoğu kez tesisin giriş noktasından) harmonik aktivite ölçülmek istendiğinde (c) şıkkındaki yöntem uygundur. (b) şıkkında verilen portatif ölçü aletleri, hem taşınma kolaylığı hem de tesisin her hangi bir noktasından rahatlıkla ölçme yapılmasına imkan verdiği için çok tercih edilmektedir. Gerek portatif ölçü aleti gerekse harmonik analizörün kullanımı sırasında;

- ◆ Ölçebileceği maksimum akım
- ◆ Ölçebildiği maksimum harmonik mertebesi
- ◆ Fonksiyonel özellikleri (kayıt imkanı, mönü özellikleri, v.b.)

göz önünde bulundurulmalıdır. <sup>(18)</sup>

Bir yükün harmonik içerip içermediği, yukarıdaki yollardan birisi yardımıyla belirlenmektedir. Bunlar dışında şu şekillerle de bir fikir sahibi olunabilir:

- ◆ İlgili cihazın  $v-i$  karakteristiği deneysel olarak çıkartılır. Karakteristik lineer özellikte değil ise harmonik olduğu anlaşılır. Benzer şekilde elemanın empedansının  $Z = \text{Re}(Z) + j\text{Im}(Z)$  değişimi elde edilebilir. Düşey eksen empedansın imajiner kısmını, yatay eksen de empedansın reel kısmını göstermek üzere elde edilmiş olan karakteristiğin lineer olup olmadığına bakılır.

- ◆ Tepe değer ölçen ölçü aleti ile ölçülen değer ve efektif değer ölçen ölçü aleti ile ölçülen değer arasındaki oran 1.414' e eşit değil ise harmonikler söz konusudur.

- ◆ İncelenecek olan eleman (yük), bilinen harmonik kaynakları kategorisinde ise; bu durumda yükün harmonik içerip içermediği değil, hangi mertebeden harmonik içerdiği kontrol edilecek demektir.



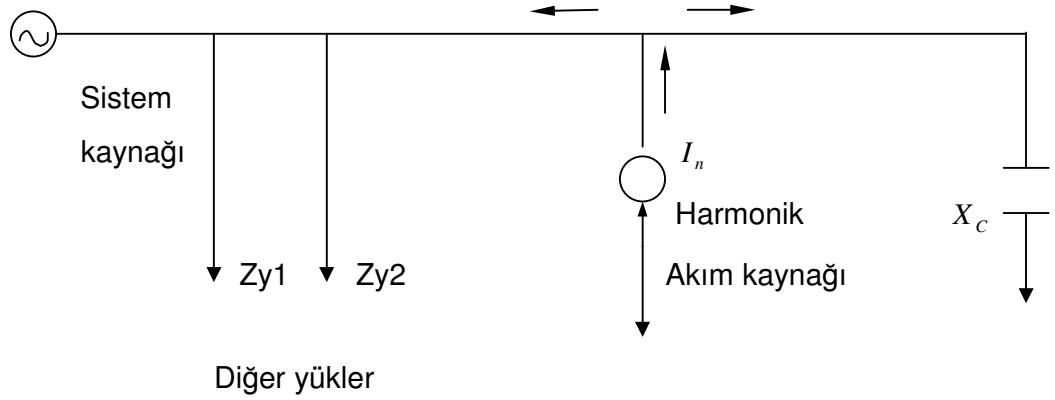
- ◆ Doğrultucu, evirici çıkışları, genellikle harmonik içermektedir. <sup>(18)</sup>

### 3.3. Akım ve Gerilim Harmonikleri

Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının paralel eşdeğerlerinin toplamıdır. Genelde sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yüklerin toplam empedansından (paralel eşdeğer toplam) çok daha düşüktür. Harmonik akımları, çok büyük miktarı sistem kaynağına akmak üzere, empedans oranlarına göre bölünecektir. Daha yüksek mertebeli harmonik akımları ise, yüksek frekanslarda düşük bir empedans gösteren kondansatörlere doğru akacaktır. Şekil 3.1.' de harmonik akımlarının akış yönü görülmektedir. <sup>(9)</sup>

Akım harmonikleri lineer olmayan yüklerden kaynaklandıkları halde, gerilim harmonikleri;

- ◆ Bazı elemanların çıkış (uç) gerilimlerinin sinüsten sapması,
- ◆ Harmonikli akımların hat parçaları boyunca oluşturduğu "harmonik frekanslı gerilim düşümleri",
- ◆ Seyrek de olsa orta gerilim şebekesinden kaynaklanan ve giriş trafosuna yansıyan gerilim distorsiyonu, biçimlerinde ortaya çıkabilir. <sup>(18)</sup>



**Şekil 3.1.** Harmonik akımlarının akış yönü <sup>(18)</sup>

Akım harmoniklerinin faz açılarının da bilinmesi, harmonik analizi için gereklidir. Çünkü akım harmonikleri analiz için veri durumundadır. Gerilim harmoniklerinin faz açılarının bilinmesi çoğu kez gerekli değildir. Çünkü bu harmonikler simülasyon sonunda çıktı olarak belirlenmektedir. Zaten gerilim harmoniklerinin genlikleri oldukça küçük olduğu için, çok duyarlı ölçümleri hayli güçtür. Fakat besleme noktasının önemli ölçüde gerilim harmonikleri içermesi halinde, gerilim harmoniklerinin faz açıları da gerekli olabilmektedir.<sup>(18)</sup>

### 3.3.1. Akım ve gerilim harmonikleri arasındaki ilişki

Güç sistemlerinde gerilim harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren akım, sadece harmonik akımı üreten bir yüke etki edebilir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni, sistem empedansında akan harmonikli bir akımdır. Bu nedenle, gerilim harmoniklerini önlemenin yolu, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır.

Sistemin herhangi bir yerinde oluşan harmonik akımlarının her zaman sorunlara neden olacağı söylenemez. Güç sistemi herhangi bir sorun oluşturmadan önemli miktarda harmonik akımı taşıyabilir. Bir sorunun ortaya çıkması için harmonikli akımın yüksek bir empedans yolunda veya iletişim devrelerinde akması gerekir.

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa, gerilim de harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır.

Bir elemanın doğrusal olması demek akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal olmaması demektir. Bu eleman tam sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlandığında elemanın akımı, tam sinüs biçimli bir akım kaynağına bağlandığında ise elemanın gerilimi harmonik bileşenler içerecektir. Yani, doğrusal olmayan bir elemanın akım veya geriliminden herhangi birisi veya her ikisi birden harmonik bileşenler içerebilir, fakat her ikisi birden tam sinüs biçimli olamaz.

Sistem kaynağının empedansı yük empedansına göre genelde çok daha düşük olduğundan, sistemdeki gerilim harmonik seviyeleri bazen izin verilebilir seviyeleri aşmasına rağmen genelde düşüktür. Sistemdeki akım dalga şekli yaklaşık olarak sabittir ve doğrusal olmayan yükler sabit harmonik akım kaynakları olarak düşünülebilirler.

Sonuç olarak, doğrusal olmayan yüklerin etkisi, özellikle sistem empedansına olmak üzere sistem karakteristiklerine de bağlıdır. <sup>(13)</sup>

### 3.3.2. Akım ve gerilim harmoniklerinin ani değeri

Fourier teoremine göre periyodik bir gerilim dalgasının ani değeri;

$$e = E_{m1} \sin(\omega t + \alpha_1) + E_{m2} \sin(2\omega t + \alpha_2) + E_{m3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots \dots \dots$$
$$\dots \dots \dots + E_{mn} \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.39)$$

ve akım dalgasının ani değeri yine benzeri şekilde;

$$i = I_{m1} \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m2} \sin(2\omega t + \beta_2) + I_{m3} \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots \dots \dots$$
$$\dots \dots \dots + I_{mn} \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.40)$$

bu denklemlerde;

$E_{m1}$  : Temel gerilim dalgasının maksimum değeri

$E_{mn}$  : n. harmonik geriliminin maksimum değeri

$\alpha_1$  : Temel gerilim dalgasının faz farkı

$\alpha_n$  : n. harmonik geriliminin faz farkı

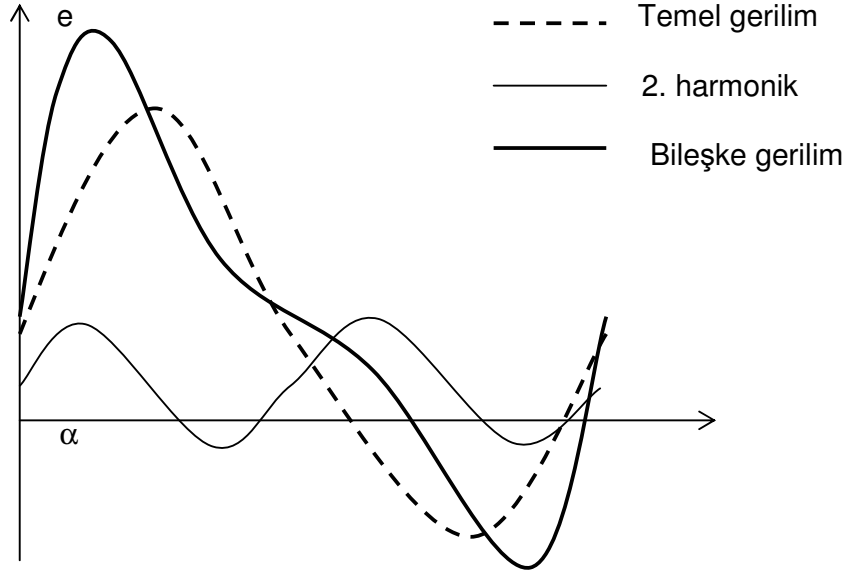
$I_{m1}$  : Temel akım dalgasının maksimum değeri

$I_{mn}$  : n. harmonik akımının maksimum değeri

$\beta_1$  : Temel akım dalgasının faz farkı

$\beta_n$  : n. harmonik akımının faz farkı

Çift harmonikler Şekil 3.2.' de gösterilmiştir. Şekil 3.2.' de  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  dır. Şekilden de görüldüğü gibi çift harmonikler yarım dalga simetrisini bozmaktadırlar. <sup>(3)</sup>



**Şekil 3.2.** Çift harmoniklerin temel dalga gerilimine etkisi <sup>(3)</sup>

Tek harmonikler ise Şekil 3.3.' de gösterilmiştir. Şekil 3.3.' de  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  dir. . Şekilden de görüldüğü gibi tek harmonik dalgalarının varlığı, periyodik dalgaların yarım dalga simetrisini bozmamaktadır. <sup>(3)</sup>

Devirleri sabit olan alternatörlerde yarım dalga simetrisi bozulmadığından dolayı, çift harmoniklere rastlanmaz. Uygulamalarda sadece tek harmonik değerleri ve bunlarında ilk üç yada dört terimi ele alınır. Böylece ani değer az bir hata ile kolay bir şekilde hesaplanabilir. Bu durumda kompleks ani akım değeri;

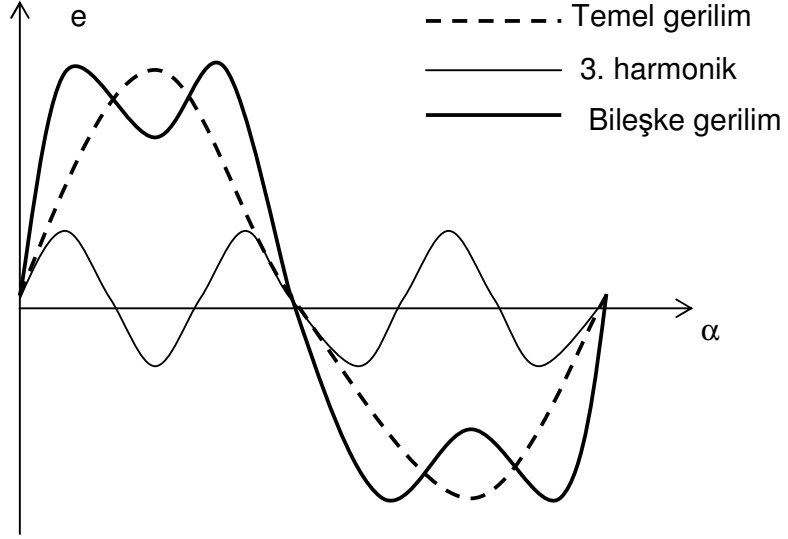
$$i = I_{m1} \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m3} \sin(3\omega t + \beta_3) + I_{m5} \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots \dots \dots + I_{mn} \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.41)$$

ve ani gerilim değeri;

$$e = E_{m1} \sin(\omega t + \alpha_1) + E_{m3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + E_{m5} \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots \dots \dots$$

$$\dots\dots\dots + E_{mn} \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.42)$$

olur. <sup>(3)</sup>



**Şekil 3.3.** Tek harmoniklerin temel dalga gerilimine etkisi. <sup>(3)</sup>

### 3.3.3. Akım ve gerilim harmoniklerinin efektif değeri

Periyodik bir akım dalgasının efektif değeri,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (3.43)$$

dir.

Elektrik makinelerinde konstrüksiyon bakımından çift harmonik bulunmadığı için ani kompleks akım değerinin karesi;

$$\begin{aligned} i^2 &= I_{m1}^2 \sin^2(\omega t + \beta_1) + I_{m3}^2 \sin^2(3\omega t + \beta_3) + I_{m5}^2 \sin^2(5\omega t + \beta_5) + \dots\dots\dots \\ &\dots\dots + 2I_{m1}I_{m3} \sin(\omega t + \beta_1)\sin(3\omega t + \beta_3) + \\ &2I_{m1}I_{m5} \sin(\omega t + \beta_1)\sin(5\omega t + \beta_5) + \dots\dots\dots \end{aligned} \quad (3.44)$$

burada  $\sin^2$  ile ayrı frekanslarda sinüs çarpımları terimlerinin buldukları görülmektedir. Herhangi bir açının sinüsünün karesinin ortalaması  $1/2$  ve iki ayrı frekanslı sinüslerin çarpımlarının ortalaması sıfırdır.

Bu söylenenler doğrultusunda kompleks akımın efektif değeri; denklem (3.44), denklem (3.43)' de yerine konarak;

$$I = \sqrt{\frac{I_{m1}^2 + I_{m3}^2 + I_{m5}^2 + \dots + I_{mn}^2}{2}} \quad (3.45)$$

elde edilir. Aynı işlemler efektif gerilim değerini bulmak için tekrarlandığında;

$$E = \sqrt{\frac{E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + \dots + E_{mn}^2}{2}} \quad (3.46)$$

elde edilir. <sup>(3)</sup>

### 3.4. Harmonikli Sistemlerde Aktif Güç

Sistemde harcanan aktif güç;

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e idt \quad (3.47)$$

formülü ile bulunur. Denklem (3.41) ve (3.42)' deki değerler denklem (3.43)' da yerine konulup gerekli işlemler yapıldığında aktif güç değeri;

$$P = \frac{E_{m1}I_{m1}}{2} \cos(\alpha_1 - \beta_1) + \frac{E_{m3}I_{m3}}{2} \cos(\alpha_3 - \beta_3) + \frac{E_{m5}I_{m5}}{2} \cos(\alpha_5 - \beta_5) + \dots + \frac{E_{mn}I_{mn}}{2} \cos(\alpha_n - \beta_n) \quad (3.48)$$

ile bulunabilir. <sup>(3)</sup>

### 3.5. Harmonikli Sistemlerde Görünür Güç

Sistemin görünür gücü, denklem (3.7) ve (3.8)' de verilen akım ve gerilimin efektif değerlerinin çarpımıyla kolayca bulunabilir. Buna göre görünür güç;

$$S = EI = \sqrt{\frac{E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + \dots + E_{mn}^2}{2}} \sqrt{\frac{I_{m1}^2 + I_{m3}^2 + I_{m5}^2 + \dots + I_{mn}^2}{2}} \quad (3.49)$$

olarak bulunur. <sup>(3)</sup>

### 3.6. 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 kompanzasyonu amacıyla kullanılan kondansatörler oluşturur.

Tesise uygulanan gerilimin sinüsoidal olması durumunda yani gerilimin 50 Hz temel frekansa sahip olması durumunda, bir rezonans söz konusu olmamaktadır. Çünkü kompanzasyon 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.

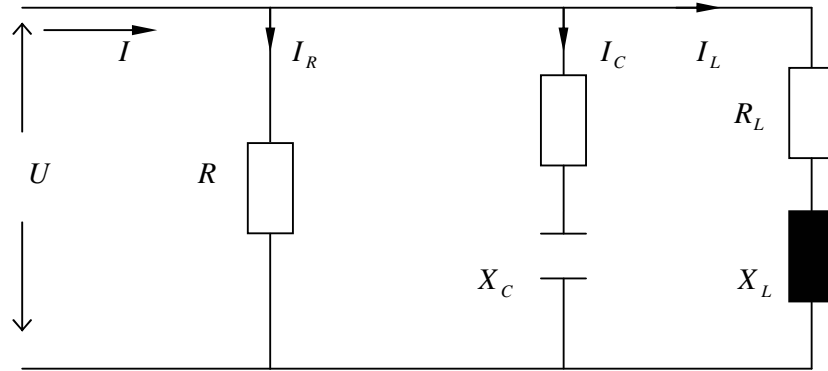


Frekansla kapasitif direnç değerinin ters orantılı olarak değişmesi sebebiyle, yüksek harmonik değerlerinde şebekeden yüksek kapasitif akımlar çekilir, bu da şebekenin zorlanmasına ve arızalarına yol açar. <sup>(3)</sup>

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

### 3.6.1. Paralel rezonans

Paralel rezonans durumunu izleyebileceğimiz devre Şekil.3.4. de gösterilmiştir.



Şekil 3.4.  $R, L, C$  paralel rezonans devresi <sup>(3)</sup>

Rezonans durumunu inceleyebileceğimiz bu tür devrelerle şebekenin çeşitli yerlerinde karşılaşılabılır. Örneğin ayrıık kompanzasyonun uygulandığı transformatör veya motorun endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansı arasında rezonans oluşabilir. Bunlara paralel bağlı  $R$  değerini de bobinin demir kayıpları ile kondansatörün dielektrik kayıpları teşkil eder. Bobin

ve kondansatöre seri bağlı dirençler ise bobinin sargı direnci ile kondansatörün iç direncidir ve bu değerler ihmal edilebilir. <sup>(3)</sup>

Şekildeki devrenin kol akımlarını yazacak olursak;

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}}{R} \quad (3.50)$$

$$\vec{I}_L = \frac{\vec{U}}{jX_L} = -j \frac{\vec{U}}{X_L} \quad (3.51)$$

$$\vec{I}_C = \frac{\vec{U}}{-jX_C} = j \frac{\vec{U}}{X_C} \quad (3.52)$$

olur. Toplam devre akımı ise;

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C = \vec{U} \left[ \frac{1}{R} + j \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) \right] \quad (3.53)$$

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

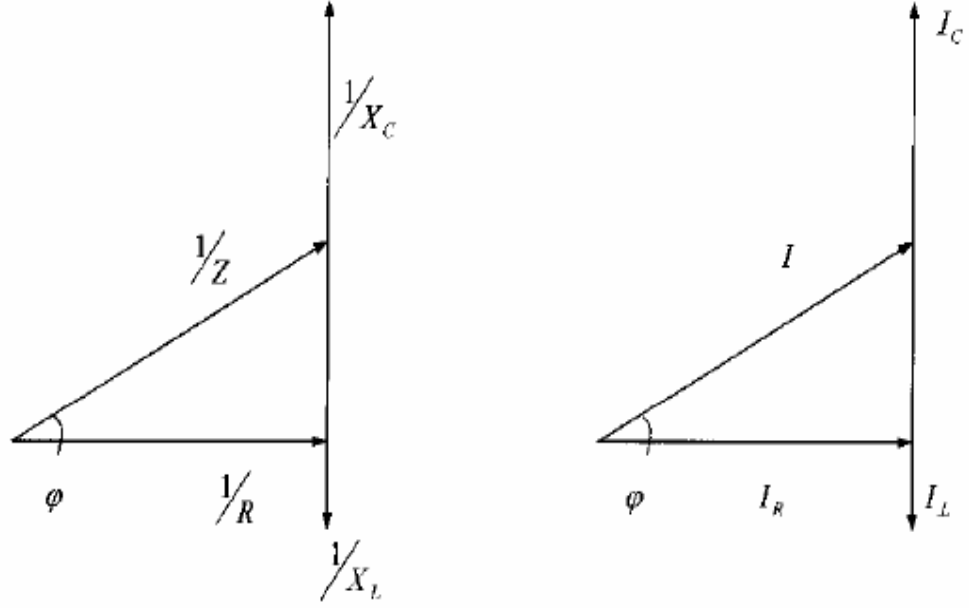
$$\vec{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)} \quad (3.54)$$

olur. Şekil 3.4.' de verilen ve formülleri çıkarılan devrenin fazör diyagramları

Şekil 3.5.' de verilmiştir. Şekil 3.5.a' da empedans diyagramı, Şekil 3.5.b' de ise

şebekeden çekilen akımın fazör diyagramı gösterilmektedir. devrede  $\frac{1}{X_C} > \frac{1}{X_L}$

kabul edildiği için devre kapasitif özellik göstermiştir. <sup>(3)</sup>



**Şekil 3.5.** a) Paralel rezonans devresinin admitans diyagramı  
b) Paralel rezonans devresinin akım diyagramı <sup>(3)</sup>

Rezonans durumunda  $I_C = I_L$  olacağından;

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L} \Rightarrow 2\pi f_r C = \frac{1}{2\pi f_r L} \quad (3.55)$$

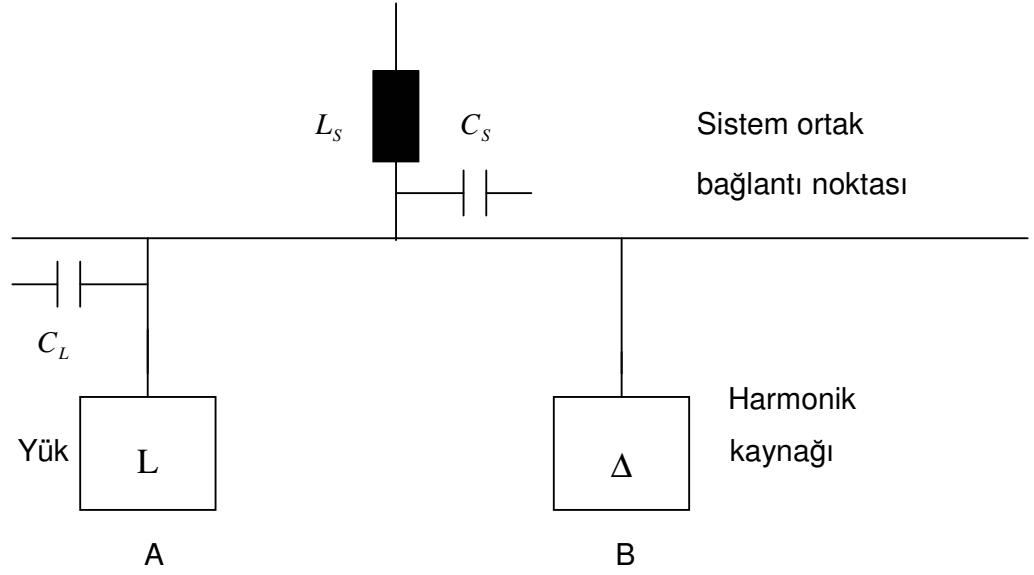
olur. Buradan rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.56)$$

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. <sup>(3)</sup>

Uygulamada en çok karşılaşılan paralel rezonans devresi Şekil 3.6.' da 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. <sup>(10)</sup>



**Şekil 3.6.** Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşumu <sup>(10)</sup>

Şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilirse rezonans frekansı;

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (3.57)$$

yazılabilir. Burada;

$f$  : temel frekansı

$f_r$  : rezonans frekansını

$S_s$  : şebekenin kısa devre gücünü

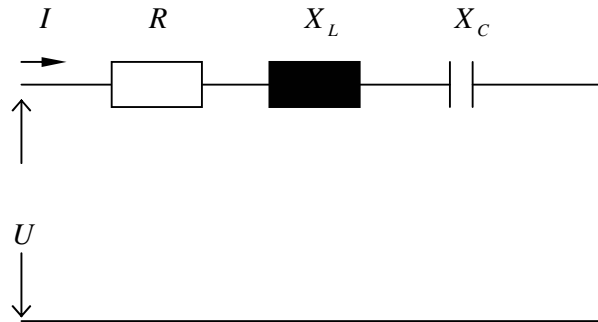
$S_c$  : kapasitenin nominal gücünü

göstermektedir.

Şekil 3.6.'da 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. <sup>(10)</sup>

### 3.6.2. Seri rezonans

Seri rezonans  $R, L, C$  elemanlarının birbirine seri bağlı olduğu sistemlerde görülmektedir. Bu durum Şekil 3.7.' de basit olarak ifade edilmiştir.



**Şekil 3.7.**  $R, L, C$  seri rezonans devresi <sup>(3)</sup>

Böyle bir rezonans durumu; aynı şebekeyi besleyen iki transformatörün bulunduğu bir sistemde, kompanzasyon amacıyla kullanılan

kondansatörün kapasitif reaktansı ile hattın ve transformatörlerin endüktif reaktansları arasında söz konusu olabilir. Şekildeki omik yükü; İletim hattında, transformatörün sargılarında ve kondansatörlerde ısı şeklinde açığa çıkan kayıplar oluşturur. <sup>(3)</sup>

Şekildeki elemanlar üzerindeki gerilim düşümleri;

$$\vec{U}_R = \vec{I}R \quad (3.58)$$

$$\vec{U}_X = \vec{I}jX_L \quad (3.59)$$

$$\vec{U}_C = -\vec{I}jX_C \quad (3.60)$$

dir. Toplam devre gerilimi ise;

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{U}_C \quad (3.61)$$

$$\vec{U} = \vec{I}\vec{Z} \quad (3.62)$$

olur. Devre empedansı;

$$\vec{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (3.63)$$

dir. Rezonans durumunda;

$$X_L = X_C \Rightarrow 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (3.64)$$

dir. Buradan rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.65)$$

olur. Devre akımı;

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{\vec{U}}{R + j(X_L - X_C)} \quad (3.66)$$

dir. Rezonans durumunda bu akım;

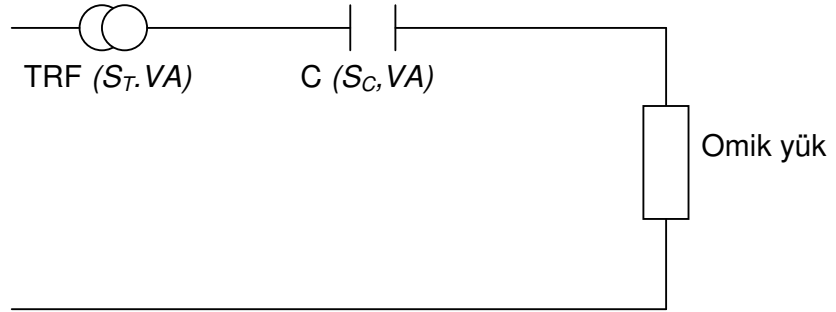
$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}}{R} \quad (3.67)$$

olur.  $R < (X_L + X_C)$  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 dalga akımının biçimini belirli bir oranda bozacaktır. Bu durumda da kondansatör ve endüktör uçlarında oluşan gerilimler, bu elemanlara zarar verecek şekilde artacaktır. <sup>(3)</sup>

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

Uygulamada karşılaşılan bir seri rezonans devresi Şekil 3.8.'de verilmiştir. (10)

( $S_C, VA$ )



**Şekil 3.8.** Seri rezonans devresi <sup>(10)</sup>

Bu durumda seri rezonans koşulu ise;

$$f_s = f \sqrt{\frac{S_T}{S_C Z_T} - \frac{S_1^2}{S_C^2}} \quad (3.68)$$

dir. Burada;

$f_s$  : seri rezonans frekansını

$S_T$  : transformatörün nominal gücünü

$S_C$  : sistemdeki kapasitenin gücünü

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

$S_1$  : omik yükün gücünü göstermektedir.

Seri rezonans, rezonans frekansıyla 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. <sup>(10)</sup>

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 yollarında 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. <sup>(10)</sup>



### 3.6.3. Seri rezonansı önleyici tedbirler

Seri rezonansın olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla alınacak bazı tedbirler, sistem güvenliği ve sistem kayıplarının azaltılması açısından etkili olacaktır.

Seri rezonansı önleyecek birkaç yöntem sıralanacak olursa;

1) Rezonansı meydana getirebilecek harmonik frekanslarından genlik değeri yüksek olanlarının etkisini yok etmek için, bu harmonik mertebelerini süzecek süzgeç devreleri yerleştirmek

2) Kompanzasyon için gerekli kondansatör değerinin haricindeki kapasitif yükleri devreden çıkarmak. Bu durum şebeke yükünün azalmasıyla ortaya çıkar. Kondansatörlerin devreye giriş çıkış işlemi, sisteme bağlanacak otomatik  $\cos \phi$  regülatörü ile sağlanabilir.

3) Devreye yerleştirilecek omik direnç vasıtasıyla rezonans akımları teorik olarak sınırlanabilir. Fakat eklenen her direnç fazladan enerji sarfiyatına neden olduğundan dolayı kullanışsızdır.

4) Kompanzasyon yapmak amacıyla hesaplar yapılırken; bağlanacak kondansatör değeri ile tesisteki mevcut motor, transformatör ve hatların endüktif direnç değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonansa sebebiyet verecek harmonik frekanslarından kaçınılmalıdır. Örneğin kurduğumuz kompanzasyon tesisinin rezonans frekansını mevcut harmonik frekans değerlerinde seçmemeliyiz. Mesela sistemimiz 175 Hz de rezonans oluşturuyorsa, bu frekans değerinde harmonik mevcut olmadığı için rezonans oluşmayacaktır. Bu yöntemin eksik yanı kompanzasyonun istenilen değerde yapılamıyor olmasıdır.

5) Rezonans frekansını düşürmek amacıyla kondansatöre seri bir self bobini yerleştirmek. Bu durumda harmonik akımlarının etkisi azalacaktır. Yani harmonik mertebesiyle doğru orantılı olarak artan kondansatör akımı, yine doğru orantılı olarak artan self bobininin endüktif reaktansı tarafından sınırlanacaktır. Bu sebeple harmonik akımı kondansatöre zarar verici bir noktaya gelmeyecektir. Bobinin ısı kaybı da az olduğu için ekonomik olacaktır. Kondansatöre seri bağlanacak self bobininin reaktif direnci hesaplanırken; kompanzasyon yapılacak noktadan itibaren santrale kadarki sistemin direncini göz önünde bulundurmak gereklidir. <sup>(3)</sup>

### 3.7. Harmoniklerin Giderilmesi

Sistem üzerine olumsuz etkisi görülen harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için bazı önlemler alınabilir:

- ◆ Zararlı genliğe sahip harmonik mertebeleri kesinlikle filtreler vasıtasıyla süzülmalıdır.
- ◆ Elektrik enerjisinin üretimi sırasında harmonik gerilimi üretimine sebebiyet vermemek için gerekli önlemler alınmalıdır. (Generatör kutup tasarımının uygun yapılması gibi).
- ◆ Harmonik akımları üreten transformatör gibi elemanların demir çekirdek kesitlerinin yeterli büyüklükte seçilerek manyetik devresinde doyma meydana gelmesine engel olunmalıdır.
- ◆ Transformatörlerde uygun bağlantı şekilleri kullanılarak en çok zararlı etkisi görülen 3., 5. ve 7. harmonikler sisteme verilmeyebilir.
- ◆ Harmonik akımları talep eden çeviricilerin darbe sayıları artırılarak (mesela 6 yerine 12,30 gibi) bu olumsuz etkileri kısıtlanabilir.
- ◆ Harmonik değerlerine kısıtlamalar getirilmelidir. Belirli değerlerin üzerine çıkan harmonikli yüklerin kullanılmasına izin verilmemelidir.
- ◆ En çok harmonikli akım çeken alıcıların bulunduğu sanayi kesiminde yılın belirli zamanlarında periyodik olarak yapılacak harmonik

ölçümlerle kontroller yapılmalıdır. İstenilen değerlerin dışına çıkan alıcılara müsaade edilmemelidir.

◆ Elektrik dağıtım şirketi tarafından sistemden harmonikli akım talep eden alıcılara özel fiyat uygulaması getirilmelidir. Böylelikle alıcılar harmonikleri önleyici tedbirleri almaya zorlanacaktır. <sup>(3)</sup>

Harmoniklerin önlenmesi için alınabilecek tedbirlerin en önemlileri, tasarım sırasında alınabilecek önlemler ve filtre devrelerinin kullanılmasıdır. Tasarım sırasında alınabilecek önlemler, harmonik üreten kaynaklar kısmında ayrı ayrı incelenirken her harmonik kaynağı için harmonik üretmemesi için alınabilecek önlemlere de değinilmiştir. Bu kısımda harmonikleri önlemede etkili diğer yol olan harmonik filtreleri üzerinde durulacaktır.

### 3.7.1. Harmonik Filtreleri

Harmonik filtrelerin genel amacı, bir veya daha fazla sabit frekanstaki akım ve gerilim harmoniklerinin etkisini azaltmak veya yok etmektir. Bir filtrenin kullanılma nedenlerinin başında;

- ◆ Bir doğrultucudan beslenen yükün gerilim harmoniğini azaltmak
- ◆ Bir eviricinin çıkış dalga şeklindeki harmonikleri azaltmak
- ◆ Şebekeye geri gönderilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek

◆ Radyo frekans girişimlerini yok etmek gelir. <sup>(10)</sup>

Güç sistemlerinde istenmeyen harmonik akımlar iki şekilde önlenebilir:

1) Yüksek değerli seri empedans (seri filtre) kullanılarak harmonik akımlarının yollarının kesilmesi

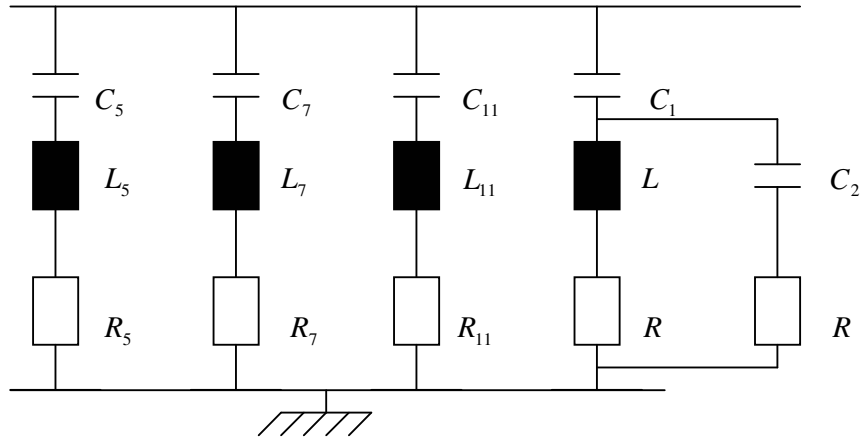
2) Düşük değerli paralel empedans (paralel filtre) kullanılarak harmonik akımların yönlerinin değiştirilmesi. <sup>(1)</sup>

Harmonik filtrelerinde amaç, sadece özel bir frekanstaki işaretin güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girmesini önlemek olduğundan, seri filtreler kullanılır. Bu süzgeç ilgili frekanstaki işarete karşı büyük bir empedans gibi davranır. Fakat bu çözüm kaynakta ortaya çıkan harmoniklerin süzülmesi için çok kullanılan bir yöntem değildir. Kaynakta harmonikleri engellemek, bu cihazların çalışmasını engellemek anlamına gelecektir. Statik dönüştürücüler

gibi harmonik üreten cihazlarda düşük empedanslı paralel bir filtre yardımıyla harmoniklerin sisteme geçmesi engellenir.

Seri filtreler, tüm yük akımını taşımak zorundadırlar. Buna karşılık paralel filtreler, hangi anma değeri gerekiyorsa ona göre tasarlanabilirler. Ayrıca paralel filtreler, temel frekansta reaktif üretebilirler ve daha ekonomiktirler. En önemli özellikleri de tasarımlarının kolay olmasıdır. Bu yüzden güç sistemlerinde harmonik frekanslı akımlara düşük empedanslı bir yol sağlayan paralel filtreler kullanılır. Tek tek veya birleştirilmiş seri veya paralel filtreler ile enerji sisteminin empedansına bakılmaksızın harmonik akım veya gerilimler en aza indirgenebilir; fakat bu yöntem, her frekans için ayrı bir süzgeç devresi gerektirmesi nedeni ile oldukça pahalıdır. <sup>(1)</sup>

Şekil 3.9. da harmoniklerin şebekeye geçmesine engel olan bir filtre devresi görülmektedir.



**Şekil 3.9.** Harmonikleri toprağa geçiren bir filtre devresi <sup>(1)</sup>

Bu devredeki kollardan biri için empedans hesaplanırsa,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.69)$$

bulunur. Burada,

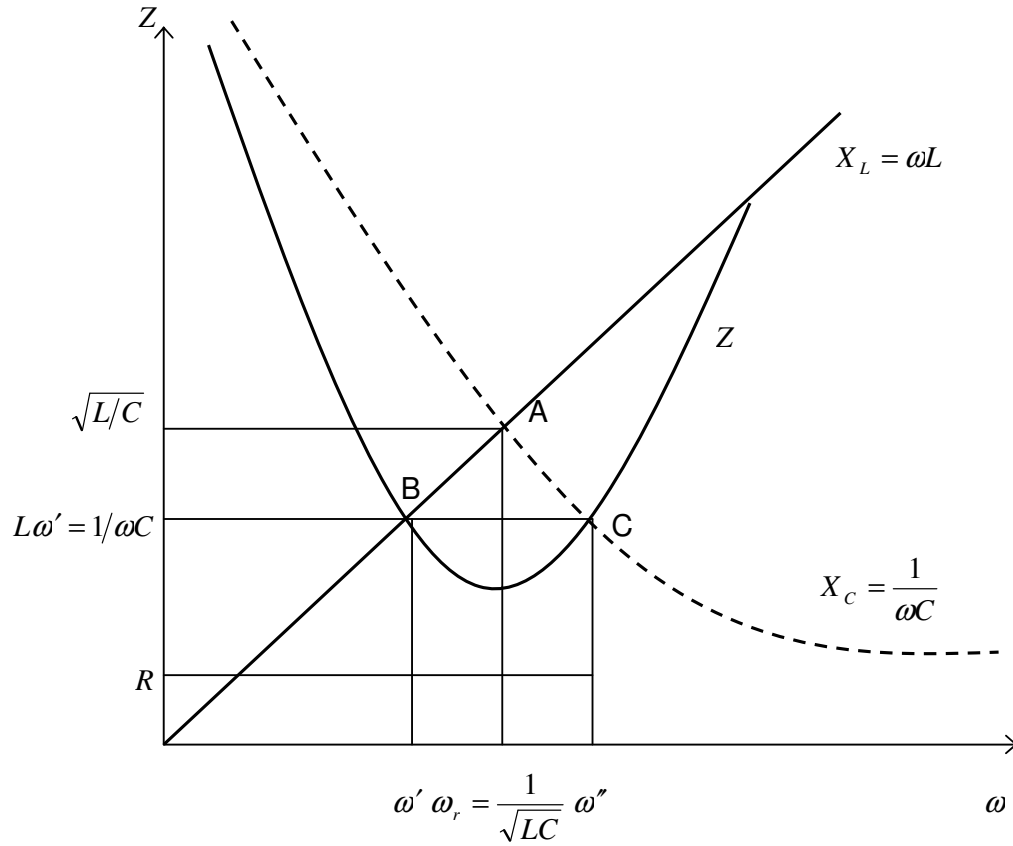
$$X_L = \omega L \quad (3.70)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.71)$$

dir. Eğer  $X_L(\omega), X_C(\omega)$  ve  $Z(\omega)$  fonksiyonları çizilirse (Şekil 3.10)  $Z(\omega)$  fonksiyonunun,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.72)$$

değerinde bir minimum noktası olduğu görülür.

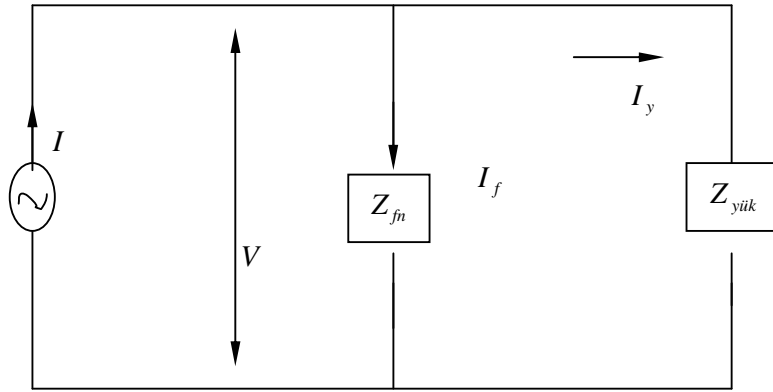


**Şekil 3.10.**  $\omega$  açısal frekansının fonksiyonu olarak  $X_L, X_C$  reaktansları ve  $Z$ ' in değişimi <sup>(1)</sup>

Bu  $\omega_r$ ' ye tekabül eden  $f_r$  değeri ise  $L$  ve  $C$  değerleri değiştirilerek her kol için değişik bir değere ayarlanabilir ve kolun rezonans frekansıdır. Her kol değişik harmonik frekanslarına ayarlanarak bir harmonik filtre oluşturulmuş olur.

Her kol kendi rezonans frekansındaki harmonik akım için en kısa yolu oluşturacağından (bu durumda  $Z = R'$  dir) harmonikler devrelerini bu kollar üzerinden tamamlarlar ve dolayısıyla şebekeye geçmemiş olurlar. Şekil 3.9.' da görülen çift kondansatörlü kol ise yüksek geçiren filtredir ve örneğin elemanların değerleri, 13. harmonikten daha büyük ve genlikleri çok küçük olan diğer harmonikler için, küçük empedanslı bir yol oluşturacak şekilde seçilirse mevcut harmonikler tamamıyla toprağa gönderilmiş olur. <sup>(1)</sup>

Seri rezonans filtre devresinin 50 Hz' deki eşdeğer empedansı kapasitif karakterde olacağından, bu devre reaktif güç kompanzasyonu da yapacaktır.



**Şekil 3.11.** Harmonikli bir şebeke ve paralel bağlı filtre <sup>(1)</sup>

Şekil 3.11' de;

$I_f$  : harmonik akımların efektif değeri

$Z_{fn}$  : filtrenin  $n$ . harmonik frekansındaki empedansı

$I_y$  : yük akımı

$Z_{yük}$  : yük empedansıdır.

Böylece devre çözülürse;

$$\text{Filtresiz durum, } I_y = I \quad (3.73)$$

$$V = IZ_{yük} \quad (3.74)$$

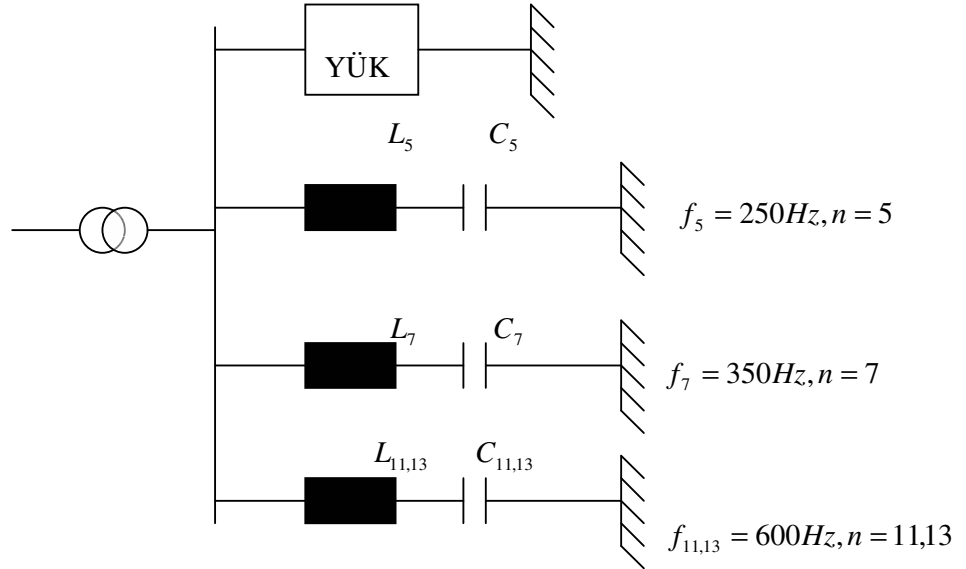
Filtreli durum,  $I_y = I - I_f \quad (3.75)$

$$V = I_y Z_{yük} \quad (3.76)$$

bulunur. Buradan da görüleceği gibi filtre kullanılmadığı takdirde harmonik akımları tamamen şebekeye geçer ve  $V = IZ_{yük}$  harmonik gerilimi büyür. Filtreli halde ise  $I_y = I - I_f$  olduğundan harmonikli akımın büyük bir kısmı filtre üzerinde toprağa akar, çok az bir kısmı da şebekeye geçer. <sup>(1)</sup>

Süzülmek istenilen harmonik frekansında, rezonansta olan böyle bir devrenin direnci çok küçük olduğundan, bu frekanstaki akımın çok büyük bir kısmı toprağa akıtılarak süzölmüş olur.

5., 7., 11. ve 13. harmonikler için filtre tasarımı yapılacaksa, kullanılacak kondansatör toplam gücünün %50' si 5., %25' i 7., %25' ide 11. ve 13. harmonikler için kullanılır. Böyle bir tasarımın prensip şeması Şekil 3.12.' de verilmiştir. <sup>(1)</sup>



**Şekil 3.12.** Harmonik süzücü filtre devreleri tasarımının prensip şeması <sup>(1)</sup>

### 3.7.2. Filtre Tasarımı

Filtre tasarımını, tasarım kriterleri ve hesaplamaları yönünden inceleyelim.

#### 3.7.2.1. Filtre Tasarım Kriterleri

Bir filtrenin kullanılma nedenlerinin başında dalga şeklinin bozulması nedeniyle meydana gelen bozulmaların yok edilmesi gelmektedir; fakat bunlardan daha önemli olan neden teknik ve ekonomik bakımdan filtre kullanma gerekliliğidir. Ülkemizde birçok işletmede yaşanan harmonik etkilerin oluşturduğu sorunlar teknik gerekliliği ortaya koymaktadır. Mali bakımdan değerlendirme ise halen harmonik standartların ülkemizde oluşturulmamış olması ve maliyet konusunda kayıp analizlerinin yapılamaması nedeniyle halen göz ardı edilmektedir.

Tasarımda mali bakımdan değerlendirme yapılırken, tek ayarlı filtrelerde kullanılacak kapasitenin değerinin büyük olacağı göz önüne alınmalıdır. Harmonik değeri büyüdükçe, tek ayarlı filtre yerine bu harmoniklerin tümü üzerinde etkili olan bir filtre kullanılması ekonomik açıdan daha uygun olacaktır. Küçük değerli (3., 5., 7.) harmoniklerin daha etkin olması nedeni ile bu harmoniklerin herbirinin süzme işlemi mutlaka tek bir filtre ile yapılması gereklidir. <sup>(1)</sup>

Harmonik filtreleri her tesis için ayrı ayrı boyutlandırılmalıdır. Bu amaçla bir tasarımcının aşağıdaki bilgiler ihtiyacı vardır:

- 1) Sorun yaratan yükün meydana getirdiği harmonik akımların frekans ve genlikleri,
- 2) Çevredeki yükler ile güç sisteminin eşdeğer devresinde göz önüne alınacak en etkili harmoniğe kadar devrenin empedans değişimi,
- 3) Şebekenin çeşitli noktalarındaki ve işletmelerin besleme noktasında izin verilen harmonik distorsiyon derecesi,
- 4) Tesiste bulunan ve planlanan güç kondansatörleri,
- 5) Diğer kaynakların sebep olduğu harmonik distorsiyon derecesi,
- 6) Tasarım yapılacak filtrenin çalışacağı gerilim, frekans ve sıcaklık değerleri,



7) Filtrenin, harmonik oluşturan y¼klere en yakın noktada konumlandırılması. <sup>(10)</sup>

Filtrelerin tasarlanmasındaki temel yaklaşım şu şekilde özetlenebilir:

1) Filtre edilecek harmonik akımlarının büyüklükleri saptanır.

2) Temel frekansta reaktif güç gereksinimini ve harmonik akımlarının anma değerlerini esas alan bir kondansatör anma değeri saptanır. Bunun için varolan bir kondansatör ünitesi de yeterli olabilir.

3) İstenen ayarı sağlayacak endüktans değeri saptanır. Bu endüktansın anma değeri, hem temel akım bileşenini hem de filtredeki harmonik akımlarını esas almalıdır.

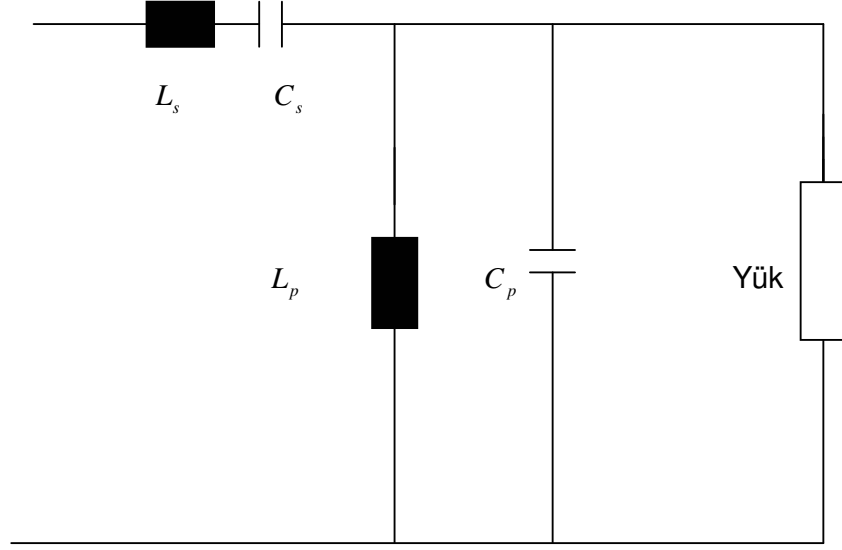
4) Kondansatör ve endüktans değerlerindeki toleransların etkisini de içeren filtre cevabı kontrol edilir. Ayarlanabilme esnekliği, filtre büyüklüğünün arttırılması veya seri direnç etkilenmesiyle arttırılabilir.

5) Sürekli halde temel ve harmonik frekanslarında, kondansatör üzerindeki gerilim tepe değerleri kontrol edilir.

6) Sistemle filtre arasındaki ters etkileşimler kontrol edilir. <sup>(1)</sup>

### 3.7.2.2. Filtre devrelerinin hesaplanması

Gerilim harmoniklerinin süzülmesi için seri ( $s$ ) ve paralel ( $p$ ) rezonans devrelerinden oluşan filtre düzeneği Şekil 3.13.' de gösterilmiştir.



**Şekil 3.13.** Filtre düzeneği (filtre elemanlarının omik dirençlerinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir) <sup>(21)</sup>

Rezonans koşulunda,

$$X_{sL} = X_{sC} \quad ; \quad X_{pL} = X_{pC} \quad (3.77)$$

yazılabilir.  $n$ . harmonik için seri rezonans devresinin empedansı;

$$\vec{Z}_{sn} = j \frac{1}{n} X_{sC} (n^2 - 1) \quad (3.78)$$

ve  $n$ . harmonik için paralel rezonans devresinin empedansı;

$$\vec{Z}_{pn} = -j \frac{nX_{pC}}{(n^2 - 1)} \quad (3.79)$$

olup  $n$ . harmonik için filtre faktörü ise;

$$S_N = \frac{\vec{U}_n}{\vec{U}_m} = \frac{\vec{Z}_{pn}}{\vec{Z}_{sn} + \vec{Z}_{pn}} \quad (3.80)$$

yazılabilir. (3.78) ve (3.79) numaralı ifadeler (3.80) numaralı ifade de yerlerine yazılırsa;

$$S_N = \frac{n^2}{-\frac{X_{sC}}{X_{pC}}(n^2 - 1)^2 + n^2} \quad (3.81)$$

elde edilir. Bu ifadenin paydasının kökleri  $r_1, r_2$  ile gösterilecek olursa, ara işlemler sonucunda;

$$r_{1,2}^2 = \left(1 + \frac{X_{pC}}{2X_{sC}}\right) \mp \sqrt{\left(1 + \frac{X_{pC}}{2X_{sC}}\right)^2 - 1} \quad (3.82)$$

bulunur.  $r_1, r_2$  kritik frekanslara karşılık düşmektedir. <sup>(21)</sup>

Filtre tasarımı için izlenecek adımlar şöyle özetlenebilir:

1) Önce maksimum yük akımına dayanabilecek  $X_{sC}$  belirlenir, buradan  $C_s$  bulunur.

2) En yakın (norm) kapasite seçileceğinden, yeni bir  $X_{sC}$  hesap edilir.

3) Rezonans koşulunda  $X_{sL}$  ve dolayısıyla  $L_s$  bulunur.

$$4) \quad \frac{X_{sC}}{X_{pC}} = K_n = \frac{n^2}{(n^2 - 1)^2} \left(1 - \frac{1}{s_n}\right) \quad (3.83)$$

yardımla  $C_p$  bulunur.

5)  $S_N$ 'in işaretinin tayini, filtre faktörü-frekans eğrisinden bulunabilir.

(Şekil 3.29).

6) En yakın (norm) kapasite seçileceğinden, yeni bir  $X_{pC}$  hesap edilir.

7) Rezonans koşulundan  $X_{pL}$  ve dolayısıyla  $L_p$  bulunur.

8)  $r_1, r_2$  kökleri (kritik Frekansları) kontrol edilir. <sup>(21)</sup>

Filtre kondansatörlerinin önüne bağlanacak endüktans bobininin 50 Hz' deki reaktansı ( $X_L$ ), kondansatörün 50 Hz' deki reaktansı ( $X_C$ )' ye bağlı olarak;

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (3.84)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada;

$n$  : harmonik mertebesidir.

Bu bağıntıya göre;

$$5. \text{ harmonik için, } X_L = \%4X_C$$

$$7. \text{ harmonik için, } X_L = \%2.041X_C$$

$$11. \text{ harmonik için, } X_L = \%0.826X_C$$

$$13. \text{ harmonik için, } X_L = \%0.592X_C \text{ olur. }^{(22)}$$

### 3.7.3. Filtre Çeşitleri

Aktif ve pasif filtre olmak üzere iki çeşittir.

#### 3.7.3.1. Pasif filtreler

Pasif filtrelerden dördünü inceleyelim.

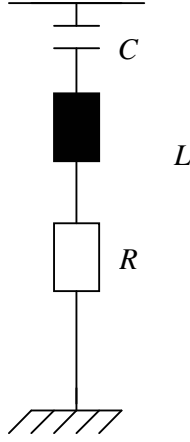
##### 3.7.3.1.1. Bant geçiren filtreler (tek ayarlı filtreler)

Bant geçiren filtreler, özel bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar.genellikle tek bir frekans değeri için etkilidirler. Bu filtreler aynı zamanda sistemin rezonans frekansını, zararlı bir harmonik frekansından uzağa taşımak için de kullanılabilirler. Bir yük tarafından üretilen harmonik akımlarını, bir harmonik frekansındaki rezonans durumu hariç taşıyabilen sistemler için bu çok yararlıdır. Böylece harmonik frekansındaki rezonans durumu önlenir. <sup>(1)</sup> Bant geçiren filtreler (tek ayarlı filtreler) seri RLC devresinden meydana gelir.

Bant geçiren filtrelerin başlıca üstünlükleri şunlardır:

- ◆ Eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa kayıplar çok azdır.
- ◆ Ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sifıra yakın bir empedans gösterilir.
- ◆ Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre paralel kullanılabilir.

Bant geçiren filtrelerin tek olumsuz yanı ise, keskin ayarları nedeni ile eleman değerlerinin değişimine duyarlı olmalarıdır. Bu sorunda kondansatör büyüklüğünü arttırarak veya direnç eklenerek çözülebilir. <sup>(1)</sup>



**Şekil 3.14.** Bant geçiren filtre (tek ayarlı filtre) <sup>(1)</sup>

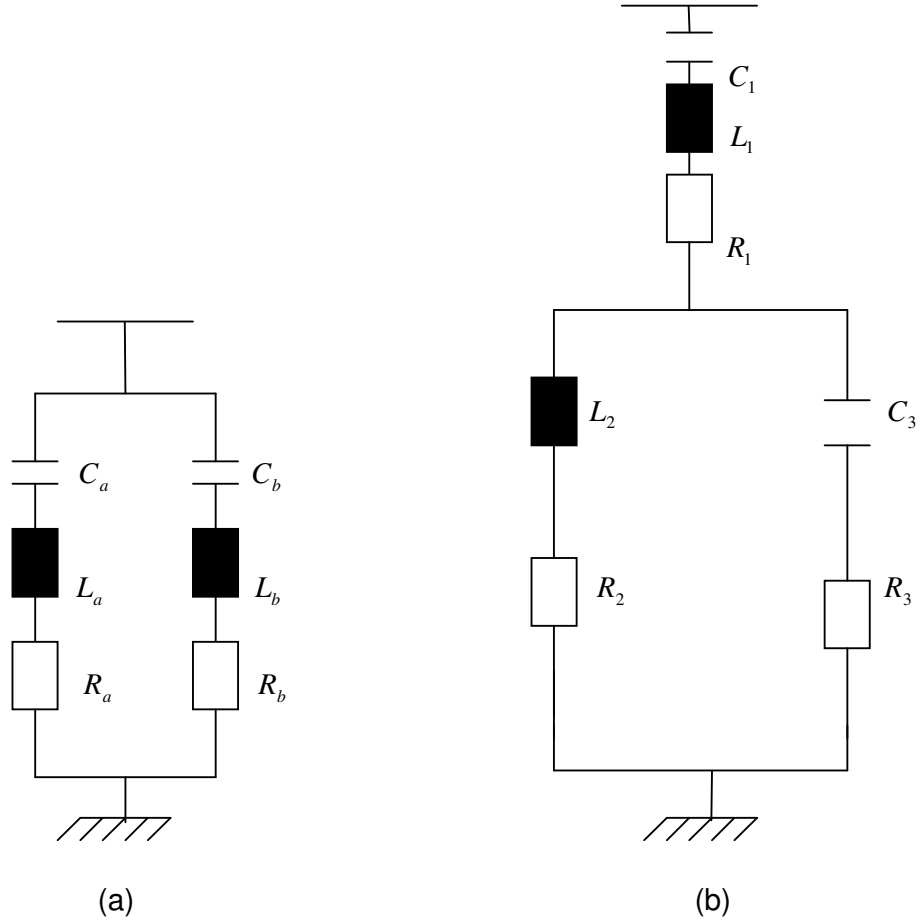
#### 3.7.3.1.2. Çift ayarlı filtreler

Rezonans frekansı civarındaki iki tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedans değeri, pratik olarak çift filtre ile aynıdır. Bu iki filtre devre elemanları arasındaki ilişki Şekil 3.15.' de verilmiştir.

Tek ayarlı filtreler göre temel frekanstaki güç kayıplarının azlığı bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Üç ve dört ayarlı filtreler de tasarlanabilir, fakat ayarlama zorluğundan dolayı etki sağlamazlar. <sup>(1)</sup>

#### 3.7.3.1.3. Otomatik ayarlı filtreler

Ayarlı filtre tasarımında en büyük frekans sapmasını azaltmak avantajlıdır. Bu durum, kapasitesi otomatik olarak ayarlanarak veya endüktansı değiştirilerek ayarlanan filtreler yapmak sureti ile sağlanabilir.  $\pm 5\%$  ' lik bir saptama aralığı genellikle düşünülen yeterlidir. Filtredeki harmonik frekans reaktif gücünü ölçen ve bu reaktif gücün işaret ve genliğine göre L ve C ' i kontrol eden bir sistemi, yüksek gerilim D.A. dönüştürücülerde kullanılmıştır. (1)



**Şekil 3.15.** (a) iki tek ayarlı filtre, (b) çift ayarlı süzgeç <sup>(1)</sup>

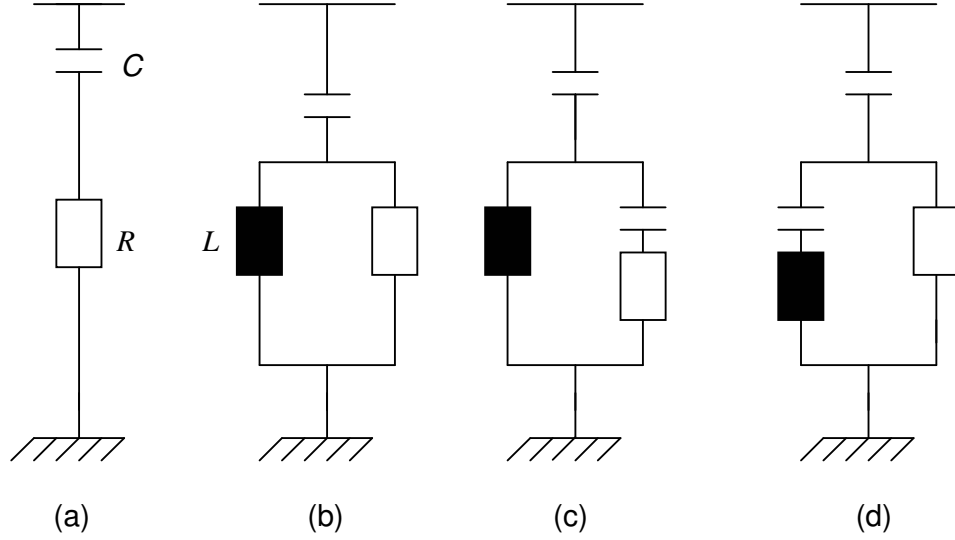
#### 3.7.3.1.4. Yüksek geçiren sönümlü filtreler

Şekil 3.16.' da; yüksek geçiren sönümlü birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri verilmiştir.

Bu filtrelerin başlıca üstünlükleri şu şekilde ifade edilebilir:

Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişiminden etkilenmediği gibi, frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır. Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın , geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar. Yüksek geçiren filtreler çeşitli

mertebeler için tasarlanırlar. Örneğin; ikinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre temelde endüktansına paralel bir direnç eklenmiş bant geçiren bir filtredir. Farklı direnç değerleri için farklı filtre cevapları elde edilir. İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada bant geçiren bir filtreden daha etkilidir. Ayrıca filtre, bant geçiren filtre için ayarlanan frekans değerine duyarlı değildir



**Şekil 3.16.** Yüksek geçiren sönümlü filtreler; <sup>(23)</sup>

(a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) C tipi <sup>(1)</sup>

Endüktif ve kapasitif elemanların seçimi, bant geçiren filtredeki gibi yapılıır. Bunlara ek olarak anma etkin gücüne dayalı bir direnç değeri tanımlanır.

Düşük mertebeli harmonikler için yüksek geçiren filtreleri kullanmak ekonomik değildir. Ayrıca direnç değeri artacağından kayıplar artar. <sup>(1)</sup>

### 3.7.3.2. Aktif filtreler

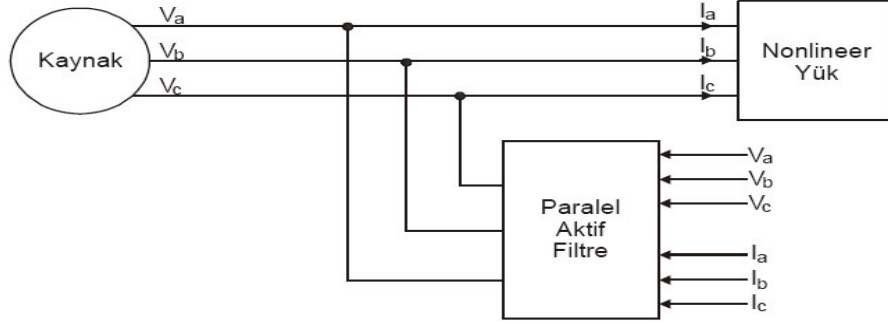
Yukarıda dört maddede anlatılan filtrelerin hepsine genel olarak pasif filtreler denilebilir. Pasif filtreler kontrolü olmayan ve filtreleme performansı tesis edildiği şebekeye bağlı olan tasarımlardır. Aktif filtre ise şebekedeki harmonikleri ölçer ve bu ölçülen harmoniklerin ters fazında harmonik üretir. Böylece orijinal olan harmonikler yok edilir. Bu çalışma prensibi Şekil 3.16.' da gösterilmiştir. <sup>(23)</sup>

Aktif filtreler, seri ve paralel aktif filtreler olmak üzere ikiye ayrılır.

### 3.7.3.2.1. Paralel Aktif filtreler

Paralel aktif filtre adından da anlaşılacağı gibi sisteme paralel bağlı olarak çalışır. Yükün çektiği harmonikli akımları tanımladıktan sonra bunlarla aynı genlikte fakat ters fazdaki akımları sisteme enjekte eder. Paralel aktif filtre, akım kaynağı gibi davranan nonlineer yükler için etkilidir. Paralel aktif filtre akım ile ilgili kompanzasyonları (reaktif güç kompanzasyonu, akım dengesizlikleri) yapar. <sup>(24,25)</sup>

Paralel aktif filtrenin yapısı Şekil 3.17’de görülmektedir.

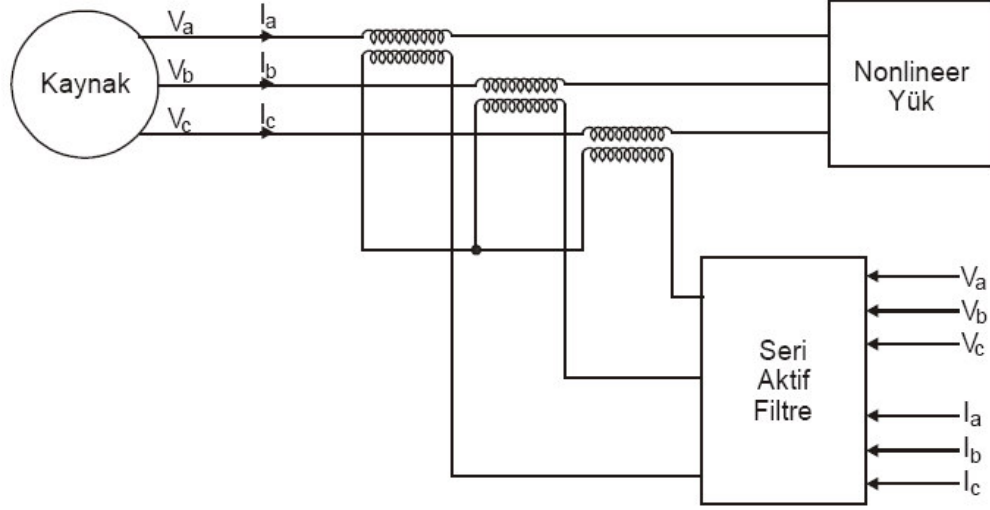


Şekil 3.17. Paralel aktif filtrenin prensip şeması <sup>(24)</sup>

### 3.7.3.2.2. Seri Aktif filtreler

Seri aktif filtreler sisteme bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre ile gerilim harmonikleri elimine edilir. Harmonikli gerilim kaynağı gibi davranan kaynaklar için etkilidir. Seri aktif filtre ile gerilime bağlı kompanzasyonlar (gerilim dengesizlikleri, dalgalanmaları ve regülasyonu) gerçekleştirilir. Yapısı Şekil 3.18’de görülmektedir. <sup>(24,25)</sup>

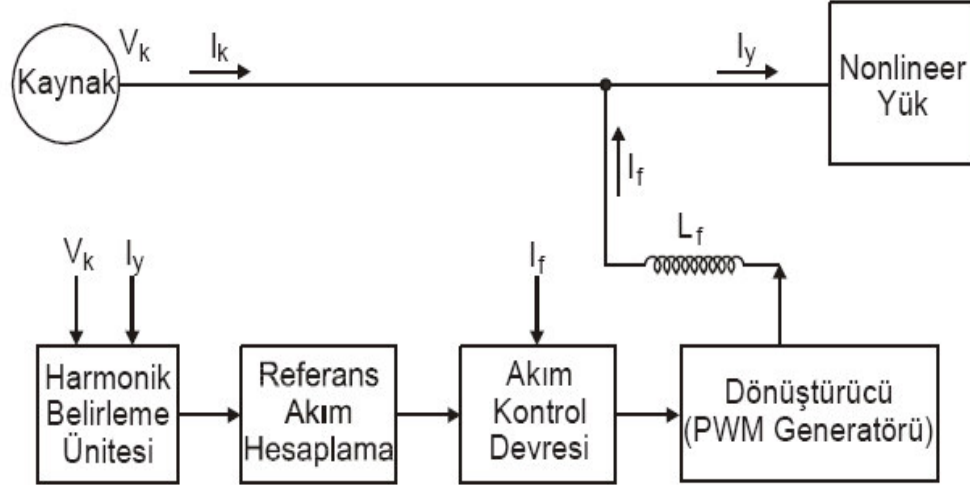




Şekil 3.18. Seri aktif filtrenin prensip şeması <sup>(25)</sup>

### 3.7.3.2.3. Aktif Güç filtresinin yapısı

Aktif güç filtresi, dönüştürücü (PWM Generatörü), akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. <sup>(25)</sup> Şekil 3.19' da Aktif güç filtresinin blok şeması görülmektedir.



**Şekil 3.19.** Aktif Güç filtresinin Blok şeması <sup>(25)</sup>

Şekil 3.19'a göre;

$V_k$  : Kaynak gerilimi (V),

$I_k$  : Kaynak akımı (A),

$I_y$  : Yük akımı (A),

$I_f$  : Aktif güç filtresi akımı (A),

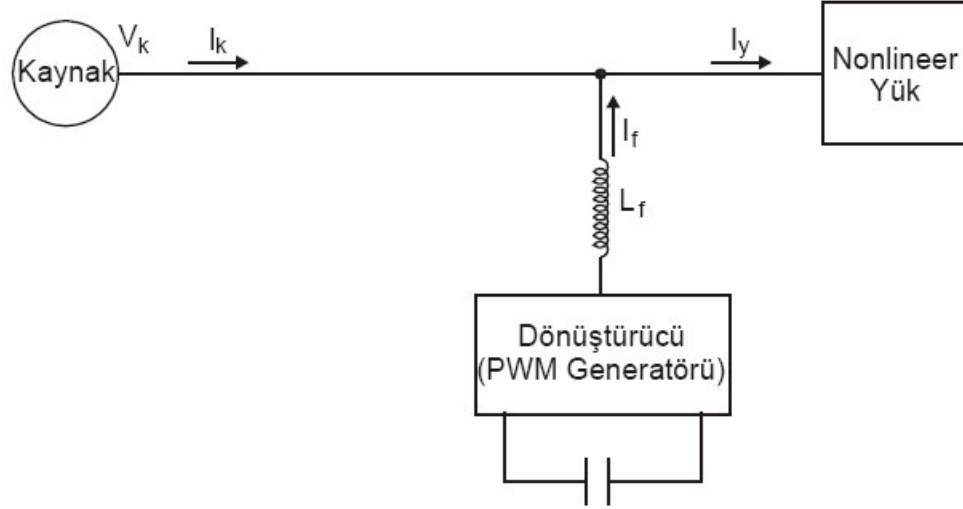
$L_f$  : kaynak uçlarındaki gerilim ile filtre tarafından üretilen PWM (Darbe genişlik modülasyonu) gerilimi arasında tampon görevi gören endüktanstır

### 3.7.3.2.3.1. Dönüştürücü (PWM Generatörü) Bloğu

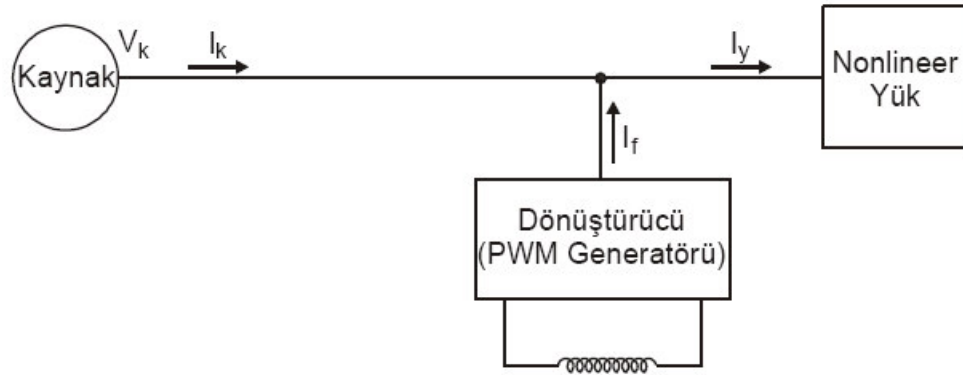
Dönüştürücü bloğu, akım beslemeli veya gerilim beslemeli dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilebilir. Her iki dönüştürücü çeşidinin prensip şeması Şekil 3.20'de verilmiştir. Dönüştürücülerde ihtiyaç duyulan DC kaynak gücü, ya AC devreden doğrultularak yada ayrı bir akü-şarj devresinden alınır. Bu dönüştürücülerde yarı iletken anahtarlama elemanı olarak, BJT (Bipolar transistör), GTO (Gate Turn-off) ve son uygulamalarda IGBT ( İzole kapılı bipolar transistör) kullanılmaktadır.

Dengesiz olan sistemlerde, maksimum esneklik ve performans için her az başına ayrı ayrı dönüştürücülerin kullanılması uygundur. Gerilim veya akım

beslemeli dönüştürücü seçimi, fiyatına, distorsiyon kaynağına ve istenilen harmonik distorsiyonu düzeltme miktarına bağlıdır.



(a) Gerilim beslemeli dönüştürücü



(b) Akım beslemeli dönüştürücü

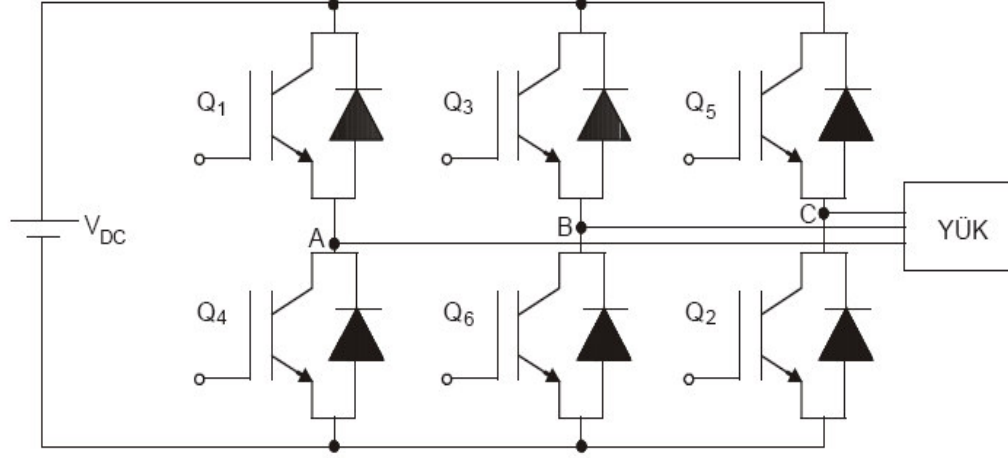
**Şekil 3.20.** Dönüştürücü Bloğunun Prensip Şeması <sup>(25)</sup>

### 3.7.3.2.3.1.a Gerilim Beslemeli Dönüştürücü

Uygulamada en çok kullanılan dönüştürücü çeşididir. Bu dönüştürücüler paralel bağlanarak norm değerleri artırılabilir. Bunlarla yüksek frekansta anahtarlama yapmak mümkündür. Böylece inverterin gücünü arttırmadan yüksek dereceli harmonikleri elimine etmek mümkün olacaktır. Ayrıca bu dönüştürücüler akım beslemelilere göre daha ucuzdur ve daha az yer kaplarlar.

En önemli dezavantajları kontrol sistemlerinin karmaşık olmasıdır. Özellikle, dönüştürücülerin paralel bağlanması gerektiğinde kontrol devresinin karmaşıklığı daha da artar. <sup>(25)</sup>

Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için kolaylıkla kullanılabilir. Üç fazlı PWM dönüştürücünün ana akım devresi Şekil 3.21’de görülmektedir.



**Şekil 3.21.** Gerilim Beslemeli Üç Fazlı PWM Dönüştürücünün Ana Akım Devresi <sup>(25)</sup>

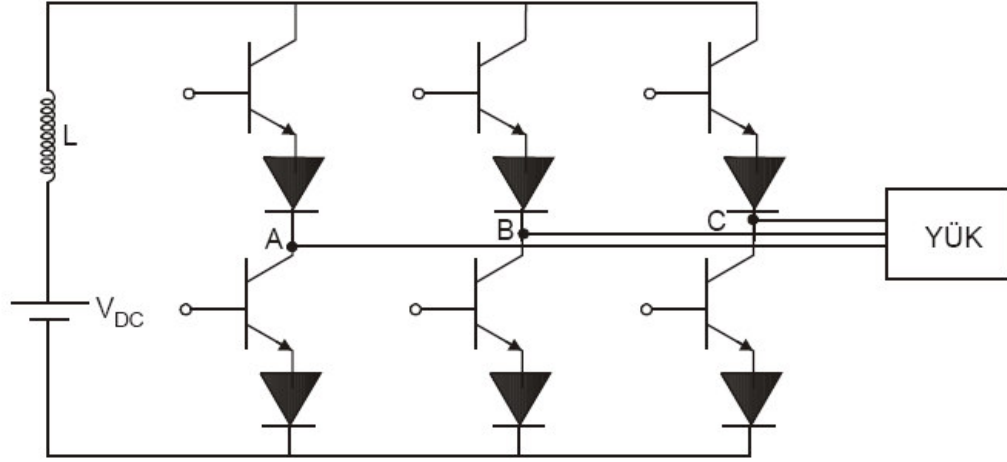
$Q_1$  iletme sokulduğunda A ucu, giriş geriliminin pozitif ucuna bağlanır.  $Q_4$  ucunun iletme sokulması ile de negatif uç A ucuna bağlanır. PWM’de kullanılan IGBT’ler sürülme sırasına göre numaralandırılmıştır. Uygulamada IGBT yerine diğer anahtarlama elemanları da kullanılabilir (BJT, GTO vb.). Fakat PWM dönüştürücülerde yüksek anahtarlama hızları gerektiğinden, yüksek anahtarlama hızlarına sahip olmalarından dolayı IGBT kullanılması daha uygundur.

### 3.7.3.2.3.1.b Akım Beslemeli Dönüştürücü

Akım beslemeli dönüştürücülerin yapısı daha basit ve daha güvenilirdir (kontrol devresi gerilim beslemeli dönüştürücülere göre daha basit olduğundan). Kayıplarının yüksek olması en önemli dezavantajlarıdır. Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için uygulanabilirken, akım beslemeli dönüştürücülerin bireysel yüklere uygulanması daha uygundur (kayıplarının

yüksek olmasından dolayı). Üç fazlı BJT' li akım beslemeli inverterin ana akım devresi Şekil 3.22'de görülmektedir.

Inverter girişindeki AC kaynak ve büyük endüktanslı bobin seri bağlanarak bir akım kaynağı oluşturulmuştur. Belirli bir anda üst ve alt kollardan sadece birer BJT iletimdedir. Akım beslemeli dönüştürücüde giriş akımı sınırlı ve kontrollü olduğundan, hatalı tetiklenmelere veya kısa devrelere neden olmaz. Ters akım diyoduna ihtiyaç kalmadan reaktif veya karşı gerilim üretme özelliği bulunan yükleri besleyebilir. Bunlara karşın pratikte kaynaklar sabit gerilimli oldukları için, akım kaynağı elde etmek için inverter girişinde büyük değerli bir bobine ihtiyaç vardır.



**Şekil 3.22.** BJT'li Akım Beslemeli Dönüştürücünün Ana Akım Devresi <sup>(25)</sup>

### 3.7.3.2.3.2. Akım Kontrol Devresi

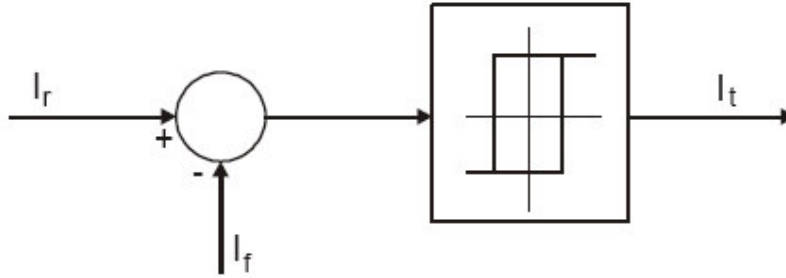
Akım kontrol devresinin girişinde, harmonik belirleme bloğunda belirlenmiş referans filtre akım sinyalleri ve filtrenin çıkış akım sinyalleri (PWM generatörünün çıkış akım sinyali), çıkışında ise dönüştürücüyü tetikleme sinyalleri bulunur. Temel olarak çalışma prensibi, referans akım sinyalleri ile çıkış akım sinyalleri arasındaki fark işlenerek PWM generatörünün kapı sinyallerinin üretilmesidir.

Bir akım kontrol devresinden, hızlı akım kontrolü yapması ve anahtarlama sırasında oluşan harmonikleri bastırabilmesi özellikleri beklenir. Temel olarak iki farklı PWM akım kontrol metodu vardır. Bunlar; histerezis ve üçgen dalga metodudur.

Son yıllarda DSP (Dijital sinyal işleme) teknolojisinin gelişmesiyle bunlara birde Dead-beat adı verilen bir yöntemde ilave edilmiştir. <sup>(25)</sup>

### 3.7.3.2.3.2.a Histerezis metodu

Bu kontrol metodu bir ölü bant veya referans akım etrafında histerezis eğriden yararlanan kontrolden oluşur. Bu metodun prensip şeması Şekil 3.23'de verilmiştir.



**Şekil 3.23.** Histerezis Metodunun Prensip Şeması <sup>(25)</sup>

Burada;

$I_r$  : Harmonik belirleme bloğunun ürettiği referans akım (A),

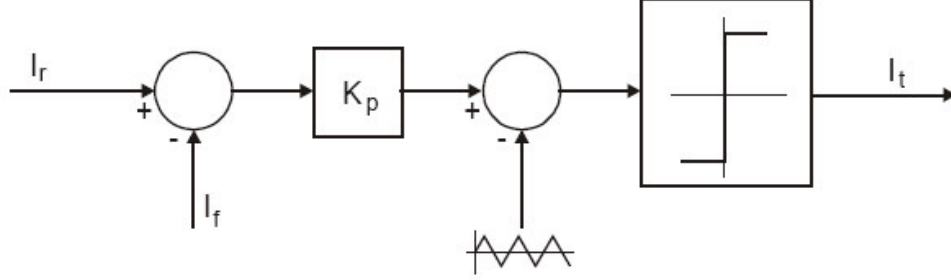
$I_f$  : Aktif güç filtresi akımı (A),

$I_t$  : PWM generatörünün tetikleme akımıdır (A).

Referans akım ile gerçek akım arasındaki hata akım sinyali ne zaman bantın dışına kayarsa tetikleme akımı bantta geri döndürmeye zorlayacak şekilde açılır veya kapanır. Bu özellik akımı hızlı kontrol etmeyi mümkün kılar. En çok kullanılan metottur. Üçgen dalga metoduna göre daha az anahtarlama kaybı üretir. Anahtarlama frekansı, kayıplar ve düzeltme miktarı bant genişliğinden etkilenir. <sup>(24)</sup>

### 3.7.3.2.3.2.b Üçgen dalga metodu

Gerçekleştirilmesi en kolay olan yöntemdir. Prensiş şeması Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Üçgen Dalga Metodunun Prensiş Şeması <sup>(25)</sup>

Burada;

$I_r$  : Harmonik belirleme bloğunun ürettiği referans akım (A),

$I_f$  : Aktif güç filtresi akımı (A),

$I_t$  : PWM generatörünün tetikleme akımıdır (A).

Şekilden de görüldüğü gibi  $K_p$  ile yükseltilmiş hata sinyalini taşıyıcı bir üçgen dalga ile karşılaştırma yoluyla PWM anahtarlama sırasını belirler. Böylece güç yarı iletken elemanlarının anahtarlama frekansı taşıyıcı bir üçgen dalganın frekansına eşittir. Çıkış sinyali PWM generatörüne uygulandığı zaman her bir taşıyıcı sinyal fazı sıralı olarak kaydırılır. Uygulanması basittir. En büyük dezavantajları, yüksek anahtarlama kayıpları ve yüksek frekanslı distorsiyonlardır. <sup>(25)</sup>

### 3.7.3.2.3.3. Harmonik Belirleme Ünitesi

Harmonik belirleme ünitesi aktif güç filtresinin en önemli kısmıdır. Yük akımındaki harmonikleri yok eden kompanzasyon akımını üretmek için genel olarak iki metot kullanılmaktadır.

Bunlar; p-q teorisi olarak da bilinen ani reaktif güç metodu ve Fourier Seri (FFT) metodudur. <sup>(25)</sup>

Ani güç metodunda yük akımındaki her bir harmoniğin ayrı ayrı belirlenmesine ihtiyaç duyulmaz. Bu metot anlık çalışır ve o anda ölçülen akımı tam sinüs dalgasına tamamlayacak bir kompanzasyon akımın üreten hesaplama devrelerinden oluşur. Hesaplama için yük akımını ve kaynak gerilimini kullanır. Hesaplama için az sayıda bileşene ihtiyaç duyması ve bütün harmonik bileşenlerini kompanze etmesi bu metodun avantajları olarak sayılabilir. Ancak çoğu durumda bütün harmonik bileşenlerinin kompanze edilmesine gerek yoktur. Standartlarda belirtilen harmoniklerin yok edilmesi çoğunlukla yeterli olacaktır. Bu metotla harmonikler ayrı ayrı kontrol edilemez. <sup>(25)</sup>

FFT metodu, frekans domenin de düzeltme olarak da bilinir ve Fourier Analizi ile harmonikli dalga şeklinin periyodikliği prensibine dayanır. Bu metot örnek yük akımındaki FFT'nin performansı ile yükteki harmonik bileşenlerini ayrı ayrı belirler ve daha sonra aynı harmonik bileşenlerine sahip aynı genlikte fakat ters fazda bir akım dalgası üretir. FFT hesaplamalarında DSP (Dijital Sinyal İşleme) kullanılmazsa bu metot pratik olmaz. DSP kullanıldığı zaman bile kontrolün zaman cevabı anlık güç metoduna göre gözle görülür derecede uzun sürer. Bu yüzden FFT metodunu hızla değişen yükler için kullanmak optimum olmayacaktır. Bu metot ile istenilen harmonik mertebeli yok edilebilir.[32] FFT metodu, uygulama zorluğu, cevap zamanının yüksek olması ve performansının düşük olması sebebi ile uygulamada pek kullanılmaz. Bu sebepten burada ani reaktif güç metodu ayrıntılı olarak anlatılacak.

Ani reaktif güç metodu ilk olarak 1983 yılında H. Akaigi tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem p-q teorisi olarak da bilinmektedir. Bu teori, üç fazlı nötr hatlı veya hatsız güç sistemlerinde anlık değerlere işlem yapan bir teoridir. Akım ve gerilim dalga şekilleri için hem kararlı hal hem de geçici rejimde geçerlidir. p-q teorisi a - b - c koordinatlarındaki 3 fazlı akım ve gerilimlerin  $\alpha-\beta-0$  koordinatlarına cebirsel dönüşümünden oluşur. Bu  $\alpha-\beta$  bileşenlerden p-q ani güç bileşenleri hesaplanır. <sup>(25,26)</sup>

p-q teorisinin aktif filtre kontrolünde kullanılmasının bazı önemli sebepleri aşağıda sıralanmıştır;

- “ Üç fazlı sistem teorisinin tabiatına uygun olan bir teoridir,
- “ Herhangi bir üç fazlı sisteme uygulanabilir (dengeli veya dengesiz,

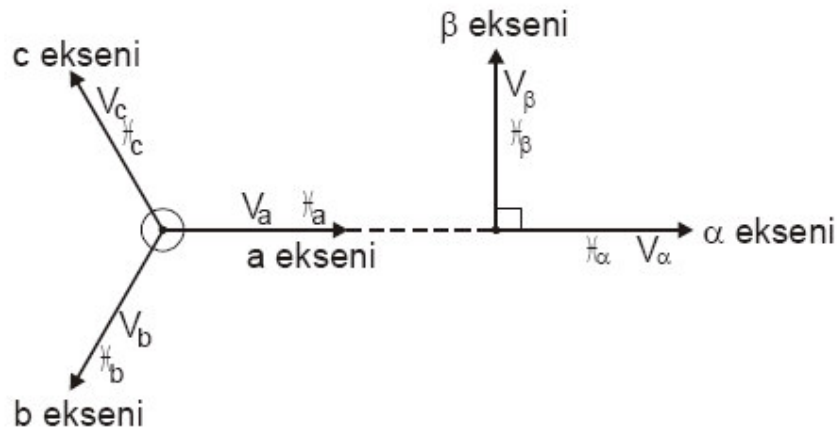


harmonikli veya harmoniksiz akım ve gerilime),

• Mükemmel dinamik cevap sağlayan anlık değerlere dayanır,

• Hesaplama devreleri basittir (sadece cebirsel tanımlar içerir ki bunların uygulanması standart işlemcilerle kolaylıkla sağlanabilir),

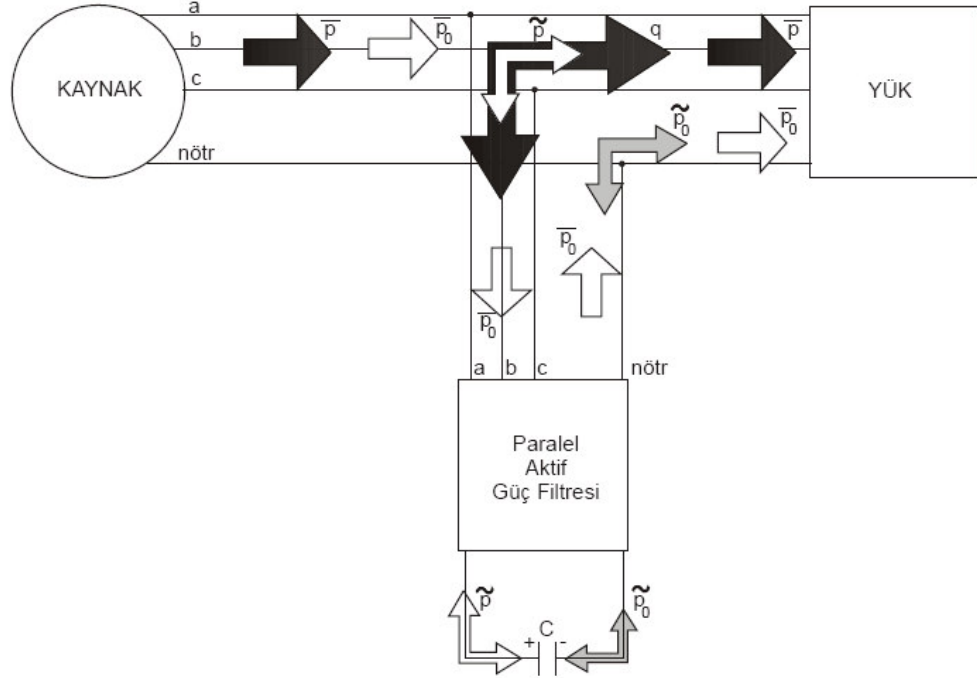
Üç fazlı sistemlerde matematiksel olarak ani akım ve gerilimler ile ilgilenmek için bu büyüklükleri vektör olarak tanımlamak uygun olmaktadır. Hesaplamaları basitleştirmek için üç faz akım ve gerilimler Şekil 3.25'de ki gibi düşünülmektedir.



Şekil 3.25.  $\alpha$ - $\beta$  Dönüşümü <sup>(25)</sup>

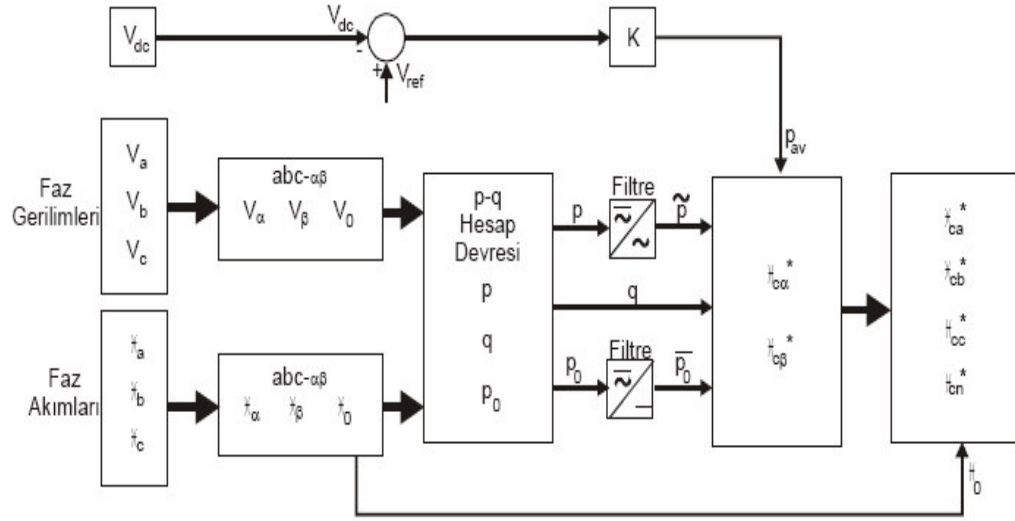
Şekil 3.26'da a - b - c koordinatlarında  $p$  -  $q$  teorisinin güç bileşenlerinin paralel aktif güç filtresi ile kompanzasyonu görülmektedir. Burada hem harmonikleri hem de yükün çektiği reaktif gücü kompanze etmek istersek, sadece  $\bar{p}$ ,  $p$  -  $q$  teorisinin istenen güç bileşeni olacaktır. Diğer büyüklükler paralel aktif güç filtresi ile kompanze edilebilir. Sadece harmonikleri elimine etmek istiyorsak filtre ile  $\tilde{p}$  ve  $\tilde{q}$  güçlerini sağlamamız gerekir.  $\bar{p}_0$  paralel aktif güç filtresindeki kaynaktan herhangi bir güç çekmeden kompanze edilebilir. Bu büyüklük kaynaktan yüke paralel aktif güç filtresi uçlarından ulaştırılır. Bunun anlamı akım ve gerilimin nötr bileşenleri kaynaktan yüke

transfer edilen önceki enerji şimdi kaynak fazlarından dengeli bir yolla ulaştırılır.  
(25,27)



**Şekil 3.26.** a - b - c Koordinatlarında  $p - q$  Teorisinin Güç Bileşenlerinin Paralel Aktif Güç Filtresi İle Kompanzasyonu <sup>(25,27)</sup>

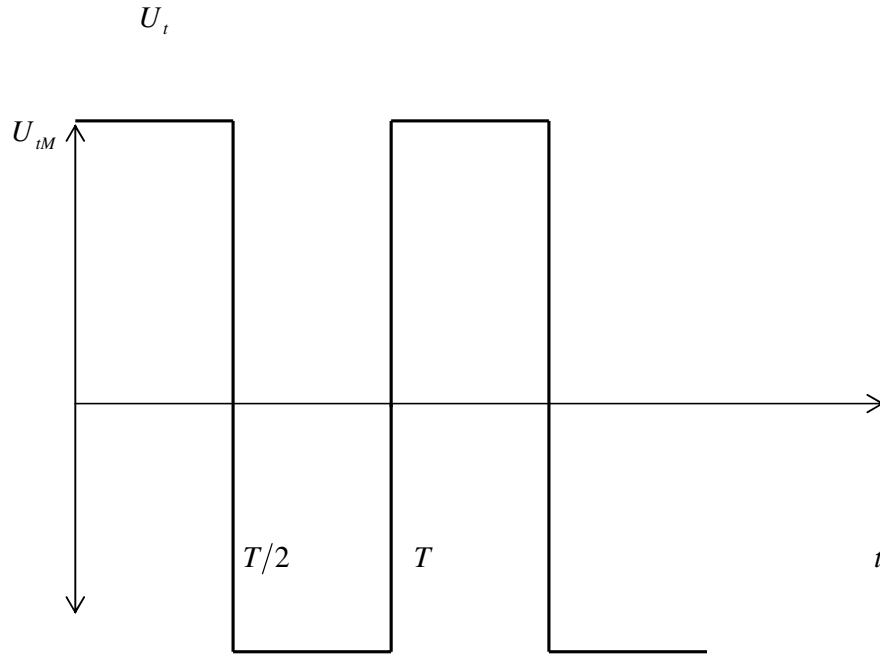
Bu sistemin üç fazlı, nötr hatsız sistem için kontrol blok şeması Şekil 3.27'de verilmiştir.  $p$  ve  $q$  güçlerinin sabit ve değişken kısımlarını ayırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır.



**Şekil 3.27.**  $p - q$  Teorisi Uygulanmış Bir Paralel Aktif Filtre İçin Kontrol Blok Şeması [32,33]

### 3.7.4. Sayısal Uygulama

Bir eviricinin çıkış dalga gerilimi Şekil 3.28.' de gösterildiği gibidir.



**Şekil 3.28.** Sayısal örnek için öngörülen çıkış gerilimi

( $U_{i1} = 220 \text{ V}$ , bağlanacak yük=5A, frekans=50 Hz)<sup>(21)</sup>

3. harmonik bileşenin temel bileşenin %5' ini aşmaması koşulu altında, filtre tasarımı yapılacaktır.

Çıkış geriliminin fourier açılımı yardımıyla harmonik analizi yapıldığında ;

$$U_{i3M} = 103.8V$$

$$U_{i5M} = 62.2V$$

$$U_{i7M} = 44.4V$$

$$U_{i9M} = 34.9V$$

$$U_{i11M} = 28.V$$

$$U_{i13M} = 23.9V$$

$$U_{i15M} = 20.5V$$

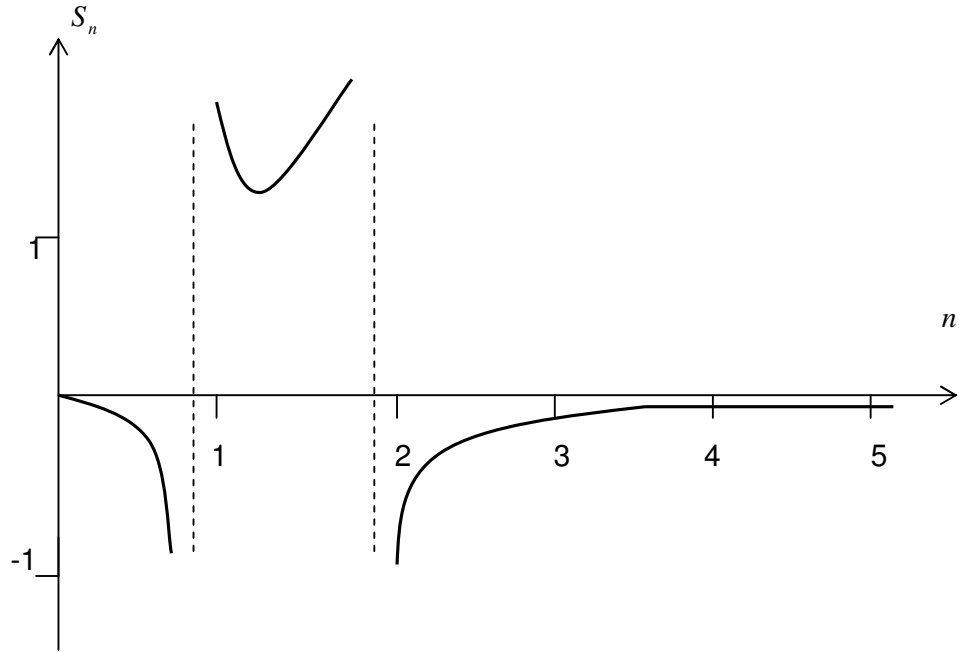
$$U_{i17M} = 18.3V$$

elde ediliyor.

İkinci etkin olan 5. harmonik gerilimi için izin verilen değerin,

$$U_5 = 0.05 (\sqrt{2} \cdot 220) = 15.55 V$$

olduğu görülmektedir.  $n = 3$  için filtre faktörünün ( $s_3$ ) işareti Şekil 3.29.' dan bakılarak bulunabilir.



**Şekil 3.29.** Filtre devresi için filtre faktörü-frekans ilişkisi <sup>(21)</sup>

Şekil 3.29.' dan  $n = 3$  için filtre faktörünün negatif olduğu görülmektedir. (3.80) numaralı eşitlikten yararlanarak;

$$s_5 = \frac{-U_{3M}}{U_{i3M}} = \frac{-15.55}{103.8} = -0.15$$

olarak bulunur. (3.83) numaralı ifade yardımı ile başlangıç için  $K_n = K_3 = 0.957$  hesaplanır.

220 V uç gerilimi ve 5A için  $X_{sC}$  değeri,

$$X_{sC} = \frac{V}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ ohm} \text{ bulunur. Buradan } C_s \text{ değeri,}$$

$$C_s = \frac{10^6}{\omega X_{sC}} = \frac{10^6}{314 \cdot 44} = 72.35 \mu F$$

olur. En yakın norm kapasite  $75 \mu F$  olduğundan,

$$X_{sC} = \frac{10^6}{\omega C_s} = \frac{10^6}{314 \cdot 75} = 42.4 \text{ ohm}$$

bulunur. Rezonans koşulunda,

$$\frac{1}{\omega C_{sC}} = X_{sL} = 42.4 \text{ ohm}$$

$$L_s = \frac{X_{sL}}{\omega} = \frac{42.4}{314} = 0.135 \text{ H}$$

(3.83) numaralı ifade gereği;

$$K_5 = \frac{X_{sC}}{X_{pC}} \Rightarrow K_5 = \frac{C_p}{C_s} \Rightarrow C_p = C_s K_5 = 72.35 \cdot 0.957 = 69.23 \mu F$$

bulunur. En yakın norm kapasite  $70 \mu F$  alınarak,

$$X_{pC} = X_{pL} = \frac{1}{\omega C_p} = \frac{10^6}{314 \cdot 70} = 45.5 \text{ ohm}$$

buradan da,

$$L_p = \frac{X_{pL}}{\omega} = \frac{45.5}{314} = 0.145 \text{ H} \text{ bulunur.}$$

Kontrol : filtre parametreleri (3.81) numaralı ifadede yerine konulursa;

$$s_n = \frac{n^2}{-\frac{X_{sC}}{X_{pC}}(n^2 - 1)^2 + n^2} = \frac{3^2}{-\frac{42.4}{45.5}(3^2 - 1)^2 + 3^2} = -0.12$$

bulunur ki -0.15 e yakın bir değerdir. Aynı şekilde (3.82) numaralı ifade yardımıyla  $r_1 = 1.643$  ve  $r_2 = 0.61$  bulunur. Sırasıyla 82.5 Hz ve 30.5 Hz olan kritik frekanslar, harmonik frekansların dışında kalmaktadır.

### 3.7.5. Aktif ve Pasif filtrelemelerin karşılaştırılması

Aktif filtre ile pasif filtreyi karşılaştırdığında, aktif filtrenin pasif filtreye nazaran üstünlüklerini maddeler halinde şöyle sıralayabiliriz;

- “ Aşırı yüklenme riskinin olmaması,
- “ Her türlü yük durumu için uyumluluk,
- “ Sistemdeki nonlineer yüklerin artması sonucunda aktif filtrenin de büyütülmesi kolay ve pratik,
- “ Tüm harmonikler yada seçilen harmonikler tümüyle yok edilebilir,
- “ Sistemle rezonansa girmesi mümkün değildir. <sup>(24,25)</sup>

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranış biçimleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

KONU	PASİF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonik Akımların Kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister.	Aynı anda daha çok harmonik akımının kontrolü mümkündür.
Harmonik frekansların değişiminin etkisi	Filtrenin etkinliği azalır.	Etkilenmez.
Empedans Modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır.	Etkilenmez.
Akım yükselmesi riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.	Aşırı yüklenme riski yoktur.
Sisteme yeni yük ilave edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.	Herhangi bir problem olmaz.
Sistemdeki temel dalga frekans değişimi	Ayarlanamaz, değiştirilmesi gerekir.	Ayar ile uyum mümkündür.
Boyutlar ve ağırlık	Harmonik genlik ve derecesine göre değişken.	Oldukça küçüktür.
Maliyet	İlk maliyet düşük, bakım maliyeti yüksek.	İlk maliyet yüksek, bakım maliyeti düşük.

**Çizelge 3.2.** Aktif Filtre İle Pasif Filtrenin Karşılaştırılması <sup>(24,25)</sup>

## 4-TARTIŞMA VE SONUÇ

### 4.1. Araştırmaya Genel Bakış

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletimi ve dağıtımını sırasında, akım ve gerilimin , 50 Hz frekansında ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler nedeni ile akı, akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüs biçimde olmaktan çıkarlar ve dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bunun sonucunda, işletme açısından arzu edilmeyen önemli sorunlar ortaya çıkar.

Kuvvetli akım tesislerinde; aşırı doymuş transformatörler, ark fırınları ark kaynak makineleri, arkla çalışan redresörler, elektrik makineleri ve artık günümüzde oldukça gelişen güç elektroniği elemanları, şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bilhassa güç elektroniğinin çok geniş kullanma sahası ve kompanzasyon sisteminin önemiyetinin anlaşılıp yaygınlaşması bu mevzunun artarak devamlı gündemde kalmasını sağlayacaktır.

Şebekenin düşük güç faktörü ile yüklü olmasının ülke ekonomisine verdiği zararın anlaşılması ile kompanzasyon tesisleri önem kazanmış ve yaygınlaşmıştır. Bu yaygınlaşma, beraberinde harmoniklerin rezonans halinde kompanzasyon tesislerinde kullanılan kondansatörlerde tahribat ve yalıtkan kablolarda delinme meydana getirmesine sebep olabilmekte ve büyük bir problem teşkil etmektedir.

Enerji sistemlerinde nonlineer yüklerin, bir başka deyişle sinüsoidal olmayan büyüklüklerin olması, geleneksel analizlerde hedeflenen



parametrelerin dışında bazı yeni parametrelerinde bilinmesine gerek gösterir. Örneğin; harmoniklerin yol açtığı ek kayıpların ve bara gerilimindeki harmonik distorsiyonun bulunması önem taşır. Bu iki büyüklük, sistemi teknik açıdan olumsuz yönde etkilemektedir.

Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri; teknik ve ekonomik problemler olarak ikiye ayrılabilir. Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen, tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise, günümüzde optimal çalışmayı etkileyen diğer önemli bir problemdir.

Enerji sistemlerinde ortaya çıkan harmonikler ek kayıplara yol açmaktadır. Söz konusu kayıp enerji maliyeti, işletmenin ekonomik olarak işletilmesinden uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan bara gerilimlerinde temel bileşen dışında harmonik bileşenlerinde var olması bu baralara paralel bağlı elektrik cihazlarının uçlarına harmonik gerilimlerin düşmesine yol açacaktır, bu ise sağlıklı bir işletme olmayacaktır.

Harmoniklerin hiç olmaması enerji sistemleri için büyük bir yarar sağlar. Ancak Harmonik üreten kaynaklarda belirtildiği gibi, günümüzde bunun mümkün olmadığı görülmektedir. O halde harmoniklerin etkilerinin azaltılması ve hatta tamamen giderilmesi düşünülebilir. Bunun için de “filtre” devrelerinin tasarlanması gerekir. Ancak hangi harmonik bileşenlerinin süzülmesi gerektiği için ayrı bir incelemeye gerek vardır. Çünkü, özellikle 5. harmonikten sonraki harmoniklerin oluşturduğu enerji kayıpları merteye itibarı ile düşüktür. Harmonik süzülmesi için kurulacak filtre düzeni tesis masrafının, o harmoniğin oluşturacağı enerji kayıp bedelini kaç yılda karşılayacağı

(amorte edeceği) incelenmelidir. Ayrıca bu amortisman süresi boyunca filtre kayıplarının da dikkate alınması gerekir.

Sonuç olarak işletmenin günlük veya aylık olarak düzenlenmiş yük eğrileri ve yükün akım harmonikleri dikkate alınarak, uzun vadeli ekonomik analiz yapılarak filtre tasarımı yapılmalı ve böylece optimal süzme işleminin gerçekleşmesine çalışılmalıdır.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi kullanan tüm kesimler için çok önemli olan ve giderek artan harmonikler konusu incelenmiş ve harmoniklerin giderilmesi için alınması gereken tedbirlerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Elektrik enerji sistemlerindeki harmonik analizlerini ortaya koyan ve çeşitli işletme durumları için harmoniklerin sistem davranışını ne ölçüde etkilediğini araştırmaya yönelik bu çalışmada,

Genel tanıtım yapılarak harmoniklerin tanımına ve tarihçesine yer verilmiştir. Harmoniklerin fourier analizi kullanılarak matematiksel analizine ve nonsinüoidal büyüklük içeren devrelerin incelenmesine yer verilmiştir. Fourier analizinde, fourier katsayılarının analitik, grafik ve ölçme yöntemi ile bulunmasına ayrıntılı olarak değinilmiştir.

Dünyanın çeşitli ülkelerinde harmonikler için getirilen sınırlamalardan bahsedilmiş ve bu sınır değerler tablolar halinde verilmiştir. Harmonik kaynaklarının geçen son on yılda önemli derecede artması sonucu, çeşitli ülkeler harmoniklere bazı sınırlamalar getirmeyi uygun bulmuştur. Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt, "Toplam Harmonik Distorsiyonu" (THD) dir.

Çalışmada ayrıca harmonik üretimine neden olan kaynaklar ve bunların harmonik üretme özellikleri açıklanmıştır. Başlıca harmonik üreten kaynaklar;

- ◆ Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmayışına dayanır. Anma gerilimlerinin üzerinde bir gerilimle beslendiklerinde çekirdek doyması sonucu mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içerir. Harmonik bileşenler yüksek bir empedans gördüklerinde besleme gerilimi de harmonik bileşenler içerir. Besleme gerilimi mıknatıslanma akımına tekrar etki ederek harmonik seviyelerini daha da büyütür.

- ◆ Döner makinelerin harmonik üretme özelliği, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; Alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Bir makine için gerçek alan şekli makine tasarımının bir fonksiyonudur. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir.

- ◆ Güç sistemlerinde en önemli harmonik kaynaklarından biri olan dönüştürücüler, sistem karakteristiklerine bağlı olarak a.a ve d.a taraflarında tipik veya sıra dışı harmonikler üretirler.

- ◆ Ark fırını ve statik VAR generatörleri de başlıca harmonik kaynaklarındandır.

Çalışmamızda, harmoniklerin belirlenmesi, akım ve gerilim harmonikleri ile harmoniklerin sistem ve sistem elemanları üzerindeki olumsuz etkilerinden bahsedilmiştir. Harmoniklerin başlıca etkileri;

◆ Harmonikler sistem elemanların çalışmalarını olumsuz yönde etkileyerek ek kayıpların oluşmasına yol açmaktadır, dolayısıyla işletim açısından ek bir maliyet getirmektedir.

◆ Doğrusal olmayan yüklerin etkisi, özellikle sistem empedansına olmak üzere sistem karakteristiklerine bağlıdır. Harmonik akımları harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedir. Gerilim harmonikler içerdiğinde ise bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise, daha çok harmonikli akım üreten yüke daha fazla etki edebilir. Bu nedenle, harmonik akımların akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmak gerekir.

◆ Harmonikler rezonans oluşma olasılığını arttırmaktadır. Harmonik rezonansları sonucu oluşan aşırı yüksek harmonik akım ve gerilimleri önemli problemlere neden olur. Kondansatörlerin büyüklükleri ve yerleri değiştirilerek sistemdeki rezonans koşulları ortadan kaldırılabılır. Kompanzasyon tesisi kurulurken aşırı kompanzasyondan kaçınılmalı ve sistemde hiçbir zaman gereğinden fazla kondansatör bulunmamasına dikkat edilmelidir. Rezonansları önlemek için en etkili yol paralel filtreler kullanmaktır.

Bu arada harmoniklerin süzülmesine ilişkin genel ilkeler ortaya konmuş, filtre tasarımından ve filtre çeşitlerinden bahsedilmiştir.

◆ Harmonik filtrelerin genel amacı, belirlenen frekanstaki harmonik akım ve gerilimlerinin genliğini azaltmaktır. Güç sistemlerinde genellikle harmonik akımlarına düşük empedansı bir yol sunan paralel filtreler kullanılır. Bu filtreler temel frekansta reaktif güç üretebilirler, daha ekonomiktirler ve seri filtrelere göre tasarımları daha kolaydır.

◆ Teknik ve ekonomik durumlar da dikkate alındığında filtre tasarımında pratik kriter, harmonik bozulmayı diğer tüketiciler ile ortak bağlantı noktasında kabul edilebilir bir seviyeye indirmektir.

◆ Ekonomik durum dikkate alınarak düşük mertebeli harmonikleri süzmek için (5., 7., 11.) bant geçiren filtreler kullanılır. Daha yüksek mertebeli harmonikler (13. ve üzeri) için yüksek geçiren filtreler kullanmak daha uygundur. 11. ve 13. harmonikleri süzmek için 11. veya 12. harmonik frekansına ayarlı bant geçiren filtre devresi seçilebilir.

◆ Var olan kondansatör gruplarına istenen harmonik frekansında rezonans oluşturacak biçimde seçilen seri endüktans bobinleri eklenebilir. Böylece 50 Hz' de kompanzasyon yapılırken, harmonik akımlarının süzülmesi de sağlanmış olur.

#### **4.2. Harmonik etkilerine karşı alınabilecek önlemler**

1) Telefon hattı ile iletim hattının ortak devresindeki yüksek harmonik akımları, aralarındaki indükleme etkisi ve aynı topraklama yolunu paylaşmaları, telefon parazitlerine neden olur. Bu problemi önlemek için topraklanmış kondansatörler ile sistem rezonans koşullarını değiştirmek, kondansatör yerlerinin değiştirmek, telefon sisteminde gürültü yok eden

transformatörler ya da kuvvetlendiriciler kullanmak veya kabloların yerlerini değiştirmek gereklidir.

2) Güç sistemlerindeki harmonik kaynaklarının fazlalığı veya güç sisteminin bir veya birden fazla frekansta rezonansa girmesi aşırı gerilim harmoniklerine neden olur. Kondansatör ünitelerinin yerlerini değiştirmek veya büyüklüklerini ve anahtarlama kontrollerini değiştirmek bu problemi çözebilir.

3) Sistem kondansatörlerinin, yüksek akımlara neden olan bir harmonik frekansında rezonansa girmesi ve harmonik kaynağının çok büyük olması kondansatör sigortalarının atmasına ve yüksek harmonik akımına sebep olabilir. Kondansatör ünitesine seri endüktans bağlamak veya kondansatör büyüklüğünü değiştirmek çözümlerden bazılarıdır.

4) Aşırı harmonik akımları ve transformatörün yük tarafında; bir harmonik frekansında bir kondansatör ile rezonansa girmesi güç transformatörlerinin anma güçlerinin altında aşırı ısınmalara neden olur. Bunu önlemek için kondansatör ünitesini ayarlamak, kondansatör büyüklüğünü değiştirmek veya paralel filtre kullanmak gerekmektedir.

5) Güç sistemlerindeki en önemli harmonik kaynaklarından olan 6 ve 12 darbeli dönüştürücüler, hem doğru hem de alternatif akım tarafında tipik ve sıra dışı harmonikler üretirler. Bu harmoniklerin en önemli nedeni; kontrolsüz dönüştürücülerde sistem dengesizlikleri, kontrollü dönüştürücülerde ise ateşleme açısı hatalarıdır. Pratikte sıra dışı harmoniklerin önlenmesi olanaksızdır. Ancak sistem kontrol büyüklüklerinin ayarlanmasıyla ve tetikleme kontrolünün düzenlenmesiyle azaltılabilirler.

Tipik harmonikleri önlemenin en geçerli yolu ise çeşitli filtreleme teknikleri kullanmaktır.

#### **4.3. Harmonik etkileri en aza indirmek için Öneriler**

1) Sistem üzerindeki nonlineer yüklerin olabildiğince dar bir alanda ve günlük yükleme periyodunun olabildiğince küçük bir diliminde kullanılmasına çalışılmalıdır.

2) Harmonikli yük çekecek (veya çekmekte olan) tüketicilerin  $I_n/I_1$  ( $n = 2,3,\dots$ ) oranlarına sınırlamalar getirilmelidir. Bu sınırlamanın güç kompanzasyonuna benzer şekilde elektriği üretme ve dağıtmadan sorumlu olan kurum tarafından bir yaptırım halinde yönetmeliklere veya projelendirme esaslarına alınması düşünülebilir.

3) Harmonikli akım çeken tüketiciler uygulanan tarife fiyatları (YTL/kWh) THD ölçüsünde arttırılabilir. Örneğin, harmonikli yüklenmeyi ekonomik yoldan caydırmak ve filtre kullanımını teşvik etmek amacı ile, söz konusu tüketicinin okunan sayaç değeri "k" katsayısı ile çarpılabilir. Binde 2 veya daha büyük bir değerle k değeri çarpılarak yeni bir k değeri belirlenebilir. Yeni  $k > 1.002$  kabul edilebilir. Bu yeni k değeri, ilgili kurum tarafından belirlenecek ölçütler göre örneğin, "k-THD" ilişkisinden belirlenebilir.

4) Uzun yıllardır lineer yük çeken tüketici grupları, son yıllarda güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı sonucu lineer yüklerin yanı sıra nonlineer yükler de çekmektedirler. Sanayi tesislerinin yoğun olarak bulunduğu yerlerde yılda en az bir kez yapılacak ölçümlerle her yük için harmonik oluşturup oluşturmadığı veya THD seviyesi belirlenmelidir.

5) Sanayi tesislerinin harmonik konusunda ortaya çıkabilecek teknik sorunlarına teknik danışmanlık ve çözüm getirmek üzere, (Güç kompanzasyonu örneğinde olduğu gibi) özel kuruluş ve birimlerin oluşturulması özendirilmelidir. Güç kompanzasyonu tasarım ve montajında gelinen noktaya harmonik filtre tasarımı ve donanımı konusunda da gelinmesi, gelecekte daha yaygın olarak gözlenecek harmonik probleminin çözümüne katkı sağlayacak nitelikte olacaktır.

#### **4.4. Sonuç**

Güç sistemlerinde önem kazanan harmonik problemi için, Ülkemizin fazla gecikmeden önleyici tedbirler almasında büyük yarar vardır. Tüketicilerin bu konuda bilinçlendirilmesi çok önemlidir. Büyük tüketicilerin tesislerinde filtre kullanılmasının teşvik edilmesi ve tüketicilerin sebep olduğu THD ölçüsünde yeni bir fiyat tarifesi uygulanması gibi tedbirler düşünülebilir.



## KAYNAKLAR

1. YEŞİL, Mustafa, “Enerji Sistemleri Üzerindeki Nonlineer Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler”, M.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1996
2. KOCATEPE, Celal, “Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu”, Y.T.Ü. Doktora Tezi, İstanbul-1994
3. ERKAN, Enver, “Nonlineer Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi”, M.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1996
4. [www2.egenet.com.tr/~kuldemir/harmonik.html](http://www2.egenet.com.tr/~kuldemir/harmonik.html), Haziran-1999
5. İZMİRLİOĞLU, Işık, “Fourier Serileri ve Laplace Dönüşümleri”, M.Ü. yayınları:90/1, İstanbul-1990
6. SELAMOĞULLARI, Savaş , “Enerji Sistemlerindeki Harmoniklerin Koruma Sistemleri Üzerine Etkisi”, Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1998
7. GÖKALP, E. , “Güç Sistemlerine Harmoniklerin Etkileri” , Y.T.Ü.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1988
8. GÜRÇAN, Süleyman, “Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Transformatör Üzerinde Oluşturduğu Ek Bakır Kayıpları”, Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1996
9. TOK, Süleyman, Süha, “Enerji Sistemlerinde Meydana Gelen Harmoniklerin Analizi Harmonik Standartları ve Ölçüm Teknikleri”, Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1998
10. İNAN, A., ATTAR, F., “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri ve Bir Harmonik Kontrol Kartı Modeli”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:98, Nisan-1997

- 11.KOCATEPE, Celal, DEMİR Abdullah, “Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel bakış”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:113, Ağustos-1998**
- 12.ÇELTEKLİGİL, Uğur, “Dinamik Reaktif Güç Kompanzasyonu”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:21, Şubat-1984**
- 13.HASARLI, Bekir, “Güç Sistem Harmonikleri ve Harmoniklerin Süzülmesi”, Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1995**
- 14.PEŞİNT, M. Adnan, “Senkron Makinalar”, Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Matbaası, Ankara-1975**
- 15.TEMİZ, İsmail, “Farklı Stator Sargılı Asenkron Motorların hava Aralığında Meydana Gelen Dalga Şeklinin Analizi”, M.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, Sayı:15, İstanbul-1999**
- 16.BOYLESTAD, Robert, NASHELSKY, L., “Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi”, Çeviri:Hakan ÖZYILMAZ-Ünal KÜÇÜK, M.E.B. yayınları, Ankara-1994**
- 17.ZORLU, Sibel , “Ark Fırınlarının Şebeke Üzerindeki Etkileri ve Harmonik Kayıplarının Analizi”, Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul-1996**
- 18.AY, Selim, “Alçak Gerilim Tesislerinde Harmoniklerin İncelenmesi”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:129, Aralık-1999**
- 19.AY, Selim, “Harmonikli Yükleri İçeren Elektrik Enerji Sistemlerindeki Manyetik Alanların Çevre Yönünden Değerlendirilmesi”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:82, Eylül-Ekim-1994/5**
- 20.AY, Selim, “ Alçak Gerilim Tesislerinde Harmonik Kayıp Enerji Maliyetini Dönemlik Nakit Akışı Bakımından Değerlendirilmesi”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:114, Eylül-1998**

- 21.**AY, Selim, “ Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:95, Kasım-Aralık-1996/6
- 22.**ERTAN, U., “Elektrik Şebekelerinde Harmonikler”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:81, Temmuz-Ağustos 1994/4
- 23.**YALÇIN, Bahadır, “Aktif Harmonik Filtreler”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:134, Mayıs-2000
- 24.** ARGİN , M. “Güç Sistem Harmonik Filtreleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2000).
- 25.** ERDOĞAN, N. “Aktif Güç Filtrelerinin İncelenmesi Ve MATLAB İle Bir Simülasyon Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2001).
- 26.** BHASKER, M. “Comperative Evaluation Of Control Strategies For Three Phase Active Power Filters – Using MATLAB Simulink”, MSc Thesis, Regioanal Engineering College Department Of Electrical Engineering, Kerala, India, (2001).
- 27.** AFONSO, J. Couto, C.; Martins, J.; “Active Filters With Control Based On The  $p-q$  Theory”, IEEE Industrial Electronics Newsletter, Vol:47, No:3, (2000).