

68215

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİKLERİN ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ve PSPICE İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh Feridun KOÇYİĞİT

Enstitü Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Müh.

Bu tez 24/06/1997 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ertan YANIKOĞLU

Prof. Dr. M. Uğur ÜNVER

Yrd. Doç. Dr. M. Ali YALÇIN

Jüri Başkanı

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisi kullanan bütün tüketiciler için çok önemli olan ve önemi giderek artan harmonikler dikkatlerin bu konuya çevrilmesine neden olmuştur.

Bu tezde, harmonik tanımı, harmoniklerin meydana gelişi, harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin şebeke ve çevre tüketicilere olan etkileri, oluşan harmoniklerin analizi için yöntemler, harmonikler için belirlenmiş sınırlamalar ve oluşan harmoniklerin filtreleme ile elimine edilmesi konularına yer verilmiştir.

Bu konuda bana çalışma olanağı veren ve çalışmalarım sırasında her türlü yardımı sağlayan sayın tez hocam Yrd. Doç. Dr. Ertan YANIKOĞLU' na en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
TÜRKÇE ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x

BÖLÜM 1

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2

HARMONİK ANALİZİ.....	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Fourier Analizi.....	9
2.3 Fourier Dönüşümü	11
2.4 Örneklenmiş Zaman Fonksiyonları.....	12
2.5 Ayrık Fourier Dönüşümü.....	13
2.6 En Çok Karşılaşılan Dalga Şekilleri ve Bunların Fourier Açılımları.....	15

BÖLÜM 3

HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

3.1 Giriş.....	19
3.1.1 Generatörler.....	21
3.1.2 Transformatörler.....	21
3.1.3 Güç elektroniği sistemleri.....	23
3.1.4 Arkla çalışan işletme araçları.....	24

BÖLÜM 4

HARMONİKLERİN ŞEBEKEYE ve ÇEVRE TÜKETİCİLERE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

4.1 Giriş.....	26
4.2 4.2 Transformatörler Üzerindeki Etkiler.....	26
4.3 Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler.....	27
4.3 Generatör ve Şebeke Gerilimleri Üzerine Etkileri.....	27
4.4 Gerilim Düşümünün Artması ve Fliker Olayı.....	27
4.6 Kondansatör Üzerindeki Etkileri.....	28
4.7 İletim Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri.....	31
4.8 İletkenler Üzerindeki Etkileri.....	32
4.9 İzolasyon Delinmesi.....	32
4.10 Koruyucu Röleler Üzerindeki Etkileri.....	33
4.11 Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri.....	33
4.12 Aydınlatma Donanımı Üzerindeki Etkileri.....	34
4.13 Ölçme Aletlerine Olan Etkileri.....	34
4.14 Harmoniklerin Sebep Olduğu Kayıplar.....	35
4.15 Elektrik Tesislerinde Rezonans Olayları ve Bunlara Karşı Tedbirler.....	37
4.16 Harmonik Rezonansına Karşı Tedbirler.....	49

BÖLÜM 5

HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI

5.1 Giriş.....	52
5.2 Harmoniklerin sınırlandırılmasının Amacı.....	54

BÖLÜM 6

FİLTRELER

6.1 Giriş.....	59
6.2 Pasif Filtreler.....	60
6.3 Filtre Tasarımı.....	62

6.4 Aktif Filtreler.....	70
6.5 Aktif ve Pasif Filtrelerin Birlikte Kullanımı.....	74

BÖLÜM 7

PASİF FİLTRE TASARIMI

7.1 Tasarlanan Örnek Filtre ve Pspice ‘ ta Yazılan Program ile Bunların Sonucunda Elde Edilen Simülasyon Sonuçları.....	81
--	----

SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR.....	91
EKLER.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Örneklenmiş zaman domeni fonksiyonu.....	12
Şekil 2.2 Ayrık zaman domeni fonksiyonu için frekans spektrumu.....	13
Şekil 3.1 Sinüsoidal Şebeke Gerilimi ile Transformatörün Demir Çekirdeğine Ait Mıknatıslanma Eğrisi Yardımı ile Mıknatıslanma Akımının Elde Edilmesi.....	21
Şekil 4.1 h. Harmonik İçin Seri Titreşim Devresi.....	38
Şekil 4.2 Seri Titreşim Devresinin Empedansının ve Devreye Uygulanan Gerilimin Frekansa Bağlı Olarak Değişimi.....	40
Şekil 4.3 Seri Titreşim Devresinde Akımın Frekansa Göre Değişimi.....	42
Şekil 4.4 h. Harmonik İçin Paralel Titreşim Devresi.....	43
Şekil 4.5 Paralel Titreşim Devresinde Toplam Empedansın Farklı Eşdeğer Reaktans Değerlerine Göre Frekansa Bağlı Olarak Değişimi.....	48
Şekil 4.6 Paralel Titreşim Devresinde Akımın ve Gerilimin, Farklı Eşdeğer Reaktans Değerlerine Göre Frekansa Bağlı Olarak Değişimi.....	48
Şekil 6.1.a Frekansı ayarlanabilen tek kollu paralel filtre devresi.....	61
Şekil 6.1.b Tek kollu paralel filtre empedansının frekansla değişimi.....	61
Şekil 6.2.a İkinci dereceden söndüren paralel filtre devresi.....	61
Şekil 6.2.b İkinci dereceden söndüren paralel filtre devre empedansının frekansla değişimi.....	61
Şekil 6.3 Gerilim harmonik bozulmalarının hesaplanması için devre.....	63
Şekil 6.4 Yüksek geçiren söndüren filtreler.....	69
Şekil 6.5.a Aktif filtrenin devreye bağlanması.....	70
Şekil 6.5.b Akım dalga şekilleri.....	71
Şekil 6.6 Gerilim kaynaklı aktif filtre örneği.....	71
Şekil 6.7 Akım kaynaklı aktif filtre.....	73
Şekil 6.8 Akım kaynaklı aktif filtre akımları.....	74

Şekil 6.9 Seri aktif ve pasif paralel filtrelerin kombinasyonu.....	75
Şekil 6.10 Önerilen sistem konfigürasyonu.....	76
Şekil 6.11 Örnek filtre sistem eşdeğer devresi.....	77
Şekil 6.12 $Z_s=0.02$ p.u için deneysel sonuçlar.....	78
Şekil 6.13 $Z_s=0.06$ p.u için deneysel sonuçlar.....	79
Şekil 7.1 AC filtre dizaynı ile ilgili bir örnek	81
Şekil 7.2 Tasarlanan örnek filtrenin pspice simülasyon programından alınan giriş ve çıkış dalga şekilleri ile bu dalgalara ait Fourier açılımları.....	83
Şekil 7.3 Tasarlanan örnek filtrede beşinci harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun Fourier açılımları.....	84
Şekil 7.4 Tasarlanan örnek filtrede yedinci harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun Fourier açılımları.....	85
Şekil 7.5 Tasarlanan örnek filtrede onbirinci harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun Fourier açılımları.....	86
Şekil 7.6 Tasarlanan örnek filtrede onüçüncü harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun Fourier açılımları.....	87
Şekil 7.7 Tasarlanan örnek filtrede yüksek geçiren harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun Fourier açılımları.....	88
Şekil A.1 Yarım kare dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	92
Şekil A.2 Tam kare dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	93
Şekil A.3 Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	94
Şekil A.4 Tam dalga doğrultulmuş sinüs dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	95
Şekil A.5 Trapez dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	96
Şekil A.6 Testere dişi dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı.....	97

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 Elektrik sistemleri üzerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri.....	4
Tablo 1.2 Şebekedeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar.....	5
Tablo 1.3 Bozucu etkileri azaltma çareleri.....	6
Tablo 5.1 Bazı ülkelerin kabul ettiği harmonik sınırlar.....	55
Tablo 5.2 Bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşeninin yüzdesi olarak maksimum harmonik limitleri.....	56
Tablo 5.3 Kabul edilebilir gerilim harmonik sınırları.....	58
Tablo 6.1 Devre bileşenleri.....	77

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Harmonik, harmonik üreten kaynaklar, harmonik etkileri, harmonik analizi , harmonik sınırlar, filtre.

Harmonikler, temel bileşenin tam katlı frekanslarındaki bileşenleridir ve temel bileşende bozulmaya yol açarlar. Non-lineer yükler şebekeden aldıkları saf sinüs dalga şeklini ürettikleri harmonikli akım ve gerilimler şeklinde şebekeye katarlar ve enerji kalitesini bozarlar.

Bu çalışmada, önce harmonikler teorik olarak incelenmiş, harmonik üreten kaynaklar ve oluşan harmoniklerin şebeke ve etrafındaki tüketicilere etkileri ele alınmıştır. Sonraki bölümlerde harmonik analiz yöntemleri açıklanarak, geliştirilen bilgisayar programı yardımı ile çeşitli dalga şekillerinin fourier analizleri yapılmıştır. Farklı ülkeler için THD (Toplam Harmonik Distorsiyonu) sınırlamaları karşılaştırılarak THD'yi istenilen sınırlar içerisinde tutulabilmesi için filtreler ayrıntılı olarak incelenmiş, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Aktif ve pasif filtrelerin birlikte kullanılmasının yararları üzerinde durulmuştur. Ayrıca bir pasif filtre örneği ile ilgili simülasyon sonuçları verilmiştir.

SUMMARY

Key Words: Harmonic, harmonic producing sources, harmonic effect, harmonic analysis, harmonic limit, filter.

Harmonic components are the whole number multiples of the fundamental frequency component. Harmonics are causing distortions at the fundamental frequency component. Non linear loads are injecting produced harmonic current and voltage to the supply and hence disturbing the power system energy quality.

In this work, firstly the harmonics are investigated theoretically and the effects of these to the network and the surrounding consumers. In the following sections the methods for harmonics analysis are explained. Further more a computer programme was developed and with the help of this program fourier analysis of different shapes of waveforms has been caried out. Different total harmonic distortion for various countries has been compared and the filters for keeping the THD in the mentioned limits has been studied in details. Also the disadvantages and advantages of these filter has been comparatively examined. The advanteges of using the active and passive filters together has been pointed out. Finally, simulation results of a passive filter example has been shown.

BÖLÜM 1 . GİRİŞ

Gelişen elektrik-elektronik teknolojisi, elektrik tesislerinin gerek çalışma karakteristiklerini gerekse işletme giderleri açısından sanayide önemli yararlar sağlamasına yol açmıştır. Buna karşılık anılan yeni tesis ve yöntemlerin şebekeye ve civar tüketicilere yaptığı olumsuz etkiler de artmıştır. Bu olumsuz etkiler kısaca, gerilim dalgalanmaları, simetrisizlik ve harmoniklerdir. Bu çalışmada yalnızca harmonikler ele alınacaktır.

Elektrik şebekesinde üretilen gerilimin sinüzoidal olduğu kabul edilmektedir. Buna karşılık iletim ve dağıtım hattı ile yükler, gerilimin dalga şeklinin saf sinüs şeklinden sapmasına yol açabilir. Gerilim dalga şeklindeki bozulmanın en önemli nedeni, uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntısı lineer olmayan yüklerdir. Bu tür nonlineer yükler, 50 Hz. temel frekanslı aktif ve reaktif güç tüketen, harmonik frekanslı akımlar üreten tüketiciler olarak kabul edilirler. Bu tüketicilerin ürettiği harmonik frekanslı akımlar devrelerini şebeke ve civar tüketiciler üzerinden kapatarak harmonik frekanslı gerilimler meydana getirirler. Bu gerilimler ise başlangıçta saf sinüs kabul edilen gerilimin dalga şeklini bozarlar. Bu bozulma, diğer bir deyişle şebekenin değişik noktalarındaki gerilim harmoniklerinin değeri; yükün meydana getirdiği harmonik akımının değerine civar tüketicilerin ve şebekenin parametrelerine doğrudan doğruya bağlıdır [1].

Güç şebekesindeki harmoniklerin meydana getirdiği sorunlar uzun yıllardır bilinmektedir. Bu sorunlar senkron ve asenkron makinalardaki ısınma ve salınımlar, telefon hatlarındaki karışmalar ve güç kondansatörlerinin arızalanması olarak biliniyordu. Günümüzde ise, gelişen güç elektroniği teknolojisi, harmoniklerin artmasına yol açmıştır. Sanayide kullanılan ve harmonik üreten yeni aygıtlara ek

olarak elektrik makinalarının ve cihazlarının tasarım ilkelerindeki değişiklikler de şebekedeki harmoniklerin artmasına yol açmıştır.

Elektrikli aygıtlara en büyük zararı, değeri 5 kHz den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir. Geçmişte, şebekede harmonik meydana getiren etkenler ve bunların meydana getirdiği harmoniklerin mertebeleri küçüktü. Bugün ise, güç elektroniğinde meydana gelen gelişmeler, harmoniklerin şebekede ve tüketicilerde meydana getirdikleri zararların artık kabul edilemez boyutlara vardığını göstermektedir.

Şebekedeki harmonik kaynakları:

Şebekede harmonik meydana getiren etkenler ve aygıtlar iki grupta incelenebilirler.

- Öteden beri bilinen harmonik kaynakları
- Yeni harmonik kaynakları

Ötedenberi bilinen harmonik kaynakları:

- a) Elektrik makinalarındaki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler,
- b) Çıkık kutuplu senkron makinalarda hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler,
- c) Senkron makinalarda ani yük değişimlerinin meydana getirdiği magnetik akı dalga şeklindeki bozulmalar,
- d) Senkron makinaların hava aralığı döner alanın harmonikleri,
- e) Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- f) Şebekedeki nonlineer yükler. Doğrultucular, eviriciler, kaynak makinaları, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler vs.

Yeni harmonik kaynakları:

- a) Enerji tasarrufu amacı ile kullanılan aygıtlar ve uygulanan yöntemler,
- b) Motor hız kontrol düzenleri, özellikle elektrikli demiryolu tesisatı,
- c) Doğru akım ile enerji nakli,

- d) Yeni enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üreten tesislerin şebekeye bağlanması,
- e) Statik VAr kompanzatörleri,
- f) Kesintisiz güç kaynakları,
- g) Direkt frekans çeviricisi ile beslenen momentli büyük hızı küçük motorlar,
- h) Endüstriyel ısıtma amacı ile fırıncılarca “integral cyle” kontrol tekniğinin kullanılması,
- i) Olasılıkla elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri.

Bu açıklamalar doğrultusunda “Elektrik sistemleri üzerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri” Tablo 1.1’de , “Şebekelerdeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar” Tablo 1.2’de ve “Bu etkileri azaltma çareleri” Tablo 1.3’de gösterilmiştir [2].

TABLO 1.1 Elektrik sistemleri üzerinde bozucu etki yaratan alıcı türleri

No	Alıcı Türleri	Bozulmanın Türü			
		Gerilim Dalgalanması	Dengesizlik (*)	Harmonik	Ara Harmonik
1	Önemli yükler (Açma-Kapama)	+			
2	Büyük motorlar	+			
3	Işık rampaları (Diskotekler)	+			
4	Kaynak makinaları	+	+	+	+
5	Dirençli döküm fırınları		+		
6	İletkenli ısıtma tesisatları		+		
7	Ark ısıtıcıları		+		
8	Kül ergitme fırınları		+		
9	Elektrot imalatına ait rezistanslı fırınlar		+		
10	Presler				+
11	Lineer olmayan akım-gerilim özelliği gösteren sistemler yada düzenler				
	Ark ocakları	+	+	+	+
	Endüksiyon ocakları		+	+	
	Doymuş demir çekirdekli endüktanslar			+	
	Doymuş trafolar			+	
12	Güç elektroniğinde, sinüs biçiminde olmayan akımları oluşturan düzenler				
	Statik konvertörler			+	
	Frekans konvertörleri			+	+
	Dimmerler			+	
	Televizyonlar			+	
(*) Orta ve yüksek gerilimde görülen dengesizlikler içindir.					

TABLO 1.2 Şebekedeki bozulmaların neden olduğu olumsuzluklar

Bozulma Türü			Olumsuzluklar
Gerilim Dalgalanması	Dengesizlik	Harmonik	
+			-Fliker
+		+	-Cihaz ve teçhizat zorlanması
	+		-Trafo geçiş gücünün izafi olarak azalması
	+		-Besleme sistemi kayıplarının artması
	+	+	-Asenkron ve senkron makinalarda kayıpların artmasına bağlı olarak belirli veya kritik ısınmaların meydana gelmesi
+	+		-Kumanda ve regülasyon sistemlerinin etkilenmesi
		+	-Isımmalar sonucunda motor ve kondansatör ömrünün kısalması
		+	-Kumanda elektroniklerinde bozukluklar
		+	-Merkezi ve uzaktan kumanda alıcılarının hatalı çalışması
		+	-Şebekede beklenmeyen ve önceden kestirilmeyen rezonansların oluşması
		+	-Trafolarda kayıpların artması ve izolasyonun zorlanması
		+	-Akkor flamanlı lamba ömürlerinin kısalması
		+	-Kesici kesme kapasitesinin etkilenmesi
		+	-Ölçü sistemlerinin ve sayaçların hatalı çalışması

TABLO 1.3 Bozucu etkileri azaltma çareleri

Gerilim Dalgalanması		Dengesizlik	Harmonik	Ara Harmonik
*Tesis bağlantısını yeterli kısa devre gücü olan noktada yapmak veya noktanın kısa devre gücünü arttırmak				
Reaktif güç kompensasyon tesisi kurmak (Gerilim dalgalanmasını azaltacak düzende)		Bir fazlı yüklerin her üç faz üzerinde dengeli dağılımını sağlamak	Rezonans yaratan kompensasyon cihazlarını azaltmak	Mekanik kaynaklılar için, karşıt ağırlık veya volanlar yardımı ile genliklerin azaltılması
Ö	MOTORLARDA	Kondansatör ve endüktanslarda dengeleme tesisatı kurmak	Harmonik filtreleri kullanmak	Konvertörlerde filtre kullanarak ara harmoniklerin azaltılması
Z	Akım sınırlayıcılar kullanmak	Statik konvertörler arasında çapraz bağlantı yapmak	Konvertör sıralarını arttırmak	Motor rejiminin yavaş değişimini temin etmek. (Anma akımının sınırlandırılması)
E				
L				
Ö	Yüzey etkili rotorlu motorları kullanmak (çok büyük reaktanslı)		Değişik bağlantılı trafolar kullanmak	
N	İşletme koşullarını iyileştirmek		Bazı durumlarda darbeli kumanda yerine dalga dizili kumanda kullanmak	
L				
E	Yük dalgalanmasını azaltmak(Volan ve kütle kullanma)		Şebeke İşletme şemasını değiştirerek rezonans koşulu dışına çıkmak	
M				
L	KAYNAK MAKİNELERİNDE			
E	Gerilim değişikliğinin eş zamanlılığını önlemek			
R	DC akımlı makina kullanmak			
	ARK FIRINLARINDA			
	DC akımlı makina kullanmak			
	Elektrot kumandalarını değiştirmek.			
Not:Yukarıdaki önlemler Fliker ve harmonik denetiminin olumlu bulunması halinde geçerlidir				

BÖLÜM 2 HARMONİK ANALİZİ

2.1. Giriş:

Alternatif akım tesislerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi esnasında gerilimin ve akımın tam sinüs şeklinde olması arzu edilir ve normal şebeke frekansı 50 Hz. dir. Fakat bazı yan tesirler ve bozucu olaylar yüzünden gerilimin ve akımın şekli bozulur ve sinüs formundan ayrılır. Gerilimin ve akımın sinüs şeklinde olmaması, enerji tesislerinde birçok zararlı tesirlere yol açarlar.

Güç sistemindeki akım ve gerilimlerin harmonik içeriği sabit değildir. Doğrusal olmayan yüklerin sistemdeki dağılımından, kondansatörlerin devreye girip çıkmasından etkilenir. Ayrıca, bir güç sisteminde değişik tipte ve çok sayıda yüklerin bulunması, harmoniklerin meydana getirdiği bütün bozucu etkileri ifade edebilecek yalın bir ölçüt geliştirilmesini zorlaştırmaktadır.

Harmonik; frekansı, temel frekansın tam katı olan ve sinüs biçiminde değişen dalgadır. Genel olarak bilindiği gibi, sinüs şeklinde olmayan herhangi periyodik bir fonksiyon, fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir.

Bozulmuş periyodik bir dalga şeklinin harmoniği Fourier serisi ile açıklanabilir.

2.2 Fourier Analizi

2.2.1 Fourier analizi ve katsayıları

Fourier analizinin amacı, rastgele periyodik bir işareti bileşenlerine ayırmaktır.

Periyodik bir fonksiyonun Fourier serisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n * \cos\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right) + b_n * \sin\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right) \right] \quad (2.1)$$

Bu ifade, periyodik bir fonksiyonun “ frekans domenindeki” gösterilişidir.

Burada a_0 , $X(t)$ fonksiyonunun ortalama değeri, a_n ve b_n ise serinin katsayılarıdır. n . harmonik vektörüne karşılık gelen

$$\text{Genlik; } A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \quad \text{ve} \quad (2.2)$$

$$\text{Faz Açısı; } \phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.3)$$

ile ifade edilir.

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

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) * dt \quad (2.4)$$

Bu ifade, dalga şeklinin T periyotları ile bölünmüş, $-T/2$ 'den $T/2$ 'ye kadar olan $X(t)$ eğrisinin altındaki alanıdır.

a_n katsayısı, $\cos\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right)$ ile (2.1) nolu denklemin çarpılması sonucu elde edilir. Burada, n herhangi bir pozitif tamsayıyı gösterir. Bu ifade integral alındıktan sonra aşağıdaki hale dönüşür.

$$a_n = \frac{2}{T} * \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) * \cos\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right) * dt \quad (2.5)$$

Benzer şekilde b_n katsayısını bulmak için de, (2.1) denklemini ile $\sin\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right)$ ifadesi çarpılarak integrale edilirse aşağıdaki hale dönüşür.

$$b_n = \frac{2}{T} * \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) * \sin\left(\frac{(2*\Pi*n*t)}{T}\right) * dt \quad (2.6)$$

a_0 , a_n ve b_n in açısal frekansa göre aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$a_0 = \frac{1}{2*\Pi} * \int_{-\Pi}^{\Pi} X(wt) * dw \quad (2.7)$$

$$a_n = \frac{1}{\Pi} * \int_{-\Pi}^{\Pi} X(wt) * \cos(n*w*t) * dw \quad (2.8)$$

$$b_n = \frac{1}{\Pi} * \int_{-\Pi}^{\Pi} X(wt) * \sin(n*w*t) * dw \quad (2.9)$$

2.2.2 Tek simetri

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

$$b_n = \frac{4}{T} * \int_0^{\frac{T}{2}} X(t) * \sin\left(\frac{2 * \Pi * n * t}{T}\right) * dt \quad (2.10)$$

olur ve a_n terimleri tüm n değerleri için sıfıra eşit olur. Yani bir tek simetriye sahip olan fonksiyon için Fourier serileri sadece sinüslü terimleri içerir.

2.2.3 Çift simetri

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

$$a_n = \frac{4}{T} * \int_0^{\frac{T}{2}} X(t) * \cos\left(\frac{2 * \Pi * n * t}{T}\right) * dt \quad (2.11)$$

olur. Yani bir çift simetriye sahip olan fonksiyon için Fourier serileri sadece cosinüslü terimleri içerir.

Belirli dalga şekilleri, seçilen zaman referans alınarak tek veya çift olabilir.

2.2.4 Yarı dalga simetrisi

$X(t) = -X(t + T/2)$ ye eşit olan bir $X(t)$ fonksiyonu yarı dalga simetrisine sahiptir ve yarı dalga simetrisinde;

$$a_n = \begin{cases} n & \text{tek sayı} \Rightarrow \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} X(t) * \cos\left(\frac{2*\pi*n*t}{T}\right) * dt \\ n & \text{çift sayı} \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$b_n = \begin{cases} n & \text{tek sayı} \Rightarrow \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} X(t) * \sin\left(\frac{2*\pi*n*t}{T}\right) * dt \\ n & \text{çift sayı} \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

Buradan anlaşılacağı gibi yarı dalga simetrisine sahip olan dalga şekilleri, sadece tek sıralı harmonikleri içermektedir.

2.3 Fourier Dönüşümü (Fourier Transformu)

Fourier Transformu, zaman domenindeki bilgilerden (fonksiyonlardan) yararlanarak, frekans domenindeki fonksiyonları elde etmeye yarar ve

$$F\{X(t)\} \triangleq X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) * e^{-j\omega t} * dt \quad (2.14)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

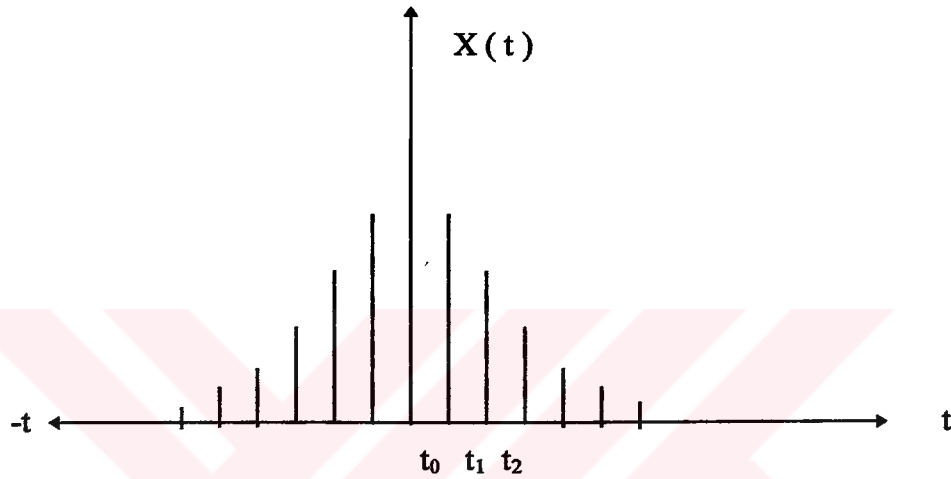
Ters Fourier Transformu, frekans domenindeki fonksiyonları kullanarak, zaman domenindeki fonksiyonları elde etmeye yarar ve

$$F^{-1}\{X(w)\} \triangleq X(t) = \frac{1}{2*\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w) * e^{j\omega t} * dw \quad (2.15)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

2.4 Örneklenmiş Zaman Fonksiyonları

Fonksiyonlar, zaman domenindeki örnekler ile kaydedilir ve şekil (2.1)'de olduğu gibi gösterilir.



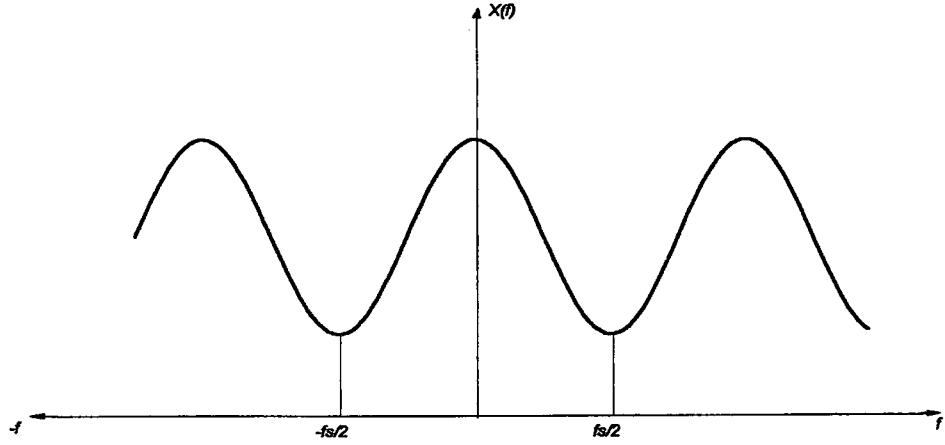
Şekil 2.1 Örneklenmiş zaman domeni fonksiyonu.

Burada $f_s = 1/t_1$, örnekleme frekansını verir. Bu durumda sinyalin Fourier dönüşümü, her örneğin $e^{j2\pi n f_s t_1}$ ile çarpılmış olan ayrı sinyallerin toplamı olarak ifade edilir.

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(nt_1) * e^{-j2\pi f_n t_1} \quad (2.17)$$

Şekil (2.2)'de görülen frekans domeni spektrumu periyodik ve sürekli dir. Bundan dolayı, ters Fourier dönüşümü;

$$X(t) = \frac{1}{f_s} * \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f) * e^{j2\pi f_n t_1} \quad (2.18)$$



Şekil 2.2 Ayırık zaman domeni fonksiyonu için frekans spektrumu.

2.5 Ayırık Fourier Dönüşümü (Discreate Fourier Transformu)

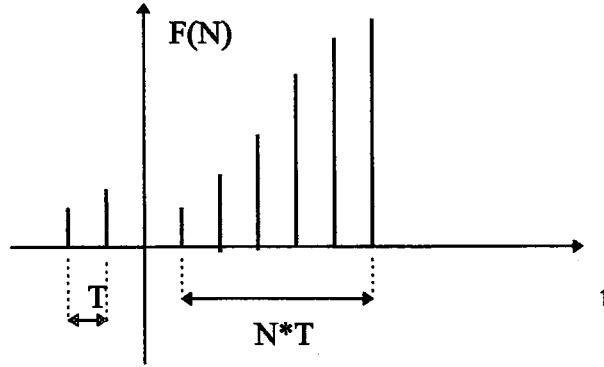
Eğer $f(t)$ sürekli bir işaret ise sürekli bir ayırık işaret oluşturmak için t zaman aralığında $f(t)$ örneklenerek n adet örnek alınmış ise;

Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT=Discreate Fourier Transformu)

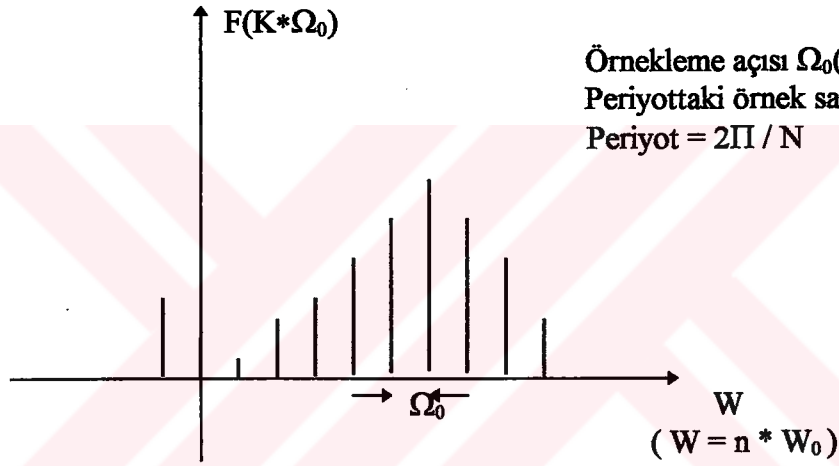
$$F(K*\Omega_0) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n*T) * e^{-j*k*n*\Omega_0*T} \quad (2.18)$$

Ters Ayırık Fourier Dönüşümü (İ.D.F.T = İnvers Discreate Fourier Transform)

$$F(n*T) = \frac{1}{N} * \sum_{k=0}^{N-1} F(K*\Omega_0) * e^{j*k*n*\Omega_0*T} \quad (2.19)$$



Bir periyottaki örnek sayısı: N
 Örnekleme zaman aralığı: T
 Periyot uzunluğu: N*T



Örnekleme açısı $\Omega_0(\text{radyan}) = 2\pi / NT$
 Periyottaki örnek sayısı = N
 Periyot = $2\pi / N$

Eğer; $F(K) = F(K * \Omega_0)$ ve

$$W = e^{j\Omega_0 * T} = e^{j2\pi / N} \text{ olarak tanımlarsak;}$$

$$\text{Ayrık Fourier Dönüşümü (D.F.T)} = F_K = \sum_{n=0}^{N-1} f_n * W^{n*K} \quad (2.20)$$

$$\text{Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (İ.D.F.T)} = f_n = \frac{1}{N} * \sum_{K=1}^{n-1} F_K * W^{-n*K} \quad (2.21)$$

olur ve bu son iki eşitliği matrisel formda yazarsak, aşağıdaki matrisel form elde edilir.

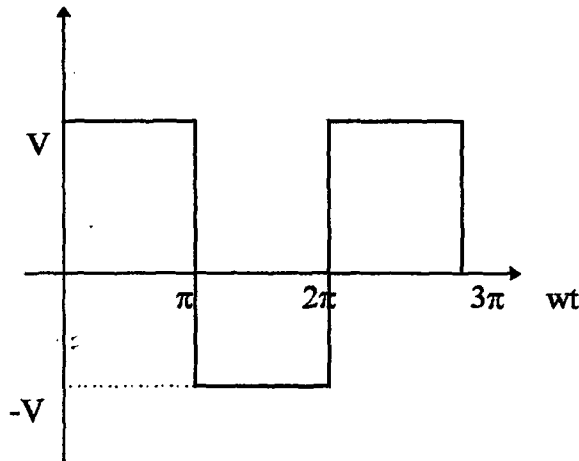
$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \cdot & \cdot & \cdot & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 & \cdot & \cdot & \cdot \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 & \cdot & \cdot & \cdot \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ W^0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ; gerçekte Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) ile aynıdır. Sadece hesaplama yöntemi farklıdır ve daha hızlı bir yöntemdir.

2.6 En Çok Karşılaşılan Dalga Şekilleri ve Bunların Fourier Açılımları

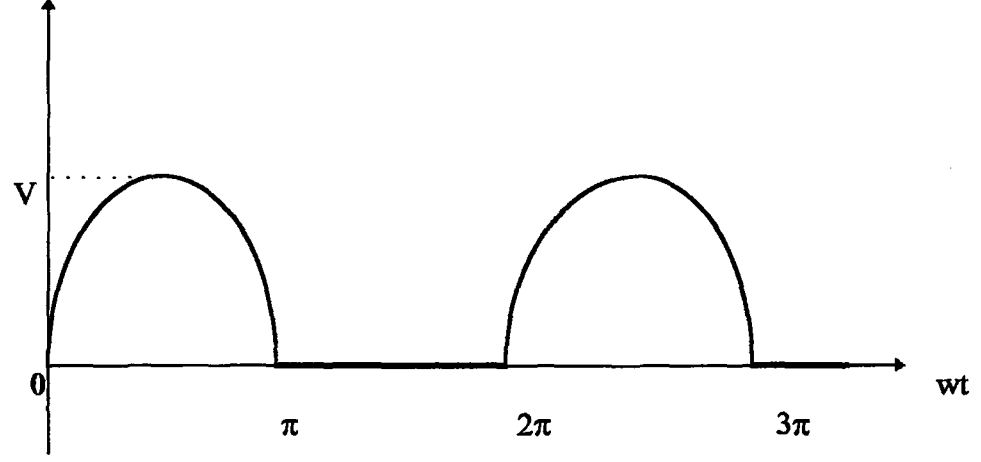
En çok karşılaşılan dalga şekilleri ve bunların fourier açılımları aşağıda gösterildiği gibidir.

2.6.1 Kare dalga



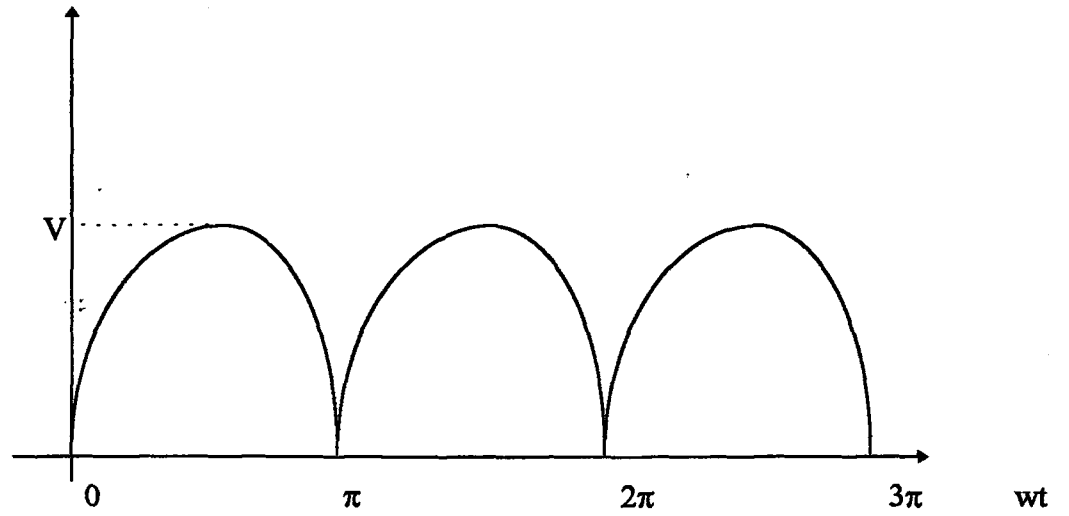
$$F(t) = \frac{4*V}{\Pi} \left\{ \sin wt + \frac{1}{3} * \sin 3wt + \frac{1}{5} * \sin 5wt + \dots \right\}$$

2.6.2 Yarıml dalga doğrultulmuş sinüs



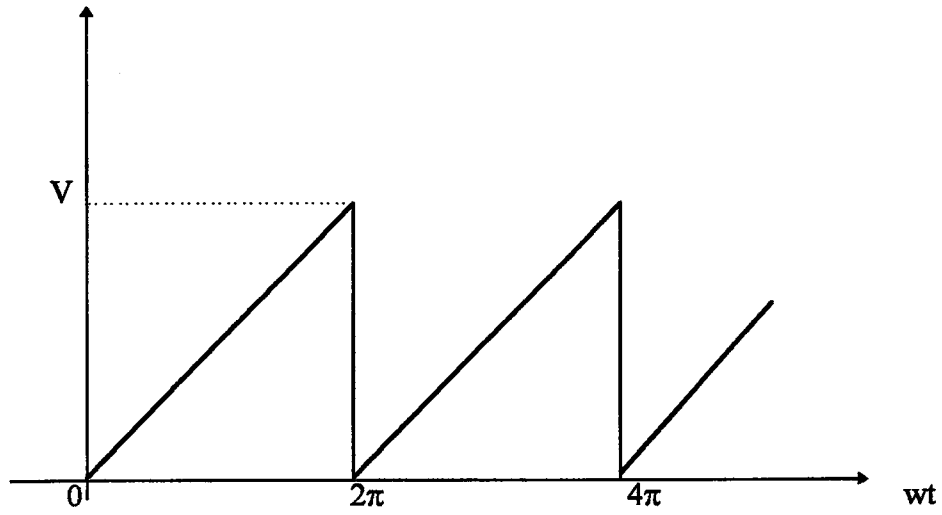
$$F(t) = \frac{V}{\Pi} * \left\{ 1 + \frac{\Pi}{2} * \sin wt - \frac{2}{3} * \cos 2wt - \frac{1}{15} * \cos 4wt - \frac{2}{35} * \cos 6wt - \dots \right\}$$

2.6.3 Tam dalga doğrultulmuş sinüs



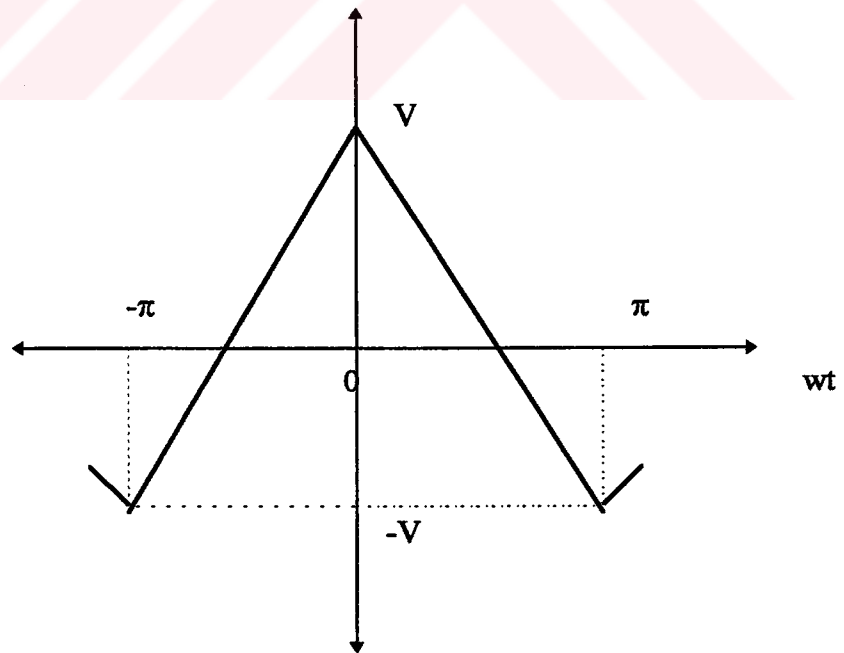
$$F(t) = \frac{2*V}{\Pi} * \left\{ 1 - \frac{2}{3} * \cos 2wt - \frac{2}{15} * \cos 4wt - \dots \right\}$$

2.6.4 Testere dişi dalga



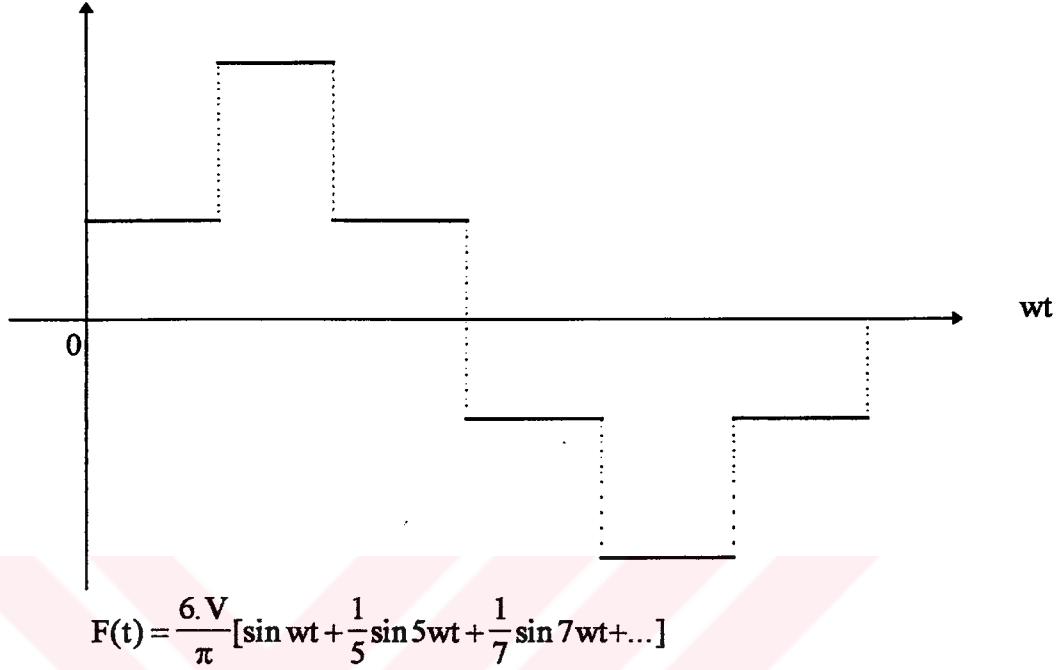
$$F(t) = \frac{V}{2} - \frac{V}{\Pi} * \left\{ \sin wt + \frac{1}{2} * \sin 2wt + \frac{1}{3} * \sin 3wt + \dots \right\}$$

2.6.5 Üçgen dalga



$$F(t) = \frac{4*V}{\Pi^2} * \left\{ 2 * \cos wt + \frac{2}{9} * \cos 3wt + \frac{2}{25} * \cos 5wt + \dots \right\}$$

2.6.6 Trapez dalga



2.7 Yazılan Örnek Bir Fourier Analiz Programı ve Örnek Çıktıları

Yukarıda verilen ve bu dalgalara benzer dalgaların Fourier analizinin kolayca yapılması için qbasic ile bir program yazılmıştır. Bu program sayesinde istediğimiz dalga şeklinin denklemini tanımlayarak, bu dalganın şeklini, Fourier katsayılarını ve Fourier analizinin sonucunu kolayca hesaplayabilmekteyiz. Bunun sonucunda, dalga şeklinin içinde kaçınıcı dereceden harmoniklerin mevcut olduğu araştırılmaktadır. Bu programa ait örnek çıktılar EK A'da verilmiştir.

Bozuk bir dalganın düzeltilmesi için, önce içinde kaçınıcı dereceden harmoniklerin bulunduğu tesbit edilmelidir. Bunu tesbit ettikten sonra ancak bu harmonikleri yok edecek filtrenin tasarımına geçebiliriz. Bu konu daha sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir.

BÖLÜM 3 HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

3.1 Giriş

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Bunların başında manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusalsızlık gelir. Manyetik devrelerde doyma, elektrik devrelerinde ark ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi, doğrusal olmayan olaylardır. Örneğin generatörler, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinaları gibi, normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler üretirler. Güç elektroniği kontrollü sistemler sinüzoidal akım dalgasını keserlerken yine harmonikler oluşurlar. Kısaca karakteristiği doğrusal olmayan tüketiciler 50 Hz frekansın tamsayı katı frekanslı akımlar üretirler. Bunlar devrelerini yakınlarında bulunan tüketiciler üzerinden kapatılırlar ve harmonik frekanslı gerilimlerin meydana gelmesine neden olurlar. Böylece başlangıçta saf sinüzoidal olan gerilim dalga şekilleri bozulur. Normal çalışma koşullarının dışında yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları, iki fazlı kısa devreler ve arklı kysadevreler de harmoniklerin meydana gelmesine neden olur [3].

Lineersizlik yüksek mertebeli, mesela karesel terimlerin meydana gelmesine sebep olur, bu da kendisini çeşitli şekillerde hissettirir:

- Karesel bir terim, bir doğru akım bileşeninin meydana gelmesine yol açar.
- Akımın ve gerilimin temel harmoniklerinin tepe değerleri birbirleri ile orantılı olmazlar.
- Her temel harmoniğin tepe değeri üzerine başka harmonikler tesir ederler.
- Tam sayılı harmonikler meydana gelirler.

Bu açıklamadan anlaşılacağı üzere, işletme araçlarının elektriksel büyüklüklerinin hesaplanması esnasında karakteristiklerin lineer olmaması ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır.

Harmonik üretimi bakımından çok değişik imkanlarla karşılaşılır. En belirgin sınır haller şunlardır:

- Harmoniksiz gerilim ile işletme: İşletme araçlarının karakteristikleri lineer değilse harmonikli akım meydana gelir. Bu akımın, iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağında üretildiği kabul olunur.
- Harmoniksiz akım ile işletme: İşletme araçlarının karakteristiğinin lineer olmaması sebebi ile harmonikli bir gerilim meydana gelir. Bu gerilimin, iç empedansı ihmal edilebilecek kadar küçük olan bir gerilim kaynağından üretildiği kabul edilir.
- Bazı hallerde akım harmonikli ise, bunun tesiri ile gerilim de harmonik kazanır. Aksi olarak, gerilim harmonikli ise, bu, akımın da harmonikli olmasını gerektirir.

Bunların en önemlisi ve pratikte en çok karşılaşılan durum, birinci hale tekabül eder; yani şebekeden tesise uygulanan faz arası gerilim sinüs şeklinde olduğu halde özellikle akım ve bu arada faz gerilimi harmonikli olurlar. Bu gibi harmonik kaynakları şunlardır:

- Generatörler,
- Transformatörler,
- Güç elektroniği sistemleri,
- Arkla çalışan işletme araçları.

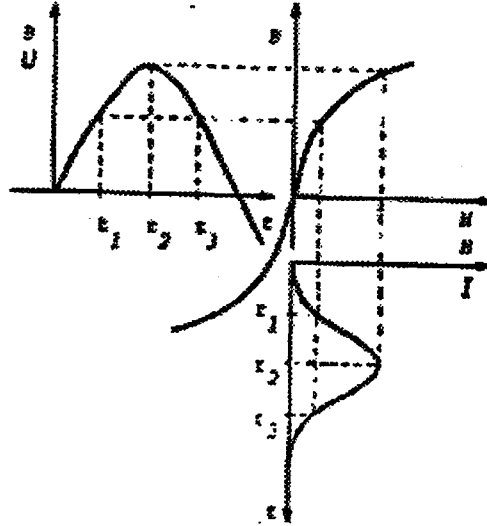
Aşağıda harmonik üreten işletme araçları ile ilgili olarak kısaca bilgi verilecektir.

3.1.1 Generatörler

En doğal harmonik üreticisi generatörlerdir. Fakat oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi konularda uygun konstrüktif önlemler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüzoidal olması sağlanır. Onun için generatörler önemli bir harmonik üreticisi sayılmazlar.

3.1.2. Transformatörler

Enerji tesislerinde en önemli harmonik üreticileri, transformatörler, bobinler ... vb gibi demir çekirdeği bulunan sargılardır. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışına dayanır. Üç fazlı transformatörler şebekeden sinüs şeklinde bir gerilim ile beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslanma akımı çekerler. Demir çekirdeğin mağnetik karakteristiği lineer olmadığından, bu mıknatıslanma akımı artık sinüzoidal değildir. Şekil 3.1'de sinüzoidal şebeke gerilimi, mıknatıslanma karakteristiği ve mıknatıslanma akımı gösterilmiştir [4].



Şekil 3.1 Sinüzoidal şebeke gerilimi ile transformatörün demir çekirdeğine ait mıknatıslanma eğrisi yardımı ile mıknatıslanma akımının elde edilmesi. $U(t)$ şebeke gerilimi (verilmiş), $B(H)$ mıknatıslanma karakteristiği, $I(t)$ mıknatıslanma akımı (istenen).

Harmoniksiz şebeke gerilimi

$$u(t) = \bar{U} \cos(\omega t + \phi_u) \quad (3.1)$$

olup sargı akısı

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int u(t) dt \quad (3.2)$$

ifadesine göre hesaplandığından, stasyonier durumda endüksiyon için

$$B(t) = \bar{B} \sin(\omega t + \phi_u) \quad (3.3)$$

ifadesi bulunur. Histerisiz ihmal edilirse, mıknatıslanma eğrisi n dereceli bir polinom ile ifade edilebilir. Bu eğri O noktasına göre simetrik olduğundan bu polinomda n derecesi, 1,3,5,... gibi tek sayılar alınır.

Buna göre H alan şiddeti ve I mıknatıslanma akımı için, $h=1,3,5,7,9,\dots$ olmak üzere

$$H(t) = \sum \bar{H}_h \sin\{h(\omega t + \phi_u)\} \quad (3.4)$$

$$I(t) = \sum \bar{I}_h \sin\{h(\omega t + \phi_u)\} \quad (3.5)$$

ifadeleri bulunur. Arızasız stasyonier durumda tek mertebeli akım harmonikleri meydana gelir.

Doyma arttıkça harmoniklerin modülleri de büyür. Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçtiğinden, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu yüzden generatörde üretilen kutup tekerleği gerilimi sinüs şeklinde olduğu halde, generatör uçlarındaki endüvi geriliminin ve şebeke geriliminin şekli bozulur.

Başlangıçta tranformatörün sinüzoidal bir gerilimle beslendiği yolunda yapılan kabul artık gerçekleşemez. Mıknatıslanma akımı ayrıca bundan da etkilenir.

Mıknatıslanma akımının harmoniklerin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden bir hayli küçüktür. Esasen transformatörlerin mıknatıslanma akımları da, nominal akımların %1 - %10'u kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı olarak arttıklarından, düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alırlar.

3.1.3. Güç elektroniği sistemleri

Enerji tesislerinde güç elektroniği gittikçe önem kazanmakta, doğrultucular ile tristörler geniş uygulama alanı bulmaktadır. Fakat bunlar da transformatörler kadar ve hatta daha çok harmonik ürettiklerinden, şebekede büyük sorunlara yol açmaktadırlar.

Doğrultucularda harmonik üretilmesi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde bir alternatif akım gerilimine bağlı olan bir doğrultucu, şebekeden I_1 temel harmonik akımı ile birlikte, yaklaşık olarak

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.6)$$

harmonik akımlarını çekerler. Doğrultucularda darbe sayısı p olmak üzere, harmonik mertebesi

$$h=np\pm1 \quad (3.7)$$

değerini alır. Burada $n=1,2,3,\dots$ gibi tamsayılar alır. Genellikle doğrultucularda darbe sayısı 6,12,24 veya 36'dır. Mesela 6 darbeleri doğrultucularda $h=5,7,11,13,\dots$ olup harmonik akımları $I_5=I_1/5$, $I_7/7$, $I_{11}/11$, $I_{13}/13$, ... gibi değerler alır. Buradan görülüyor

k_i , darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri o kadar yüksek ve harmonik değerleri o kadar küçük olur.

Pratikte ölçülen harmonik akımları yukarıda hesaplanan değerlerden daha küçüktür ve yukarıda verilen ifadenin, k gibi bir katsayı ile çarpılması ile elde edilir:

$$I_h = \frac{I_1}{h} k_h \quad (3.8)$$

k_h katsayısı birden küçüktür ve doğrultucunun kumandasına bağlı olarak, çeşitli harmoniklerde farklı değerler alır. Mesela kesişim açısı $\mu=20$, kumanda açısı $\alpha=5$ ve endüktif doğru gerilim düşümü $u=4\%$ için

$$k_5=92, k_7=83, k_{11}=62, k_{13}=50$$

gibi verilmiştir.

Doğrultucularda darbe sayısı ne kadar yüksek olursa, harmonik mertebeleri de o kadar yüksek ve harmonik akımlarının değerleri de o kadar küçük olur. Böylece bunların zararlı tesirleri de o nisbette azalır.

3.1.4. Arkla çalışan işletme araçları

Ark ocakları ve kaynak makineleri gibi normal işletmelerini ark ile sürdüren sistemler, tesislerde önemli harmonikler meydana getirirler. Ark, akım ile gerilim arasında lineer bir bağıntının bulunmadığı fiziksel bir olaydır. Ark ocaklarının ve kaynak makinelerinin şebekeden çektikleri akımların harmoniklerini, ne efektif değer bakımından ve ne de mertebe bakımından hesap yolu ile tayin etmeye imkan yoktur. Zira arkın meydana gelişi, o anda tesir eden birçok iç ve dış fiziki faktörlere bağlıdır. Ark akımında her mertebeden harmonik bulunabileceği gibi, bunların değerlerinin zamana bağlı olarak sabit kalmaları beklenemez. Harmonikler ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak da değişirler. Onun için bir işletmedeki akım

harmonikleri hakkında bilgi edinmek maksadı ile çekilen akım, osilogramla kaydedilebilir ve analizörle harmonikleri tesbit edilebilir.

Belirli bir ark ocağı tesisi için aşağıdaki harmonik değerleri verilmiştir [4].

h	<u>Genlik (%)</u>	
	<u>Ortalama</u>	<u>En Büyük</u>
2	4....6	30
3	6....10	20
4	2....6	15
5	2....10	12
6	2....3	10
7	3....6	8
9	2....9	7

BÖLÜM 4. HARMONİKLERİN ŞEBEKEYE ve ÇEVRE TÜKETİCİLERE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

4.1 Giriş

Lineer olmayan bir yüke sıfır kaynak empedanslı gerilim uygulandığında, oluşan akımın dalga şekli gerilimin dalga şeklinden farklı olacaktır. Bu bozulmuş akım; trafo, iletkenler ve devre kesiciler gibi yalnızca yolunun üzerinde bulunan elemanları etkiler. Ancak sıfır kaynak empedansı ideal bir durumdur. Gerçekte, bozulmuş akım kaynak empedansı üzerinde bir gerilim düşümü meydana getirir bu da kaynak empedansından sonraki bütün yüklere bozulmuş bir gerilim uygulanmasına neden olur.

4.2 Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Güç sistem harmoniklerinin transformatörler üzerindeki başlıca etkisi ek ısınmalardır. Bu da donanımın ömrünü kısaltmaktadır.

Harmonik gerilimler; transformatörlerde histerizesiz ve fuko akım kayıpları ile yalıtım gerilimlerini arttırmaları.

Harmonik akımların akışı; bakır kayıplarını da arttırır.

Harmonikler , sistem kapasitesi ile transformatörün endüktansının belirlediği frekansta salınma neden olabilir.

Ayrıca demir çekirdeğin titreşimlerinden ve transformatör sıcaklığının değişimlerinden kaynaklanan mekanik zorlanmalar da söz konusudur.

4.3 Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Elektrik makinalarına uygulanan sinüs biçimli olmayan gerilimler, aşırı ısınmaya, motor momentinin salınım yapmasına ve gürültüye neden olmaktadır.

Rotorun aşırı ısınması, gerilim bozulmasının yol açtığı başlıca sorundur. Elektrik makinalarındaki kayıplar uygulanan gerilimin frekans içeriğine bağlıdır. Motor sıcaklığındaki artış motorun ömrünü kısaltmaktadır. Bundan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir.

4.4 Generatör ve Şebeke Gerilimleri Üzerine Etkileri

Bilindiği gibi endüktif dirençler frekansla doğru orantılı olarak artarlar. Bu yüzden temel harmonikteki değeri X_L olan endüktif bir direnç, harmonik mertebesi n olan bir akımın karşısında

$$X_{L_n} = n \times X_L \quad (4.1)$$

değerini alır. Yani akımın frekansı büyüdükçe endüktif direnç de büyür. Her ne kadar boşta çalışan generatörlerde sinüs şeklinde bir gerilim endüklenirse de şebekede üretilen harmonikler nedeni ile, yüklenen generatörün sargılarından harmonikli akımlar geçtiğinde, bunlar stator kaçak reaktanslarında kaçak alanlar ve yüksek harmonikli gerilim düşümleri meydana getirirler. Generatörde endüklenen gerilim sinüs olmasına rağmen generatör uçlarındaki gerilimin ve şebeke geriliminin şekli bozulur.

4.5 Gerilim Düşümünün Artması ve Fliker Olayı

Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50Hz 'in n katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında generatör, tranformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de n ile orantılı olarak artmaktadır. Bu

gerilim düşümlerinin frekansları n ile orantılı olduğundan bunların normal gerilim ile birleşmesi sonucunda gerilim şekli bozulmaktadır.

Örneğin ark ocakları gibi, olayların hızlı değiştiği yerlerde, harmonik akımlarının yol açtıkları gerilim düşümleri de zamana bağlı olarak hızlı değiştiğinden, şebeke geriliminde 2-15Hz mertebesinde titreşimler baş gösterir; buna fliker olayı denir. Bu olay yakında bulunan tesislerdeki cihazlara ve aydınlatma tüketicilerine olumsuz olarak etki yapar. Özellikle akkor telli lambalarda ışığın titreşimine yol açar; bu da göz sağlığı için zararlı olmaktadır [5,6].

4.6 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Kapasitif dirençler, frekansla ters orantılı olarak azalırlar. Bu yüzden temel harmonikteki değeri X_C olan kapasitif direnç, harmonik mertebesi n olan bir akımda

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (4.2)$$

değerini alır, yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif direnç küçülmektedir. Bunun sonucu olarak büyük harmonik frekanslarında kondansatörler daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler. n . harmoniğin U_n harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = \omega_n * C * U_n = n * \omega * C * U_n \quad (4.3)$$

ve gücü

$$Q_n = n * \omega * C * U_n^2 = I_n^2 / (n * \omega * C) \quad (4.4)$$

değerini alır burada $\omega = \omega_1$ temel harmoniğin dairesel frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin efektif değeri,

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (4.5)$$

dir. Kondansatör akımının efektif değeri de, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir.

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

Bu akım harmonikli gerilimin efektif değerine eşit sinüzoidal bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Onun için kondansatör tesislerinde besleme iletkeninin kesitinin, sigortaların ve anahtarların seçiminde, harmonikli akımın sinüzoidal nominal akımdan daha büyük olduğu daima göz önünde bulundurulmalıdır.

Harmonikli U_C ve I_C efektif değerleri uygun ölçü cihazları ile ölçülebildikleri halde kondansatörün Q_C gücü, akım ile gerilimin efektif değerlerinin çarpımı ile hesaplanamaz ve ayrıca normal wattmetre ile ölçülemez. Kondansatör gücü , gerekirse ancak;

$$Q_C = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = w \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^2 U_n^2 = \frac{1}{w \cdot C} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{I_n^2}{n} \right] \quad (4.7)$$

ifadesine göre hesaplanabilir.

Gerilimdeki harmonikler dolayısıyla kondansatörün gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel harmoniğe ait güç önem taşır; buna karşın kondansatörün dielektrik kayıpları, yani termik zorlanması bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir. Eğer temel harmonikten başka n_b gibi belirli bir harmonik varsa, toplam kondansatör gücünün nominal kondansatör gücüne oranı, yaklaşık olarak;

$$\frac{Q_c}{Q_{cn}} = \frac{n_b}{n_b + 1} * \frac{U_c}{U_{cn}^2} + \frac{1}{n_b + 1} * \frac{I_c}{I_{cn}^2} \quad (4.8)$$

ifadesine göre hesaplanır.

Mesela kondansatöre uygulanan gerilim, %20 oranında 5. Harmonik ihtiva ederse, yani $U_5=0.2*U_1$ ise, kondansatörün çektiği 5. Harmonik akımı;

$$I_5 = 5 * w * C * 0.2 * U_1 = w * C * U_1 \quad (4.9)$$

olur. Temel harmonik akımı ise $I_1 = I_n$ olduğu kabul olunarak

$$I_1 = W * C * U_1 \quad (4.10)$$

olduğuna göre;

$$I_1 = I_5 \quad (4.11)$$

dir. Buna göre kondansatörün çektiği toplam akım;

$$I_c = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = \sqrt{2} * I_1 = 1.41 * I_1 \quad (4.12)$$

değerini alır. Bu akım ise, temel harmonik akımından ise %41 oranında daha büyüktür.

TS 804'e göre kondansatörün en fazla $1.3*I_n$ değerinde aşırı yüklenmesine müsaade edildiğinden, bu verilen örnekte bir kondansatörün dielektrik muamelesi, müsaade edilen değere göre %10 kadar daha fazla zorlandığı gibi, diğer taraftan kondansatörü besleyen iletkenler ve diğer tesis elemanları aşırı yüklenmiş olmaktadır.

%20 oranında 5. harmoniği olan gerilimin efektif değerinin

$$U_c = U_1 * \sqrt{1 + 0.2^2} = 1.02 * U_1 \quad (4.13)$$

olduğu göz önüne alınırsa, denklem (4.8) ' e göre kondansatörün gücü, nominal değerin yaklaşık,

$$Q_c / Q_{Cn} = 1.2 \quad (4.14)$$

katı olmaktadır.

TS 804'e göre kondansatörler, sinüs şeklinde gerilim altında ve nominal frekansla sürekli olarak nominal efektif akım değerinin 1.3 katı ile yüklenebilirler. Aynı şekilde gerilim için de $1.1 * U_n$ gibi bir sınır değer konmuştur. Şu halde sinüzoidal olmayan bir gerilim altında, yukarıda söz konusu olan akım ve gerilim şartları ile kondansatörün sürekli olarak $1.35 * Q_n$ ile çalıştırılmasına müsaade edilmektedir.

4.7 İletim Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri

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

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 * R_n \quad (4.15)$$

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

Harmonik akım akışının ikinci etkisi, farklı devre empedansları geçişlerinde harmonik gerilim düşümlerinin yaratılmasıdır. Kablo ile iletim durumunda, harmonik gerilimler, kendi tepe gerilimlerine oranla dielektrik gerilimleri arttırırlar. Bu etki, kablunun

yararlı ömrünü kısalttığı gibi, arıza sayısındaki artışlara da neden olmakta ve bu yüzden onarım maliyetleri artmaktadır.

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

4.8 İletkenler Üzerindeki Etkileri

Harmonik akımların iletkenlerde ısınmaya neden olduğu iki mekanizma söz konusudur. Birincisinde, literatürde “Skin Effect” ve “Proximity Effect” olarak adlandırılan etkiler, akımın iletken içinde yeniden dağılımına neden olur. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında, iletkeninin etkin direnci büyür. “Skin Effect” budur ve frekansla birlikte artar. “Proximity Effect” ise iletkenin içindeki akım dağılımının, komşu iletkenlerde akan akımın yarattığı manyetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. İkinci mekanizma ise, tek fazlı yükleri besleyen üç fazlı-dört telli sistemlerin nötr iletkenlerinde anormal ölçülerde büyük akımlara sebep olmaktadır. Bazı güç kaynakları önemli oranda üçüncü harmonik üretmektedir. Temel frekanstaki dengeli üç fazlı akımlar nötr iletkende akım yaratmazlar, ancak üç fazlı sistemlerde üçüncü harmonikler nötr iletkende birbirlerini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirmektedir. Hatta, nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilmektedir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı boyutlarda olduğundan bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna, en çok üç fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkenini, faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

4.9 İzolasyon Delinmesi

Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklindeki sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, örneğin gerilim rezonansı gibi hallerde makina ve transformatör sargılarının izolasyonu ve

kondansatörlerin dielektrik maddesi için büyük bir tehlike oluşturmakta ve bazen izolasyonun delinmesine yol açabilmektedirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş izolatörleri için bu gibi aşırı gerilimler hemen hemen hiçbir tehlike yaratmazlar.

4.10 Koruyucu Röleler Üzerindeki Etkiler

Dalga şeklinin bozulması koruyucu rölelerin performansını etkilemektedir. Her röle harmoniklerin varlığı karşısında farklı davranmaktadır. Aynı tip rölenin farklı modelleri aynı bozulmaya farklı davrandığı gibi aynı tip ve modeldeki röleler bile değişik cevaplar verebilmektedir. Harmonikler, rölelerin, arıza koşullarında çalışmamasına ve sistemin olağan çalışma koşullarında gereksiz yere açmasına neden olabilmektedirler. Bir rölenin performansını onu test etmeden tahmin etmek güçtür.

4.11 Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkiler

Akımdaki harmonik bozulma, devre kesicilerin akımı kesme yeteneğini etkilemektedir. Bozulma, akımın sıfır geçişinde, temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına (daha yüksek bir di/dt oranına) yol açabilmekte, bu da sonuç olarak kesmeyi zorlaştırmaktadır.

Devre kesicilerinin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin harmoniklerin varlığında doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bobin, arkın söndürüldüğü yer olan ark hücrelerine, süren magnetik alanı yaratmak için kullanıldığından, bunun çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Literatürde bu olaya “ Reigniton “ olayı denmektedir.

Harmonik akımlar ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesine ve akımı zamansız kesmelerine yol açmaktadır.

4.12 Aydınlatma Donanımı Üzerindeki Etkileri

Akkor telli lambalardan daha lineer bir yük olamaz. $\cos\phi = 1$ olan basit bir dirençtir ve hiçbir şekilde şebekeyi karıştırıcı harmonik bileşenler üretmez. Akkor lambaların ömrü, bozulmuş gerilimde çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum lamba içindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimde kullanıldıklarında akkor lambaların ömrünün %47 oranında azaldığı görülmüştür.

Harmonik kaynaklı gerilim bozulmasının floresant lambalar üzerinde ise iştilir bir gürültüye yol açmak dışında bilinen bir etkisi yoktur.

4.13 Ölçme Aletlerine Olan Etkileri

Modern efektif değer (rms) ölçen voltmetreler ve amperetreler dalga şeklindeki bozulmalara karşı görece bağıstıktır. Bu aletlerde, giriş gerilimi veya akımı elektronik bir devre yardımı ile işlenir. Test sonuçları göstermektedir ki, modern voltmetre ve amperetrelerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hataları %0.2'den daha az olmaktadır.

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan volmetre ve amperetreler, harmoniklerin varlığında hatalı sonuçlar verir. Örneğin 45 derecelik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini, böyle bir alet %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer bu alet bir amperetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesine neden olacaktır.

Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler mükemmel bir performans göstermektedir. Test sonuçlarından, bu aletlerde, sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hataların % 0.1'den az olduğu anlaşılmaktadır.

Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçerleridir. Bu aletler, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlardan ötürü hatalar üretir.

Akım ve gerilimin her ikisinin de değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlarda %20' lere kadar varan hatalar meydana gelmiştir.

Sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektrik sayaçlarının kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü, hatalı ölçümler yapmak dışında 400-1000 Hz aralığındaki mekanik rezonanstan kaynaklanan arızalar da olasıdır.

4.14 Harmoniklerin Sebep Olduğu Kayıplar

Akım harmoniklerinin sebep olduğu termik zorlanmaları belirlemek için kayıpların değişiminin incelenmesi gerekir. Bakır kayıpları, demir kayıpları ve dielektrik kayıpları olarak değişen kayıpların teçhizat ve şebeke üzerinde sebep olduğu termik zorlanma bu kayıpların biri veya birden fazlası ile belirlenir. Burada her bir kayıp bileşeni üzerinde harmoniklerin etkisi genel olarak verilecektir.

4.14.1. Bakır kayıpları:

Bakır kayıpları aşağıdaki genel formülle hesaplanabilir.

$$P_{cu} = \frac{1}{2} \sum_{h=1} R_h I_h^2 \quad \text{burada;}$$

I_h : h sıralı harmonik akımın maksimum genliği

R_h : h sıralı harmonikte direncin değeri,

Direncin frekanstan bağımsız olarak sabit kabul edildiği taktirde bakır kayıpları;

$$P_{cu} = \frac{1}{2} \sum_{h=1} R_h I_h^2 = \frac{1}{2} R I_1^2 [1 + (HDI)^2]$$

Bu ifadeden; harmonik varsa, bakır kayıplarının akım distorsyon faktörü ile belirlenen değere yükseldiği, ayrıca frekansla artan direnç değeri ile büyüdüğü görülmektedir.

4.14.2. Demir kayıpları:

Demir kayıpları, histerizis ve girdap akım (Eddy current) kayıpları olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

1. Histerizis kayıpları (P_h):

Verilen manyetik çekirdek için alternatif akımın frekansı ve kullanılan materyale bağlıdır.

$$P_h = a_h \cdot f \cdot B_m^v$$

Burada;

a_h = Çekirdek boyutlarına bağlı bir sabite

f = Elektrik akımının frekansı

B_m = Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri

v = Çekirdek materyaline bağlı üstel bir sabite (kullanılan çekirdek malzeme leri için $v=1.5 - 2.5$ alınır).

2. Girdap akımı kayıpları (P_e):

Verilen manyetik bir devre için, çekirdek materyaline manyetik akı yoğunluğuna ve elektrik akımının frekansına bağlı olarak girdap akım kayıpları aşağıda verilen ifade ile hesaplanır.

$$P_e = a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

Burada;

a_e = Materyal ve trafo sacı kalınlığına bağlı bir sabit

f = Elektrik akımının frekansı

B_m = Mağnetik akı yoğunluğunun maksimum değeridir.

Buradan toplam demir kaybı için;

$$P_{fe} = a_h \cdot f \cdot B_m^V + a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

ifadesi bulunur. Bu ifadeden görüleceği gibi demir kayıpları, mağnetik akı yoğunluğunun maksimum değeri ile frekansın lineer olmayan bir fonksiyonudur.

4.14.3 Harmoniklerin dielektrik kayıpları:

Verilen h sıralı bir harmonik için kayıp ifadesi

$$P_d = \frac{1}{2} (\tan \delta)_h V_h h \omega C$$

şeklindedir. Burada;

ω : Kaynağa ait temel bileşenlerin açısal frekansı

V_h : h sıralı harmonik gerilimin tepe değeri

C : Techizat kapasitansı

$\tan \delta$: h sıralı harmonikte dielektrik kayıp faktörü

Bu ifade, kablo ve kapasitörlerde dielektrik kayıplarının bir faktör olarak dikkate alınmasının gerektiğini göstermektedir.

4.15 Elektrik Tesislerinde Rezonans Olayları ve Bunlara Karşı Tedbirler

4.15.1 Elektrik tesislerinde rezonans

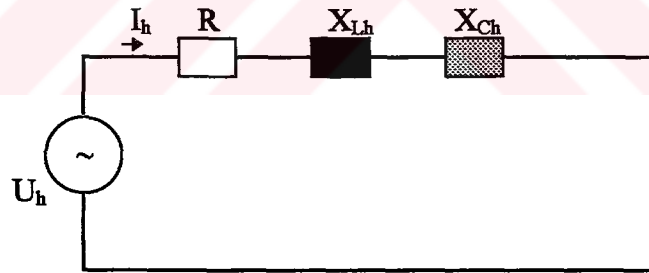
Kompanzasyon maksadı ile kondansatörlerin bağlandığı ve/veya yüksek gerilim kablolarının mevcut olduğu tesislerde, sabit şebeke frekanslı titreşim devrelerine karşılık, harmonikli titreşim devrelerinde L ve C sabit kaldığı halde gerilimin ihtiva ettiği harmonik frekansları etkili olurlar. Bazı hallerde bazı motorların devreye

sokulup çıkarılması sonucunda L değiştirildiğinde veya değişen L ye göre kompanzasyonu gerçekleştirmek için C değiştirildiğinde başka frekanslarda rezonans ihtimalleri doğar.

Yukarıda açıklandığı gibi, bu durumda şebeke frekansı w_s artık sabit olmayıp $w=2\pi f=314$ 1/s değerindeki normal şebeke frekansının h katına eşit harmonikler ihtiva eder [5].

4.15.2 Seri Rezonans:

Seri titreşim devresine U_h gibi belirgin harmonikler olan bir gerilim uygulandığında devreden I_h gibi aynı harmonikler bulunan bir akım geçer. Şebekenin lineer olmasından yararlanarak kolaylık olması için ayrı ayrı incelenir ve sonuç süperpozisyon yolu ile genelleştirilir. Şekil 4.1 de h . harmonik için bir seri titreşim devresi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 h . harmonik için seri titreşim devresi

h .	h . harmonik frekansında
U_h	Şebeke gerilim
I_h	Hat akımı
X_{Lh}	Endüktif direnç
X_{Ch}	Kapasitif direnç
R	Ohmik direnç

Belirli bir h harmoniğinde devrenin empedansı

$$Z = R + jw_h L + \frac{1}{jw_h C} = R + [hw_h L - \frac{1}{w_h C}]$$

$$= R + jhX_{C1} \left[\frac{X_{L1}}{X_{C1}} - \frac{1}{h^2} \right] \quad (4.16)$$

olup mutlak değeri

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + \left(h\omega L - \frac{1}{h\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_{Lh} - X_{Ch})^2} \\ &= \sqrt{R^2 + h^2 \left[X_{L1} - \frac{X_{C1}}{h^2} \right]^2} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Eğer devrenin bir sabit gerilim kaynağından beslendiği kabul edilirse geçen toplam akım

$$I_h = \frac{U_h}{R + j \left[h\omega L - \frac{1}{h\omega C} \right]} = \frac{U_h}{R + j(X_{Lh} - X_{Ch})} \quad (4.18)$$

veya

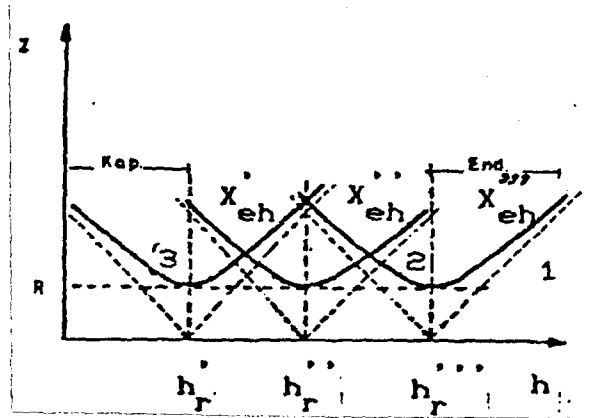
$$I_h = \frac{U_h}{\sqrt{R^2 + (X_{Lh} - X_{Ch})^2}} \quad (4.19)$$

dir. Seri bağlı endüktif ve kapasitif dirençlerinin eşdeğer reaktansı

$$\begin{aligned} jX_{eh} &= j \left[h\omega L - \frac{1}{h\omega C} \right] = j(X_{Lh} - X_{Ch}) \\ &= jhX_{C1} \left[\frac{X_{L1}}{X_{C1}} - \frac{1}{h^2} \right] \end{aligned} \quad (4.20)$$

dir.

w sabit normal şebeke frekansına eşit olduğundan, değişik h harmonik mertebelerinde veya değişen hw frekansına göre X_e reaktansı ile Z empedansı da değişir. Şekil 4.2 de devre empedansının frekansa göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Seri titreşim devresinin empedansının ve devreye uygulanan gerilimin frekansa bağlı olarak değişimi 1,2,3 eğrileri farklı X_{eh} ler için geçerlidir.

h. harmonikte endüktif direncin kapasitif dirence göre büyük veya küçük olmasına göre şebeke endüktif veya kapasitif olur.

Kayıpsız ideal bir titreşim devresinde $R=0$ alınır ve empedans

$$Z = jX_{eh} = jhX_{c1} \left[\frac{X_{L1}}{X_{c1}} - \frac{1}{h^2} \right] \quad (4.21)$$

değerini alır.

Şekilde 4.1 ile gösterilen eğri C ve L nin belirli bir değeri için geçerlidir. Burada belirli bir h_r w değerinde

$$X_{er} = h_r wL - \frac{1}{h_r wC} = 0 \quad (4.22)$$

olursa rezonans şartı gerçekleşir. Seri titreşim devresinin rezonans frekansı

$$h_r w = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.23)$$

dır. Rezonans halinde empedans

$$Z_r=R \quad (4.24)$$

değerini alır. X_L ve X_C nin değişik değerlerinde başka harmonik frekanslarında da rezonanslar meydana gelebilir. Bu gibi haller için şekil 4.2 de mesela 1,2,3 gibi empedans eğrileri elde edilir.

Devrenin sabit akım kaynağından beslendiği kabul edilirse, harmonik gerilimleri frekansa bağlı olarak, şekil 4.2 de gösterilen empedanslar gibi değişirler:

$$U_h=I_{hr}.Z_h \quad (4.25)$$

Rezonanslar halinde ise harmonik gerilimleri

$$U_{hr}=I_{hr}.R \quad (4.26)$$

gibi en düşük değerlerini alır.

İdeal durumda, yani kayıpsız titreşim devresinde $R=0$ olduğundan bir nevi kısa devre başgösterir ve sonsuz büyük bir akım geçer. Bu durumda endüktif ve kapasitif dirençler üzerinde çok büyük gerilimler meydana gelirler. Ancak bunların değerleri eşit fakat yönleri ters olduğundan birbirlerini görürler ve devrenin gerilimi sıfır olur. Bu yüzden buna gerilim rezonansı denir. Devreden geçen akımın ve gerilimin frekansa göre değişimi şekil 4.3 de işaret edilmiştir. Burada da 1,2,3 vb. eğrileri, parametrik olarak değişen L ve C veya bunların toplam eşdeğeri olan X_c değerlerine aittir.

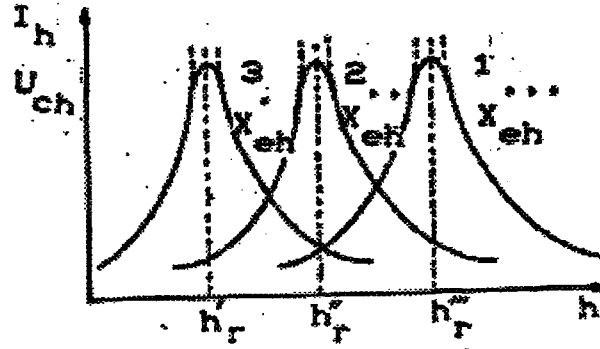
Genellikle devreye uygulanan gerilimin belirli bir h harmoniğine ait değeri, nominal sinüzoidal şebeke geriliminin a_h katına eşit olduğu kabul olunur. Buna göre

$$U_h = a_h \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.27)$$

ve

$$I_h = a_h \frac{U_n}{\sqrt{3} Z} \quad (4.28)$$

bulunur. a_h için belirli değerler verilirse, U_h ve I_h kolayca hesaplanır.



Şekil 4.3 Seri titreşim devresinde akımın frekansa göre değişimi. 1,2,3 eğrileri farklı X_{eh} ler için geçerlidir.

Seri titreşim devresinde devreden geçen akım, aynı zamanda kondansatör akımına eşit olduğundan

$$I_h = I_{ch} \quad (4.29)$$

alınır. Termik zorlama bakımından kondansatörden geçen akım önemli olduğundan, harmonikli U_n gerilimi altında kondansatörden geçen toplam $I = I_C$ akımının hesaplanması istenir. Çeşitli harmonik gerilimlerine göre devreden geçen akımlar I_{C1} , I_{C5} , I_{C7} , I_{C11} , I_{C13} , ... ise kondansatörden geçen akım

$$I_C = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{C5}^2 + I_{C7}^2 + I_{C11}^2 + I_{C13}^2 + \dots} \quad (4.30)$$

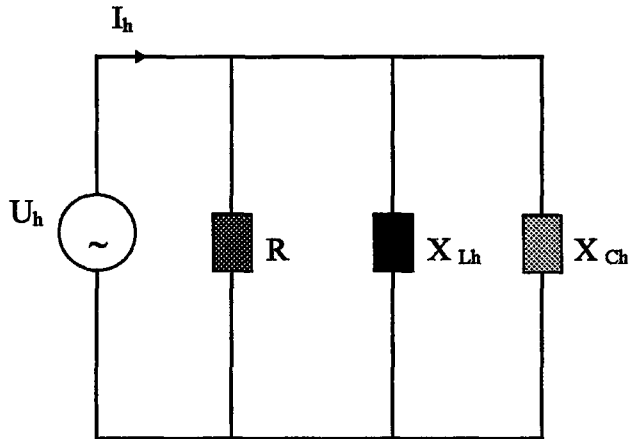
dir.

Bundan başka seri titreşim devresi elemanları belirli harmonik frekansı değeri için uygun değerlere göre boyutlandırıldığı takdirde bu harmonik için bir filtre elde edilir.

Seri titreşim devrelerinde rezonansı önlemek için sabit kompanzasyon kondansatörü tercih edilmelidir. Rezonansın meydana gelmesi halinde devre sabitlerinden biri ve daha kolay olduğu için tercihen C değiştirilir. Pratikte enerji tesislerinde seri rezonans olayına oldukça az rastlanır. Bir transformatör tarafından beslenen uzun bir kablo hattı boşa çalışırken veya bir transformatörün sekonder tarafına bağlı kompanzasyon kondansatörleri boşa çalışırken şebeke ve transformatör reaktansı ile kapasitif dirençten oluşan seri titreşim devresi meydana gelir. Bu durumda şebeke oldukça büyük bir kapasitif paya sahip olur. Eğer bu esnada şebeke bir harmonik kaynağı tarafından beslenirse, herhangi bir harmonik frekansında rezonans şartı gerçekleşebilir.

4.15.3 Paralel rezonans:

Paralel titreşim devresi, bir harmonik kaynağından beslenirse, L ve C sabit olduğu takdirde, devreden çeşitli harmonikleri ihtiva eden I_h gibi bir akım geçer. Şebekenin lineer olmasından yararlanarak, kolaylık olması için böyle bir devre, belirli bir h harmoniği için ayrı ayrı incelenebilir. Şekil 4.4 de h. harmonik için bir paralel titreşim devresi gösterilmiştir.



Şekil 4.4 h. harmonik için paralel titreşim devresi

Devrenin empedansı

$$Z_h = \frac{1}{\frac{1}{R} + j[\omega_h C - \frac{1}{\omega_h L}]} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \frac{h}{X_{C1}} [1 - \frac{1}{h^2} \frac{X_{C1}}{X_{L1}}]} \quad (4.31)$$

ve bunun mutlak değeri

$$Z_h = \frac{1}{\sqrt{[\frac{1}{R}]^2 + [\omega_h C - \frac{1}{\omega_h L}]^2}} = \frac{1}{\sqrt{[\frac{1}{R}]^2 + [X_{Ch} - \frac{1}{X_{Lh}}]^2}} \quad (4.32)$$

dir.

Bu devrede en önemli büyüklük kondansatör üzerinden geçen akımdır; zira harmonik frekansı büyüdükçe kondansatör üzerinden geçen akım büyür ve bu yüzden kondansatör aşırı yüklenir. Kondansatörün I_{C1} temel frekanstaki akım

$$I_{C1} = \frac{Q_{C1}}{\sqrt{3}U_n} \quad (4.33)$$

denklemine göre ve I_{Ch} harmonik akımı,

$$I_{Ch} = \frac{U_{Ch}}{-jX_{Ch}} = j \frac{U_{Ch}}{\frac{X_{C1}}{h}} = I_h \frac{1}{1 - \frac{1}{h^2} \frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (4.34)$$

ifadesine göre hesaplanır. Kondansatör üzerinden geçen toplam akım için ise, mesela kondansatöre uygulanan gerilim, temel harmoniğin %20 si oranının da 5. harmonik ihtiva ederse, yani $U_5=0,2U_1$ ise, kondansatörün çektiği 5. Harmonik akımı

$$I_5=5\omega_1.C.0,2.U_1=\omega_1.C.U_1 \quad (4.35)$$

olur. Temel harmonik akımı ise

$$I_1 = \omega_1 C U_1 \quad (4.36)$$

olduğundan,

$$I_5 = I_1 \quad (4.37)$$

olduğu görülür. Buna göre kondansatörün çektiği akım

$$I_C = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = \sqrt{2} I_1 = 1,41 I_1 \quad (4.38)$$

değerini alır. Bu değer, kondansatörün temel harmonik altında çektiği akımdan %41 oranında daha büyüktür. Böylece bir taraftan kondansatörün dielektrikumu müsaade edilen değere göre %10-%15 kadar daha fazla zorlandığı gibi diğer taraftan kondansatörü besleyen iletkenler de aşırı yüklenmiş olur.

Şekil 4.5'e göre paralel X_C ve X_L dirençlerinin eşdeğeri,

$$X_{eh} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{Lh}} - \frac{1}{jX_{Ch}}} = \frac{1}{\frac{1}{jhX_{L1}} - \frac{h}{jX_{C1}}} = -j \frac{1}{\frac{h}{X_{C1}} [1 - \frac{1}{h^2} \frac{X_{C1}}{X_{L1}}]} \quad (4.39)$$

dir.

h harmonik mertebesine bağlı olarak kapasitif direnç değerinin, endüktif dirence karşı büyük veya küçük olmasına göre devrenin eşdeğer reaktansı kapasitif ya da endüktif karakterde olur. Eğer belirli bir h , harmonik değerinde

$$1 - h^2 \omega^2 LC = 0 \quad (4.40)$$

veya

$$X_{Lhr} = X_{Chr} \quad (4.41)$$

ise $X_{Chr} \rightarrow \infty$ olur ve devrede sadece $Z=R$ direnci kalır. Bu durumda rezonans baş gösterir ve

$$w_{hr} = w \cdot h_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = w \cdot \sqrt{X_C / X_L} \quad (4.42)$$

bulunur. Buradaki $1/\sqrt{LC}$ değeri, şu halde titreşim devresinin rezonans frekansdır ve rezonansın baş gösterdiği harmonik değeri

$$h_r = \frac{1}{w\sqrt{LC}} \quad (4.43)$$

dir. Bu durumda empedans

$$Z_r = R \quad (4.44)$$

değerini alır.

R direnç değerinin çok büyük olması halinde $R \rightarrow \infty$ alınarak ideal bir kayıpsız titreşim devresi elde edilir. Böyle bir devrede rezonans halinde $I_m = 0$ olur. Harmonik üreticide U_{hr} gerilimi mevcut olmasına rağmen, rezonans halinde titreşim devresinin direnci sonsuz olduğundan ve bu devre bir tıkaç gibi tesir ettiğinden devreden artık w_{hr} frekanslı bir akım geçmez. Bu yüzden bu paralel rezonans devresine <tıkaç devresi> adı da verilir. Akım kaynağından I_{hr} gibi bir akım geçmezse de devrenin içinde, paralel bağlı elemanlar arasında w_{hr} frekanslı bir akım dolaşır; bu yüzden bu devreye <akım rezonans devresi> adı da verilir. Paralel rezonansın uçlarında U_{hr} gibi bir gerilim bulunduğundan, kondansatörden geçen akım

$$I_{Chr} = \frac{U_{hr}}{X_{Chr}} \quad (4.45)$$

ve bobin üzerinden geçen akım

$$I_{Lhr} = \frac{U_{hr}}{X_{Lhr}} \quad (4.46)$$

olup $X_{Chr}=X_{Lhr}$ olduğundan bu akımlar da birbirine eşittir:

$$I_{Chr}=I_{Lhr} \quad (4.47)$$

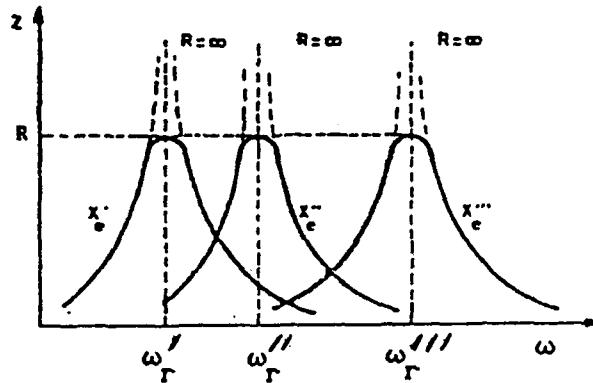
Şu halde w_{hr} frekansında bu akımlar hem değer ve hem de faz bakımından birbirini tam olarak kompanze ettiğinden bağlantı hatlarından akım geçmez. Bu olaydan temel frekansta $\cos\phi=1$ değerine kadar reaktif güç kompanzasyonu için yararlanılır ve hem teknik, hem ekonomik bakımından büyük avantaj sağlanır. Bu gibi hallerde bobin devresi mesela bir asenkron motora ve kapasite devresi kompanzasyon kondansatörlerine karşılık gelir. Yüksek harmonikli tesislerde ise hatların yüklerini hafifletmek için bu tıkaç devrelerinden yararlanılır.

Eğer paralel bağlı kondansatör ayarlı ise, kondansatörü değiştirmekle rezonans şartı bozular. Fakat bu sefer de başka bir harmonik değerinde rezonans baş gösterebilir.

Harmonik kaynağı genellikle bir akım kaynağı gibi etki yaptığından, devreyi yaklaşık sabit akımla besler. I_h harmonik akımları hesap veya ölçü yoluyla tayin edilir. Buna karşılık U_h harmonik gerilimi

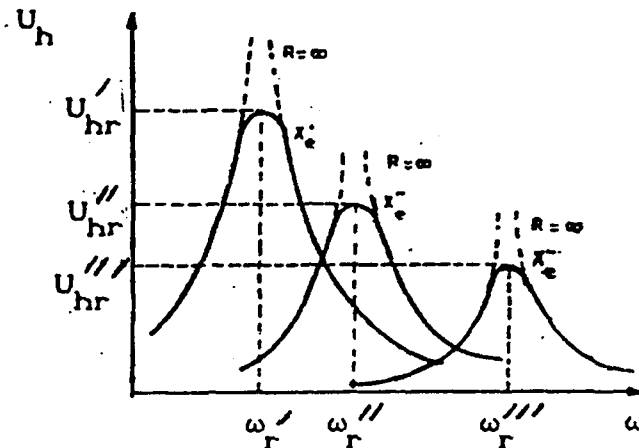
$$U_h = I_h \cdot Z_h = -jI_h \frac{1}{\frac{h}{X_{C1}} \left[1 - \frac{1}{h^2} \frac{X_{C1}}{X_{L1}} \right]} \quad (4.48)$$

ifadesine göre hesaplanır ve devrenin direncine bağlı olarak artar. Şekil 4.5 de paralel titreşim devresinin empedansının ve devrenin sabit bir akım kaynağından beslenmesi hali için, şekil 4.6 de ise harmonik gerilimlerinin frekansa göre değişimleri gösterilmiştir; burada devrenin eşdeğer reaktansının farklı değerleri, parametre olarak değiştiği işaret edilmiştir.



Şekil 4.5 Paralel titreşim devresinde toplam empedansın farklı eşdeğer reaktans değerlerine göre frekansa bağlı olarak değişimi.

Pratikte bir çok hallerde rastlandığı gibi, bir doğrultucu veya ark ocağı tesisine kompanzasyon maksadı ile bir kondansatör grubu paralel bağlandığında (doğru sistemde) yukarıda açıklanan şekilde bir paralel titreşim devresi meydana gelir. Böyle bir tesiste doğrultucuların ve ark fırınlarının sabit akım harmonik generatörü olarak tesisi beslediği kabul edilir. Doğrultucu tesisi, şebekeyi sabit akım harmonikleri ile besler. Yani harmonik generatörünün şebekeye verdiği akımlar, şebekenin empedansına bağlı değildir. Buna karşılık tesisi normal olarak besleyen normal frekans generatörleri, harmonik akımları karşısında sadece bir reaktans gibi tesir ederler. Bunun sonucu olarak, titreşim devresindeki harmonik gerilimleri, devrenin direncine bağlı olarak artarlar. Titreşim devresinde rezonans şartı gerçekleştiğinde devreden akım geçmez ve harmonik gerilimi en büyük değerini alır.



Şekil 4.6 Paralel titreşim devresinde akımın ve gerilimin, farklı eşdeğer reaktans değerlerine göre frekansa bağlı olarak değişimi.

Normal frekansta sistemi besleyen yüksek ve orta gerilimin şebekesinin reaktansı, harmonik generatörü için kompanzasyon kondansatörüne paralel bağlı reaktif dirençtir.

4.16 Harmonik Rezonanslarına Karşı Tedbirler

Harmonik rezonanslarının zararlı tesirlerine karşı tesisleri korumak için genel olarak bazı tedbirler alınır. Bunlardan birincisi, doğrultucu tesislerinde darbe sayısının yüksek seçilmesidir. Mesela 6 darbeleri doğrultucunun yerine 12 veya daha yüksek darbeleri doğrultucuların kullanılması ile harmoniklerin mertebeleri yükselir ve genlikleri düşer. Bu sayede harmoniklerin etkisi de geniş ölçüde azalmış olur. İkinci olarak, kompanzasyon tesislerinin bulundukları yerlerde üçgen sargısı bulunan transformatörler seçilir. Bu gibi transformatörler, ya üst gerilim tarafından üçgen bağlı bir sargı ile yahut da, büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi, kapalı üçgen bağlı üçüncü bir sargı ile donatılırlar. Bu sayede genliği en büyük olan 3. Harmonikler şebekeye geçemez. Başka bir tedbir de, doğrultucu tesisleri iki kısma ayrılıp bir kısmını, üç sargılı bir transformatörün yıldız bağlı sekonder sargısından ve ikincisini ise üçgen bağlı ikinci sekonder sargısından beslenmektedir. Bu sayede 5. Ve 7. Harmonikler önemli derecede azaltılırlar. Bu genel tedbirlerden başka harmonikleri önleyici özel tedbirler de aşağıda açıklanmıştır.

4.16.1 Seri rezonansı önleyici tedbirler

Evvelce de açıklandığı gibi, seri rezonans ender olarak görülür. Bununla beraber bir seri rezonans meydana geldiğinde devreden geçen büyük akımlar, anahtarların ve kontaktörlerin kontaklarında aşırı ısınmaya yol açar; böylece devreye artık kumanda etme imkanı kalmaz. Ayrıca devredeki bağlantı iletkenlerinde, özellikle kondansatör bağlamalarında aşırı ısınmalar ve kısa devreler başgösterir. Harmonik akımlarının tesiri ile kondansatör aşırı ısınır ve harap olma tehlikesi belirir.

Kondansatörün ayarlı olması halinde, frekans rezonansından başka, belirli bir frekansta değişen kapasiteye göre de rezonans şartları gerçekleşebilir. Bu yüzden,

rezonans ihtimalini azaltmak için, kondansatörde regülatör kullanılmamalı ve tesis sabit bir kompanzasyon gücü ile çalıştırılmalıdır.

Bazı hallerde harmonik frekansları ve kondansatör sabit oldukları halde tesiste yapılan bir değişiklik, mesela bazı paralel transformatörlerin veya bazı motorların devreye girip çıkması, X_L değerinin değişmesine ve böylece yeni bir rezonans şartının oluşmasına yol açabilir. Bu gibi hallerde sadece devredeki kondansatör değeri değiştirilerek rezonans şartı bozulabilir.

Şebekeden gelen harmonik akımlarını etkisiz bir hale getirmek ve rezonansı önlemek için en uygun çare, en belirgin harmonik frekansları için filtreler tesis etmektir. Filtrelerin yapılışından ve tesir tarzından ileride bahsedilecektir.

Kondansatörlerin $1,3I_n$ değerine kadar aşırı akımla çalışmalarına müsaade edilir. Alçak gerilim tesislerinde kondansatörler aşırı akımlara karşı özel koruma düzenleri ile korunurlar. Bunlar arasında sigortalar en uygun koruma elemanlarıdır. Manyetik aşırı akım açıcıları frekansa bağlı olduklarından, ayarlanan değerin altında yanlış açmalara sebep olabilirler. Onun için otomatik anahtarlar, akım transformatörleri üzerinden bağlanan termik açıcılar ile donatılırlar.

4.16.2 Paralel rezonans önleyici tedbirler

Paralel titreşim devrelerinde, rezonans baş göstermese de harmonik üreticilerden şebekeye oldukça büyük harmonik akımları çekilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden büyük harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu da şebeke geriliminin şeklinin bozulmasına yol açar. Harmonikli gerilimin ayrıca tüketiciler üzerine bozucu etkileri olur.

Bunun dışında harmoniklerin titreşim devrelerinde rezonansa yol açtıkları da bilinmektedir. İşte hem şebekenin harmonik akımları ile beslenmesini önlemek ve hem de harmonik rezonanslarına engel olmak için kondansatörler yerine filtre devreleri paralel bağlanır. Hem şebekenin harmonik akımları ile beslenmesini önlemek ve hem

de harmonik rezonanslarına engel olmak için kondansatörler iki, üç veya dört gruba ayrılır ve bunlarla $h=5,7,12,(11+13)$ harmoniklerine uygun filtreler tasarlanır. Bu durumda I_h harmonik akımları filtreler tarafından yutulurlar. Her bir filtre devresinin kondansatör gücü, buna ait I_h harmonik akımları ile I_{C1} temel harmonik akımının karesel ortalamasının, müsaade edilen kondansatör akımının efektif değerini aşmayacak şekilde tayin edilir.

Belirli bir harmonik akımı için filtre devresi, kompanzasyon için öngörülen kondansatörlerin bir kısmı ile söz konusu harmonik frekansına göre seçilmiş uygun bir self bobinin seri bağlanması ile elde olunur. Şu halde böyle bir filtre, belirli bir frekansa göre özel olarak teşkil olunan bir seri rezonans devresidir. Filtrenin, temel frekans için reaktansı X_{b1} olmak üzere, belirli bir harmonik frekansı için, filtre devresinin eşdeğer veya toplam frekansı için, filtre devresinin eşdeğer veya toplam reaktansı

$$X_{eh} = hX_{b1} - \frac{X_{C1}}{h} = 0 \quad (4.49)$$

yani I_h akımı için kısa devre teşkil eder. Akımlar direncin en küçük olduğu yolu tercih ettiklerinden, harmonik akımları devrelerini ilgili filtreler üzerinden kapatırlar ve şebekeye zararlı tesir yapmazlar.

Filtre kondansatörlerinin değerleri %100 olarak alınırsa buna uygun rezonans bobinlerinin yüzde cinsinden değerleri şu şekilde hesaplanır:

$$X_{eh} = \frac{X_{C1}}{h^2} \quad (4.50)$$

BÖLÜM 5 HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI

5.1. GİRİŞ

Şebekede rastlanan akım ve gerilim harmonikleri tüm ülkelerde farklı değerlendirilmektedir. Güç sistemlerinde ne lineer ne de lineer olmayan yüklerin değişiminde kabul edilmiş bir referans bulunmamaktadır. Ülkelerin kabul ettikleri standartlar Tablo 5.1 de verilmiştir [2].

Harmoniklerin azlığı veya çokluğu toplam harmonik distorsiyonu (THD) ile ifade edilir.

$$THD = \frac{\text{Harmoniklerin Toplamının Efektif Değeri}}{\text{Temel Bileşenin Efektif Değeri}} \quad (5.1)$$

olarak tanımlanır. Bu tanıma göre

$$THD = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{a2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{V_{a3}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots}}{\frac{V_{a1}}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{V_{a2}^2 + V_{a3}^2 + \dots}}{V_{a1}} \quad (5.2)$$

bulunur ve toplam harmonik distorsiyonunu gerilime ve akıma göre aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$THD_V = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \quad (5.3)$$

$$THD_I = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1} \quad (5.4)$$

Tüketici yükü ve cihazları yanında iletim ve dağıtım sistemlerindeki donanımın harmoniklere karşı korunmasında gerilim bozulmalarına getirilen sınırlamalar yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gerilim bozulmasının doğal bir sonucu olarak sinüs şeklinde olmayan akımlar, kısa devre gücünün yüksek (empedansının küçük) olduğu noktalarda yüksek genlikli harmonik akımlar üretirler. Böyle durumlarda gerilim harmoniklerinin etkisiz olmasına karşın, akım harmonikleri haberleşme devrelerinde önemli problemler oluştururlar. Bu nedenlerle, elektromagnetik girişimi ve sistem donanımındaki kayıpların izin verilebilir değerler içinde tutmak için akım harmoniklerinin de sınırlandırılması gerekir.

Kaynak geriliminin sinüs formunda meydana gelen sapmalarla belirginleşen harmoniklerin kabul edilebilir sınırları Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 'de verilmiştir [2].

Harmonik akım sınırlarını veren Tablo 5.2;

-Bağlantı noktasındaki sistem kısa devre akımının (I_K) alıcıya ait toplam yük akımının temel bileşenine oranına

-Bağlantı noktası gerilim seviyesine göre, her bir sıra numaralı harmonik akımının (I_n) müşteriye ait toplam yük akımı temel bileşenine (I_L) oranı (yüzde) olarak harmonik akım limitlerini verecek şekilde düzenlenmiştir.

Gerilim harmonik sınırlarını veren Tablo 5.3;

-Bağlantı noktası gerilim seviyelerine göre, harmonik geriliminin (V_n), temel bileşen gerilimine (V_L) oranı (yüzde) olarak düzenlenmiştir.

Bu değerlendirmeler rezonans koşulu dışında geçerlidir.

Harmonikler için tanınan limitlerle, üç saniye süreli ölçümler sonucunda elde edilen ortalama değerler karşılaştırılırken ölçülen büyüklüklerin en büyük %5 değeri atılarak geri kalan %95'i değerlendirmeye alınır. Elde edilen büyüklükler Tablo 5.2 ve Tablo 5.3' de verilen gerilim ve akım harmonik değerlerini aşmamalıdır.

5.2 Harmoniklerin Sınırlandırılmasının Amacı

- Kullanıcıların uygun bir besleme gerilim dalga şekline sahip olmalarını sağlamak
- Sistemdeki mevcut elemanların toleransları ölçüsünde bozulmalarını sınırlandırmak
- Güç sisteminin diğer sistemlerin çalışması ile girişimine engel olmak



Tablo 5.2 Bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşeninin yüzdesi olarak maksimum harmonik akım limitleri

Harmonik Sırası		OG $1 \leq U_n \leq 34.5 \text{ kV}$					YG $34.5 < U_n \leq 154 \text{ kV}$				
Grup	No	I_K / I_L					I_K / I_L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K H A R M O N İ K L E R	3	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	5	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	7	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	9	4	7	10	12	15	2	3.5	5	6	7.5
	11	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	13	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	15	2	3.5	4.5	5.5	7	1	1.8	2.3	2.8	3.5
	17	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	19	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	21	1.5	2.5	4	5	6	0.8	1.25	2	2.5	3
	23	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	25	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	27	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	29	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	31	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	33	0.6	1	1.5	2	2.5	0.3	0.5	0.75	1	1.25
	n>35	0.3	0.5	0.7	1	1.4	0.15	0.25	0.35	0.5	0.7
ÇİFT HARMONİKLER kendinden sonraki tek harmoniklerin 0.25' i ile sınırlıdır.											
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2.5	4	6	7.5	10
Bu değerler üç saniye süreli ortalama değerlerdir.											

I_K : Bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı

I_L : Bağlantı noktasındaki maksimum yük akımının temel bileşeni

Tablo 5.2 (Devam) Bağlantı noktasındaki toplam yük akımı temel bileşeninin yüzdesi olarak maksimum harmonik akım limitleri

Harmonik Sırası		ÇYG $U_n > 154 \text{ Kv}$				
Grup	No	I_K / I_L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K H A R M O N İ K L E R	3	1	1.8	2.5	3	3.8
	5	1	1.8	2.5	3	3.8
	7	1	1.8	2.5	3	3.8
	9	1	1.8	2.5	3	3.8
	11	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	13	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	15	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	17	0.4	0.6	1	1.25	1.5
	19	0.4	0.6	1	1.25	1.5
	21	0.4	0.6	1	1.25	1.5
	23	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	25	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	27	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	29	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	31	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	33	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	$n \geq 35$	0.075	0.12	0.17	0.25	0.35
ÇİFT HARMONİKLER kendinden sonraki tek harmoniklerin 0.25'i ile sınırlıdır.						
Toplam Akım Distorsiyonu		1.25	2	3	3.75	5
Bu değerler üç saniyeli ortalama değerlerdir.						

I_K : Bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı

I_L : Bağlantı noktasındaki maksimum yük akımının temel bileşeni

TABLO 5.3 Kabul edilebilir gerilim harmonik sınırları

Harmonik Sırası		AG (*)	OG (*)	YG (*)	ÇYG (*)
Grup	No	$U_n < 1$	$1 \leq U_n \leq 34.5$	$34.5 \leq U_n \leq 154$	$U_n > 154$
Üçün katı olmayan tek harmonikler	5	5	5	2	1
	7	4	4	2	1
	11	3	2.5	1.5	0.8
	13	2.1	2	1.5	0.8
	17	1.2	1	0.75	0.5
	19	0.95	0.8	0.75	0.5
	23	0.64	0.5	0.5	0.3
	25	0.54	0.5	0.5	0.3
	>25	$<(0.2+12.5)/n$	$<0.2(1+25/n)$	$<0.1(1+25/n)$	$<(0.1+2.5/n)$
Üçün katı harmonikler	3	4	1.5	1.5	0.8
	9	0.8	0.8	0.75	0.5
	15	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.3	0.1
	21	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	>21	< 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.1
Çift harmonikler	2	1.5	1.25	1.0	1
	4	0.76	0.75	0.7	0.7
	6	0.51	0.35	0.3	0.2
	8	0.39	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	10	0.325	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	12	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
	>12	<0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	0.1
Toplam Distorsiyon Faktörü		7	5	3	1.5
Bu değerler üç saniye süreli ortalama değerlerdir.					

(*) Büyüklükler faz arası kilovolt değerlerdir.

BÖLÜM 6 FİLTRELER

6.1 Giriş

Filtreler ayarlandığı frekansta düşük empedans etkisi göstererek bu frekanstaki gerilim bileşenlerini geçirir, bunun dışındaki frekanslara karşı yüksek empedans etkisi göstererek tıkaç vazifesi yaparlar. Genellikle bu filtreler alçak geçiren, band geçiren ve yüksek geçiren olarak adlandırılırlar.

İlgili baradaki kondansatör, endüktans ve dirençlerin nominal gerilimde, temel ve harmonik gerilim bileşenlerinin bilinmesiyle, onların aktif-reaktif güçleri ve kayıpları hesaplanabilir.

Filtre devresinin kondansatör, endüktans ve direnç bileşenlerini oluşabilecek hasarlardan korumak için, bu elemanları değerleri mevcut sistemlerin en kötü çalışma koşullarına göre seçilmelidir. Örneğin en yüksek temel gerilim, en yüksek frekans sapması, filtre ve ac sistem arasında olabilecek rezonanstan ve diğer kaynaklardan gelebilecek harmonik akımlar gibi verilere dayanılarak filtre devresi dizayn edilmelidir.

-Kondansatörler seçilirken şu özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Kapasitörler bir sistem için gerekli olan nominal kVA'yı elde edebilmek için seri veya paralel bağlı üniteler oluştururlar. Kapasitörlerin temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- i) Kapasitenin ısı katsayısı
- ii) Birim hacimdeki reaktif güç
- iii) Güç kayıpları

iV) Güvenilirlik (Emniyet)

V) Fıatı

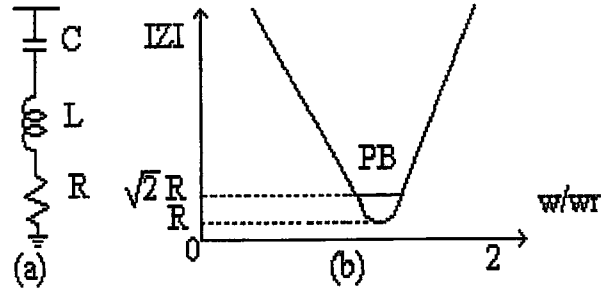
Kapasitörün kendi kendine ısınmasıyla veya çevre ısısıyla kapasitenin değişiminin sebep olduğu bozukluklardan kaçınmak için ayarlı filtrelerin kapasitansının sıcaklık katsayısının çok düşük olması istenir. Bu özellik söndüren filtreler veya güç kapasitörleri için önemli değildir.

Kapasitörler çok yüksek gerilimler altında çalışmasından ve düşük kayıplara sahip olmasından birim hacimde yüksek reaktif güç bulundurur. Bu sonuçlardan, dielektriğin ısıdan dolayı tahrip olmasını önlemek için uzun süreli çalışmalarda aşırı gerilimlerden mümkün mertebe sakınılır ve hatta dielektriğin iyonlaşarak tahrip olmasını önlemek için çok kısa çalışmalarda dahi aşırı yüksek gerilimlerden kaçınılır.

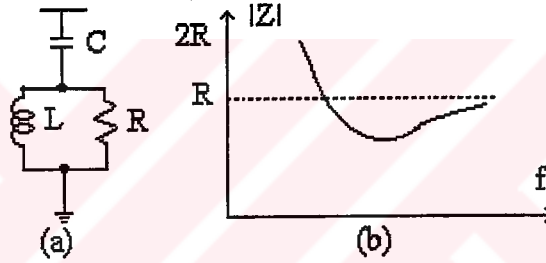
Kapasitörlerin gerekli nominal reaktif gücü, bağılı olduğu herbir frekanstaki reaktif güçlerin toplamıdır.

6.2 Pasif Filtreler

Paralel filtrelerin endüktif ve kapasitif reaktansları değiştirilerek filtre rezonzans frekansına getirilir. Filtrelerin kalite faktörü(Q) filtrenin keskinliğini belirtir. Filtreler düşük veya yüksek kalite faktörlü yapılarırlar.Yüksek Q'su olan filtreler daha düşük harmonik frekanslardan biri için (Örneğin 5. harmonik için) ve tipik değerleri 30-60 arasındadır. Düşük Q'lu olan filtreler genel olarak 0.5-5 arasında ve geniş frekans alanında düşük empedansa sahiptir. Daha yüksek dereceli harmoniklerin eliminasyonu için kullanıldığında (Örneğin 17. harmonik için) yüksek geçiren filtreler kullanılır. Yüksek ve düşük Q'lu filtrelerin tipik örnekleri şekil 6.1 ve 6.2 'de verilmiştir.



Şekil 6.1 a) Frekansı ayarlanabilen tek kollu paralel filtre devresi
b) Tek kollu paralel filtre empedansının frekansla değişimi



Şekil 6.2 a) İkinci dereceden söndüren paralel filtre devresi
b) İkinci dereceden söndüren paralel filtre devre empedansının frekansla değişimi

Frekansı ayarlanabilen bir filtrede Q , rezonansta endüktansın (veya kapasitansın) dirence oranı olarak bulunur.

$$Q = X_0 / R \quad (6.1)$$

Şekil 6.1.b 'de gösterildiği gibi band-geçiren filtre (PB) direnci, onun reaktansına eşit olduğu andaki frekanslarla sınırlandırılır. Örneğin empedans açısı 45° 'dir ve empedans modülü $\sqrt{2}R$ 'dir. Kalite faktörü band geçirme ile ilgilidir.

$$Q = w_n / PB \quad (6.2)$$

Burada w_n ayarlanan açısal frekanstır ve birimi radyan/sn'dir. Nominal ayarlı frekansta, filtre ayarının bozulmasının derecesi δ faktörü ile belirtilir. Bu faktör değişik etkileri içerir.

- (i) Temel (besleme) frekansında değişimler
- (ii) Yıpranma ve ısınmayla filtre kapasitesinde ve endüktansında değişimler
- (iii) İmalat toleransları ve sonlu ayar basamaklarının genişliği, istenilen frekansların dışında ayarlamalara sebep olabilir.

Nominal birim ayar frekansında bozulmasının tamamı

$$\delta = (w_n - w) / w_n \quad (6.3)$$

ile verilir. Bundan başka L veya C'nin % 2'lik değişimi, sistem frekansının % 1'lik değişimine sebep olur. Bundan başka δ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} * \left[\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right] \quad (6.4)$$

6.3 Filtre Tasarımı

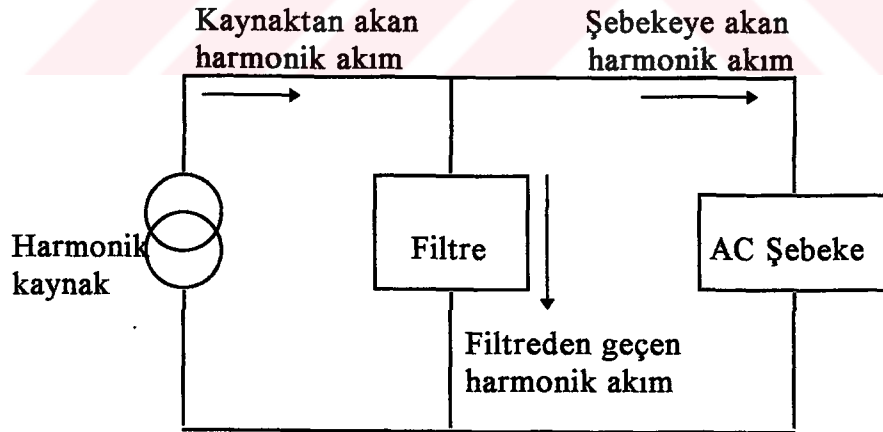
Temel frekansta filtrenin temin ettiği reaktif güç, filtrenin boyutlarını ve gücünü belirler. Aslında filtrenin büyüklüğü, kapasitör tarafından beslenen sistemin temel reaktif gücüne eşittir. Filtre kollarının toplam büyüklüğü (toplam reaktif güç olarak) harmonik üreten kaynağın toplam reaktif gücüne ve çekilen reaktif güce bağlıdır.

AC şebekelerin her yerindeki harmonik dağılımını bilmeden önce filtre tasarlamak çok güçtür. Dalga şeklindeki bozuklukları tamamen gidermek hem pahalı hem de çok zordur. Akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri terimlerinin her ikisinde de ifade edilen problemleri, diğer alıcılarla ortak kuplaj noktasında, problemi, kabul edilebilir bir seviyeye indirmek için daha

çok pratik kriterler önerilir. Filtre dizaynı için harmonik gerilimine dayandırılan kriter daha geneldir. Çünkü, şebeke empedansı değiştiğinde onu uygun gerilim sınırları arasında tutmak, akım seviyesi sınırları arasında tutmaktan daha kolaydır.

Gerekli harmonik sınırlamalarının tamamı için filtre dizaynı, aşağıdaki adımları gerektirir.

- (i) Lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akım spektrumu, ilgili frekanslarda, şekil 6.3'de görülen ve ac şebeke ve paralel filtrelerden meydana gelen devreye uygulanır ve harmonik gerilimler hesaplanır.
- (ii) i'nin sonuçları özel parametrelerin bulunması için kullanılır. Örneğin gerilim bozunumu.
- (iii) Filtre bileşenlerini oluşturan kapasitör, endüktans ve direnç üzerindeki akım ve gerilimlerden, onların kayıpları ve nominal değerleri hesaplanır.



Şekil 6.3 Gerilim harmonik bozulmalarının hesaplanması için devre

Filtre dizaynında gözönünde bulundurulması gereken bileşenler akım kaynağı, filtre admitansı ve sistem admitansı olarak üçe ayrılabilir. Akım kaynağının içindekiler yükün durumuna göre ve (statik dönüştürücü kısımlarda) tetikleme açısı durumlarına göre değiştirilmelidir. Filtre ve sistem admitansları,

maksimum gerilim bozulmasıyla sonuçlanacak, her bir frekansta minimum eşdeğer admitansın hesabı yapılır.

Açıkça filtre dizaynı uygulanan harmoniklerin spektrumunun tamamını azaltma kapasitesinde olan, tek geniş band-geçiren devredir. (Örneğin 6 darbeli dönüştürücülerde 5. harmoniğin üstündekiler için). Bundan başka hedeflenenin başarılabilmesi için gerekli kondansatör çok daha büyüktür ve genellikle tek kollu ayarlı filtrelerle daha düşük dereceli harmonikleri zayıflatma çok daha ekonomiktir.

6.3.1 Ayarlanabilen filtreler

Tek kollu ayarlanabilen bir filtre, herhangi bir harmonik frekansa ayarlı (şekil 6.1’de gösterildiği gibi) seri RLC devresidir. Devre empedansı

$$Z_1 = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (6.5)$$

ile verilir. Devre empedansı rezonans frekansında (f_n) R’ye indirgenir. R, L ve C’nin seçimi için genellikle gözönünde bulundurulması gereken iki temel parametre vardır. Bunlar kalite faktörü Q ve daha önce bahsedilen bulunan bağıl frekans sapması (δ)’dur. Filtre empedansını Q ve δ terimleriyle ifade edebilmek için aşağıdaki bağıntılar uygulanır.

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (6.6)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.7)$$

(Ayarlı açısal frekans rad/sn olarak)

$$X_0 = w_n L = \frac{1}{w_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6.8)$$

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (6.9)$$

$$C = \frac{1}{w_n X_0} = \frac{1}{w_n R Q} \quad (6.10)$$

$$L = \frac{X_0}{w_n} = \frac{R Q}{w_n} \quad (6.11)$$

(6.6), (6.10) ve (6.11) denklemleri, denklem (6.5)'de yerine konursa

$$Z_f = R \left(1 + JQ\delta \left(\frac{2+\delta}{1+\delta} \right) \right) \quad (6.12)$$

elde edilir, düşünülen δ birim olarak kıyaslandığında bağıl olarak çok küçüktür. Dolayısıyla,

$$Z_f \cong R(1 + J2\delta Q) = X_0(Q^{-1} + J2\delta) \quad (6.13)$$

ve

$$|Z_f| \cong R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2} \quad (6.14)$$

elde edilir. Genel olarak filtre dizaynında empedanstan ziyade, admitans kullanmak daha kullanışlıdır. Böylece (6.12) ifadesi

$$Y_f \cong \frac{1}{R(1 + J2\delta Q)} = G_f + JB_f \quad (6.15)$$

olur. Burada ;

$$G_f = \frac{Q}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)} \quad (6.16)$$

$$B_f = -\frac{2\delta Q^2}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)} \quad (6.17)$$

dir. Filtrede toplam harmonik gerilim ise;

$$V_{nt} = \frac{I_n}{Y_n + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n} \text{ dir} \quad (6.18)$$

olarak bulunur. Dolayısıyla, gerilim bozulmasını minimize etmek için, ac sistemle paralel filtrenin, her yerde admitansının azaltılması gereklidir.

En büyük V_{nt} 'ler için yaklaşık olarak seçilen değerler tam doğru değildir. Bu değerler frekans sapması δ ve şebeke admitansı Y_{sn} 'dir. Bundan dolayı harmonik gerilim δ ile yükselir. Tahmin edilen en büyük sapma δ_m analizde kullanılmalı ve daha sonra tekrar daha kötü gerçek sistem durumu (en düşük admitans) incelenmelidir.

Tasarımcı, belirli sınırlar arasında Q 'nun değerlerine ve filtrenin büyüklüğüne (temel frekanstaki VA oranları) karar vermelidir. Q ve δ terimleri denklem (6.18)'de yerine konursa;

$$|V_{nt}| = I_n \left[\left(G_{sn} + \frac{1}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right)^2 + \left(B_{sn} - \frac{2Q\delta}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (6.19)$$

elde edilir. AC şebeke endüktanslarının, saf endüktif olması durumunda, filtre dizaynının yapılması çok zordur.

Şebeke empedansının maksimum faz açısı 90° 'nin altında sınırlandırılır ve genellikle yüksek frekanslarda azaltılır (şebeke kablosunda olmayan yüksek dereceli harmonikler için). Daha yüksek harmonik gerilim δ 'nın ters işaretiyle, Q_{sn} kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (6.20)

$$|V_{nt}| = I_n \left(\left(|Y_{sn}| \cos \Phi_{sn} + G_f \right)^2 + \left(-|Y_{sn}| \sin \Phi_{sn} + B_f \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (6.20)$$

şeklinde yazılır. Φ_{sn} pozitif ve δ negatif yapılarak, $|Y_{sn}|$ sınırları genişletilir. Maksimum $|V_{nt}|$ 'i veren admitans

$$|Y_{sn}| = \frac{\cos \Phi_{sn} (2Q\delta \tan \Phi_{sn} - 1)}{R(1 + 4Q^2\delta^2)} \quad (6.21)$$

olur. Gerilim ise

$$|V_{nt}| = I_n w_n L \left[\frac{1 + 4Q^2\delta^2}{Q(\sin \Phi_{sn} + 2Q\delta \cos \Phi_{sn})} \right] \quad (6.22)$$

olarak bulunur. En düşük harmonik gerilimde elde edilen Q optimumdur.

$$Q = \frac{1 + \cos \Phi_{sn}}{2\delta \sin \Phi_{sn}} \quad (6.23)$$

$$|V_{nt}| = I_n \delta w_n L \left(\frac{4}{1 + \cos \Phi_{sn}} \right) = \frac{2I_n R}{\sin \Phi_{sn}} \quad (6.24)$$

Bununla beraber bu durumlar altında verilen minimum harmonik gerilimler için genellikle filtrelerin dizayn edilmediğine dikkat edilmelidir. Normal olarak kayıpları azaltmak için, daha yüksek Q seçilir. Filtre dizaynında filtrelerin dönüştürücülerin çalışmasını kısıtlayabileceği gözönüne alınmalıdır.

Dönüştürücüler tarafından üretilen toplam harmonik akımlar sürekli filtre kollarında kaldığında, filtreler aşırı zorlanmalara maruz kalırlar.

6.3.2 Söndüren filtreler

Söndüren filtrelerin birkaç avantajı şöyle sıralanabilir.

(i) Bu filtrenin, ısı değişimlerine, frekans sapmasına, elemanların üretim toleranslarına ve kapasitör kayıplarına hassaslığı daha azdır.

(ii) Problemlerin devam etmesi ve anahtarlamaların yükselmesiyle, paralel kolların alt bölümleri için, gereksiz harmoniklerin geniş bir spektrumu için düşük empedans temin eder.

(iii) Sık sık ayarlı filtrelerin kullanımı, daha düşük ayarlı filtre frekansının altındaki harmonik derecelerine veya ayarlı filtre frekansları arasında, filtre ve sistem admitansı arasında paralel rezonansla sonuçlanır. Bir veya daha fazla söndüren filtrenin kullanımı, alternatif olarak daha uygun olarak kabul edilebilir.

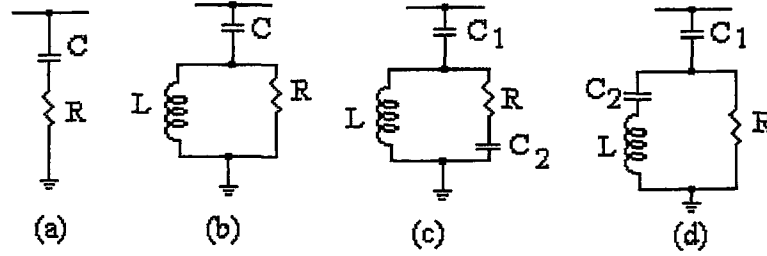
Söndüren filtrelerin ana dezavantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

(i) Söndüren filtrelerin, filtreleme performansının benzer seviyede oluşması, birçok durumda güç faktörünün düzeltilmesi ve gerekli sınırlar arasında iyi bir performans elde edilebilmesi için, daha yüksek nominal VA oranlarında dizayn edilmelidir.

(ii) Genellikle direnç ve reaktör üzerindeki kayıplar daha yüksektir.

6.3.2.1 Söndüren filtre tipleri

Şekil 6.4’de gösterildiği gibi 4 tip söndüren filtre vardır. Bunlar birinci derece, ikinci derece, üçüncü derece ve C tipi filtrelerdir.



Şekil 6.4 Yüksek geçiren söndüren filtreler

- a) Birinci derece
- b) İkinci derece
- c) Üçüncü derece
- d) C tipi

a) Birinci derece filtre büyük kondansatör gerektirdiğinden ve temel frekansta fazla kayıpları olduğundan normalde kullanılmaz.

b) İkinci derece tip filtre daha iyi performans gösterir. Fakat üçüncü derece filtrelerle karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir.

c) (c)’nin (b)’ye göre esas avantajı C_2 kondansatörünün varlığından dolayı, mevcut frekansta empedansın yükselmesi sebebiyle, temel frekans kayıplarındaki önemli bir azalmadır. Bundan başka C_2 ’nin oranı C_1 ’le kıyaslandığında çok küçüktür.

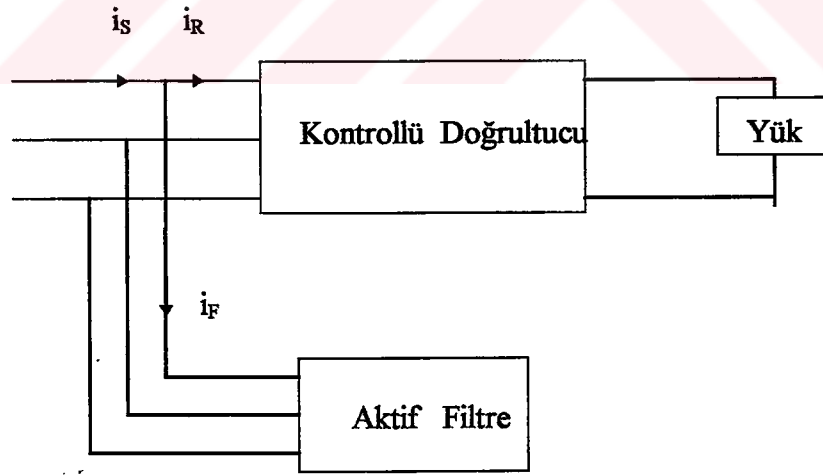
d) C tipi filtrenin performansı (c) ve (b)’nin arasında değişir. Bu filtrenin asıl avantajı frekansta ayarlı seri L ve C_2 ’den dolayı temel frekans kayıplarındaki azalmadır. Bu filtre temel frekans sapmaları ve bileşen değer kaymaları için daha hassastır

Büyük güçlü statik konvertörler genellikle 12 darbeli olarak tasarlanırlar. Bu tür konvertörlerin yapım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile 6 darbeli konvertörlerde kullanılmaktadır. Şebekelerde bu tür konvertörlerin kullanımı sonucu büyük miktarlarda 5. Ve 7. Harmonikler meydana gelmektedir. Bu harmonikler ayarlanabilen kollu paralel filtrelerin kullanımı ile yok edilebilirler. Bu kollar 5., 7., 11., 13., ve 17- ∞ (yüksek derecede) harmoniklere ayarlanırlar [7].

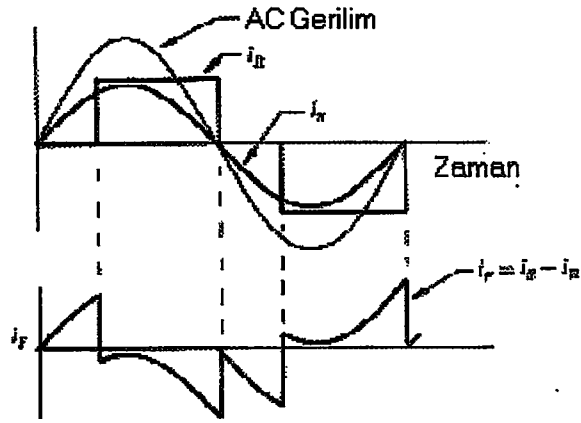
6.4 Aktif Filtreler

Kontrollü doğrultucuların elektrikli aletlerde kullanılması sonucu istenmeyen etki olarak sinüzoidal olmayan akım dalgaları meydana gelir. Sinüzoidal olmayan bu akımları sinüzoidal akıma dönüştürme yöntemlerinden biri de aktif filtreleme yöntemidir.

Aktif filtrenin, üç fazlı kontrollü doğrultucuya bağlanmış biçimi şekil 6.5-a da gösterildiği gibidir [8].



(a)

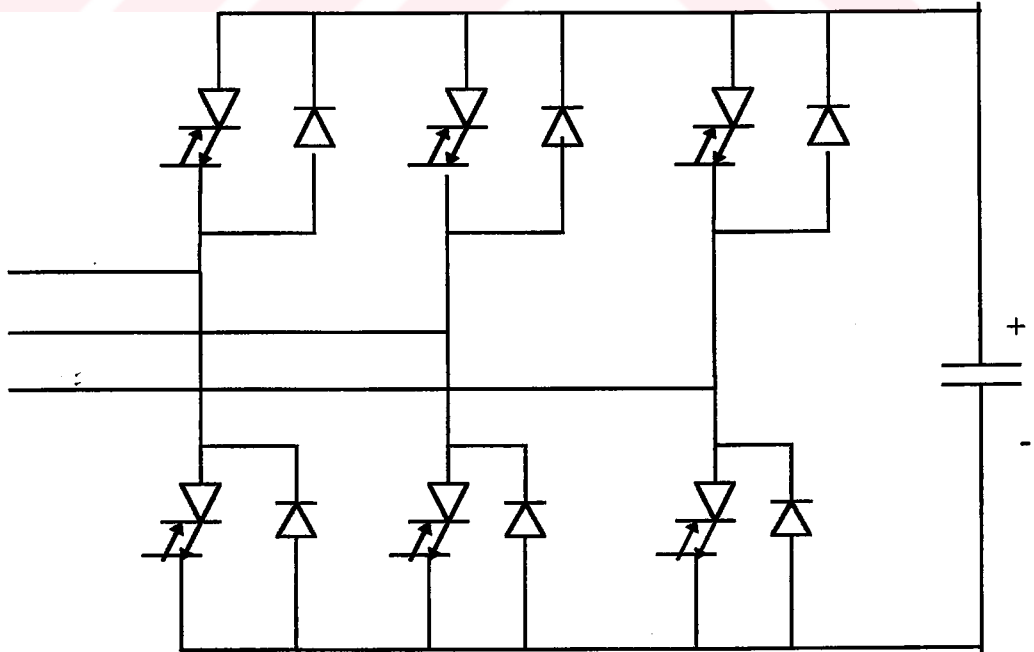


(b)

Şekil 6.5 (a) Aktif filtrenin devreye bağlanması

(b) Akım dalga şekilleri.

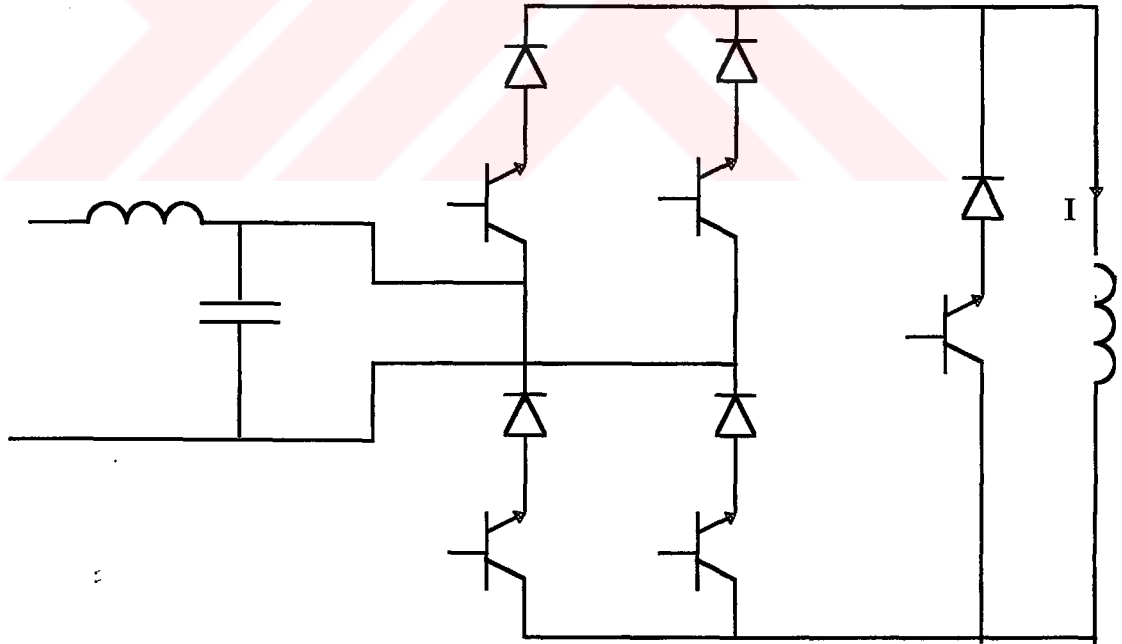
Burada i_S şebekeden çekilen akım, i_R kontrollü doğrultucunun çektiği akım ve i_F ise aktif filtreden geçen akımdır. Şebekeden çekilen akımın saf sinüs şeklinde ve akım ile gerilim arasında faz farkı olmaması için filtre akımının şekil 6.5 -b de görüldüğü gibi olması gerekir. Aktif filtre gerçekte aktif güç çekmez, reaktif güç çeker ve harmonik bileşenlerini yok eder. Dolayısıyla şebekeden çekilen akım sinüs şeklinde olur.



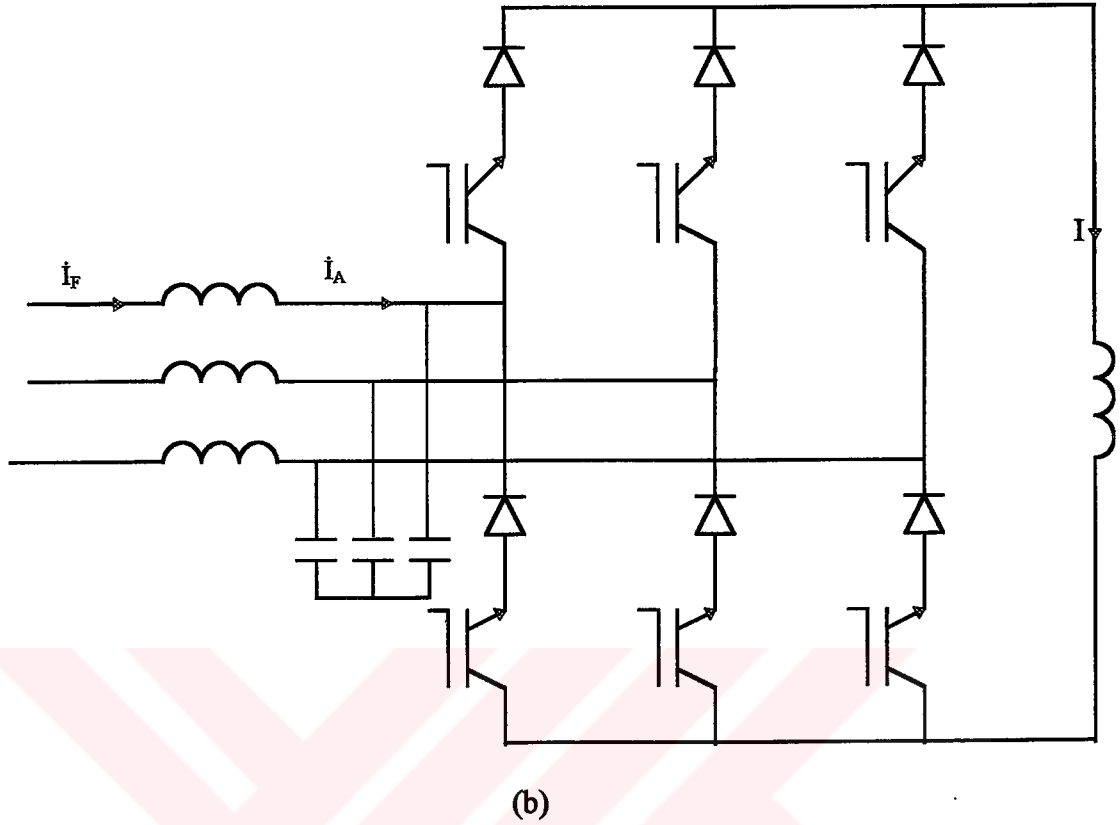
Şekil 6.6 Gerilim kaynaklı aktif filtre örneği

Gerilim kaynaklı bir aktif filtre yapısı şekil 6.6 da gösterilmiştir. Filtrenin çalışma prensibi, gerilim kaynağındaki dalgalanmalar anahtarlanarak bu dalgalanmaların kapasitöre taşınması sağlanır ve burada absorbe edilir.

Şekil 6.7’de gerilim beslemeli aktif filtreye alternatif olarak kullanılabilecek akım beslemeli tek ve üç fazlı aktif filtre gösterilmektedir. Filtre yükü bobinden oluşmaktadır. Sürekli akım uygun anahtarlama elemanlarıyla periyot taşmaları ihmal edilerek a.c. tarafa gönderilir. Anahtarlama elemanları olarak GTO’lar (kapıdan açılıp kapatılabilen tristörler), güç transistörleri veya IGBT (kapıdan yalıtılmış bipolar transistörler) kullanılabilir. Ancak bunlar ters voltajları önleyen seri bağlı diyotları da içerirler. PWM (darbe genişlik modülasyonu) , akımın sıfır olduğu periyotlarla elemanlar arasında da anahtarlama gerektirir. Seri bağlı çiftlerden birisinin her iki ucu da açıldığında a.c. akım periyodu üzerinden bobine geçiş vardır.



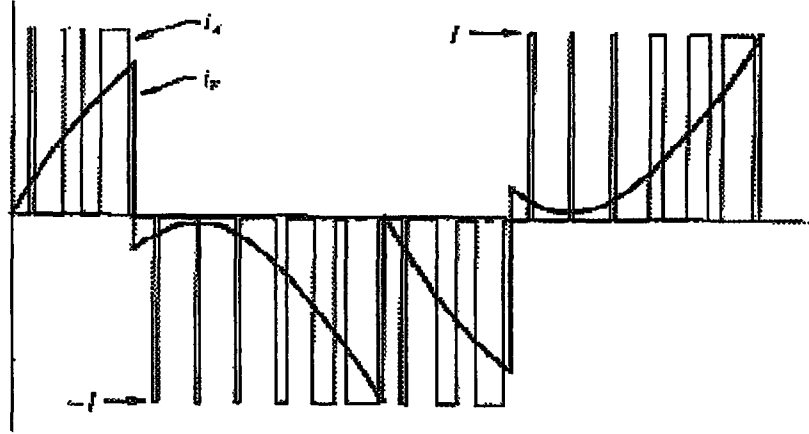
(a)



Şekil 6.7 Akım kaynaklı aktif filtre a) Tek fazlı b) Üç fazlı

PWM ile yüksek frekanslardaki harmonikler yok edilir, bu işlem a.c. tarafa bobin ve kapasitör bağlamakla elde edilir. Elemanlar anahtarlandığında oluşan ters akımların diyotlar yardımı ile a.c. taraftaki kondansatörlere ulaşması engellenir.

PWM kontrol sistemi şekil 6.8’ de gösterilmiştir. İstenilen filtre akımı i_F ’ nin elde edilişi şekil 6.5’ de gösterilmiştir. Darbe genişlikleri elemanların iletimde kalma süreleri ile ayarlanmaktadır. Anahtarlama açılarının kontrolünün bir mikroişlemci ile yapılması daha uygundur. Bu işlemler yapılırken, doğrultucuya gelen bir önceki sinüs periyodu hesaplanır ve bu değerler kaydedilir. Daha sonra yük üzerindeki işarete bakılarak bu işaretin de periyodu ölçülür ve bu ölçülen değer bir önce ölçülen değer ile karşılaştırılır. Bu sonuçlara göre gerekli olan tetikleme açıları tesbit edilir.



Şekil 6.8 Akım kaynaklı aktif filtre akımları

6.5 Aktif ve Pasif Filtrelerin Birlikte Kullanımı

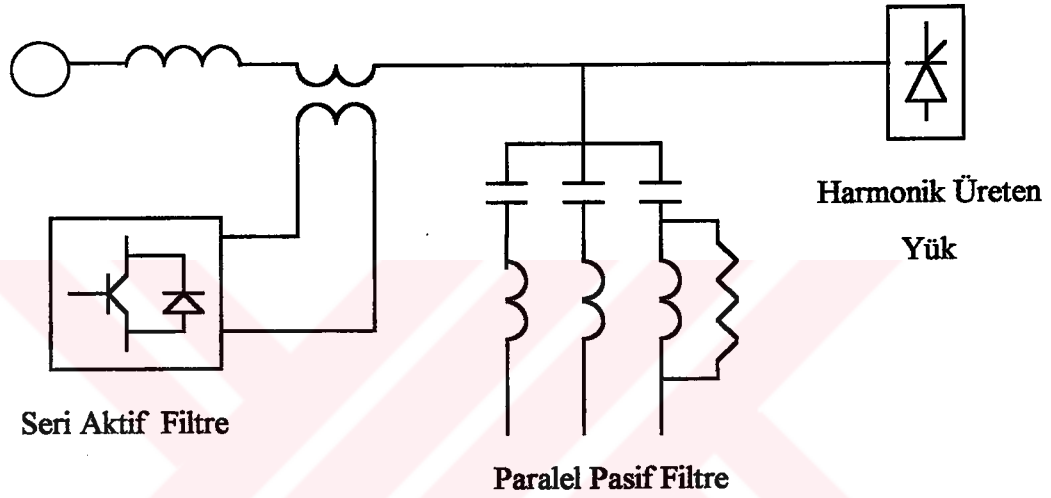
Güç sistemlerinde yarıiletken elemanlar, ark fırınları, vb tüketicilerin meydana getirdiği harmoniklerin yok edilmesi bazı güçlükleri ortaya çıkarmaktadır. Ayarlanabilir LC ve yüksek geçiren filtreler şebeke harmoniklerinin yok edilmesinde maliyetlerinin düşük ve verimlerinin yüksek olması nedeni ile yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat pasif filtrelerin aşağıda belirtilen bazı dezavantajları vardır [8].

- 1- Kaynak empedansı filtrenin karakteristiğini önemli şekilde etkiler.
- 2- Kaynak ile şebeke arasında olabilecek bir paralel rezonans bazı frekanslardaki harmonik akımlarının daha da artmasına neden olur.
- 3- Filtre ile kaynak arasında seri rezonans olabilir ve bunun sonucu ilave bazı harmonik akımları meydana gelebilir.

Teknolojik gelişmeler sonucu tristör, GTO , IGBT gibi yarıiletken elemanların anahtarlama hızlarının ve kapasitelerinin artması sonucu gerilim veya akım kontrollü PWM inverterleri kullanılmaya başlanmış ve böylece yukarıda belirtilen sakıncalar büyük ölçüde giderilmiştir. Bununla birlikte, aktif filtrelerin de aşağıda belirtilen bazı sakıncaları vardır.

- 1- Yüksek akımlarda hızlı cevap süreli inverterlerin yapımı zordur.
- 2- Tesis ve işletme masrafları oldukça yüksektir.

Aktif filtrelerin maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile aktif ve pasif filtrelerin birbirine seri veya paralel bağlanması ile yeni filtreler geliştirilmiştir. Şekil 6.9'da karma filtrelerden seri aktif ve paralel pasif filtre gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Seri aktif ve pasif paralel filtrelerin kombinasyonu

Pasif filtre yük ile paralel bağlanır ve böylece yükün ürettiği harmonikler büyük ölçüde yok edilir. Seri aktif filtre ise harmonik akımlarına karşı direnç etkisi göstererek bu akımların şebekeye akmasını engeller.

Diğer bir karma aktif-pasif filtre şekil 6.10'de gösterilmiştir. Burada bir pasif filtre ile, pasif filtreye göre gücü çok küçük olan aktif filtrenin birbirine seri bağlandığı görülmektedir. Bu filtrede pasif filtre yükün ürettiği harmonikleri yokeder ve aktif filtre ise filtreleme karakteristiğini iyileştirerek şebekeden çekilen akımın sinüse yaklaşmasını sağlar.

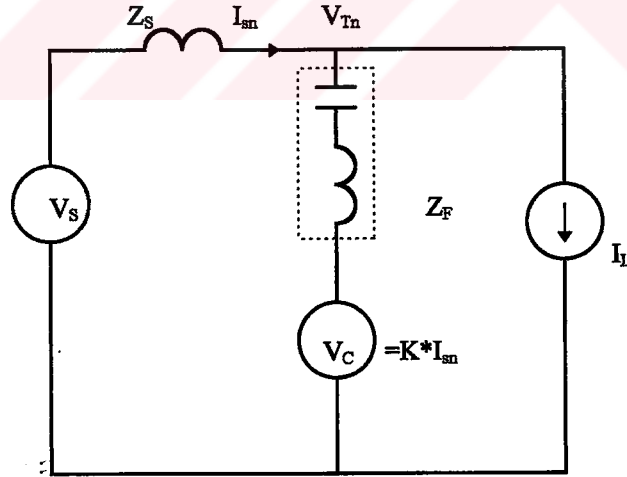
Tablo 6.1 Devre bileşenleri

Pasif Filtre			
Beşinci Kol	$L=1.2 \text{ mH}$	$C=340 \text{ }\mu\text{F}$	$Q=14$
Yedinci Kol	$L=1.2 \text{ mH}$	$C=170 \text{ }\mu\text{F}$	$Q=14$
Yüksek Geçiren Filtre	$L=0.26 \text{ mH}$	$C=300 \text{ }\mu\text{F}$	$R=3\Omega$

Küçük Değerli LC Filtresi	
$L_R = 10 \text{ mH}$	$C_R = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$

6.5.1 Filtreleme prensibi

İncelenen filrenin bir fazlı eşdeğer devresi şekil 6.11’de gösterilmiştir. Aktif filtre kontrollü ideal gerilim kaynağı V_C , yük akım kaynağı I_L , kaynak empedansı Z_S , ve pasif filtrenin toplam empedansı Z_F şeklinde kabul edilirse sistemin düzenlenmiş eşdeğer devresi şekildeki gibi olur.



Şekil 6.11 Örnek filtre sistem eşdeğer devresi

Aktif filtre bağlı değilken ($k=0$) yükün harmonik akımları (I_{Ln}) pasif filtre tarafından karşılanır ve filtre karakteristiği Z_S ve Z_F empedanslarının oranına bağlıdır.

$$I_{Sn} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} * I_{Ln} \quad (6.25)$$

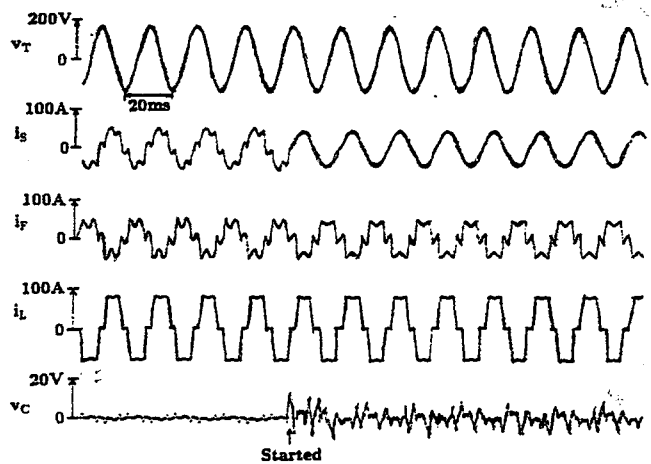
Aktif filtre seri olarak bağlandığında ve kontrollü gerilim kaynağı şeklinde kabul edilirse

$$V_C = K * I_{sn} \quad (6.26)$$

bağıntısı elde edilir. Aktif filtre uçlarındaki bu gerilim, harmonik akımlarının pasif filtre tarafından çekilip kaynağa akmamasını sağlar.

6.5.2 Deneysel sonuçlar

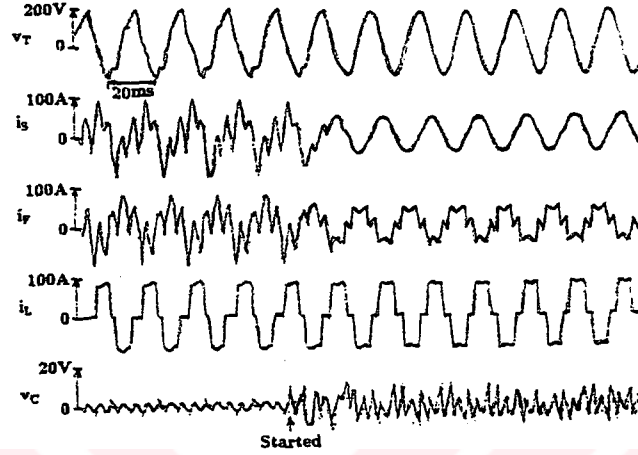
Şekil 6.12’de $Z_s = 0.02$ değeri için kaynak ve filtre akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri gösterilmiştir. Aktif filtre devrede bağlı değilken, şebekeden çekilen akım büyük oranda beşinci harmonik içermektedir. Aktif filtre devreye bağlandıktan sonra kaynak akımının sinüse çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12 $Z_s = 0.02$ pu için deneysel sonuçlar

Şekil 6.13’de aynı durum $Z_s = 0.06$ değeri için incelenmiştir. Aktif filtre devreye bağlanmadan önce, pasif filtre ile şebeke arasında dördüncü harmonik frekansında

paralel rezonans olduğu ve aktif filtre devreye bağlandıktan sonra bu rezonansın ortadan kalktığı ve kaynak akımının sinüse yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6.13 $Z_s = 0.06$ için deneysel sonuçlar

Sonuç olarak bu tür karma filtreler için şunlar söylenebilir.

- (1) Filtre karakteristiği kaynak empedansından bağımsızdır.
- (2) Kaynak ile pasif filtre arasında meydana gelebilecek seri ve paralel rezonans aktif filtre ile engellenir.
- (3) Kullanılan aktif filtrenin gücü, tek başına aktif filtre kullanılması durumuna göre çok daha küçüktür.

BÖLÜM 7 PASİF FİLTRE TASARIMI

Örnek olarak 100kV, 100MW ve $\alpha=15^\circ$ çalışma koşulunda altı darbeli bir konvertör incelenmiştir. Konvertör 275kV, 50Hz' lik bir şebekeye, 275/83kV ve kaçak reaktansı %15 olan bir transformatör üzerinden bağlanmıştır. Sekonder akımı 780A ve primer akımı 236A dir. 5., 7., 11., 13. ve ikinci derecede yüksek geçiren kolu olan filtre primer tarafa bağlanacaktır. Filtrenin toplam gücü 50MVAr dir. Bu güç filtre kollarına bölündüğünde her bir koldaki kondansatörün kapasitesi 0.147 μ F bulunur. Kondansatörlerin sıcaklık katsayısı %0.05 (her bir $^\circ$ C için), bobinlerin sıcaklık katsayısı %0.01 dir.Frekans toleransı $\pm$ %1 olarak alınmıştır [7].

$$\delta = \frac{1}{100} * \left\{ 1 + \frac{1}{2} * [0.05*20 + 0.01*20] \right\} = 0.016$$

AC şebekenin empedansı bilinmemektedir, fakat faz açısı $\phi_a < 75^\circ$ olduğu kabul edilmektedir. Optimum Q (bu en düşük harmonik gerilimini verir.)

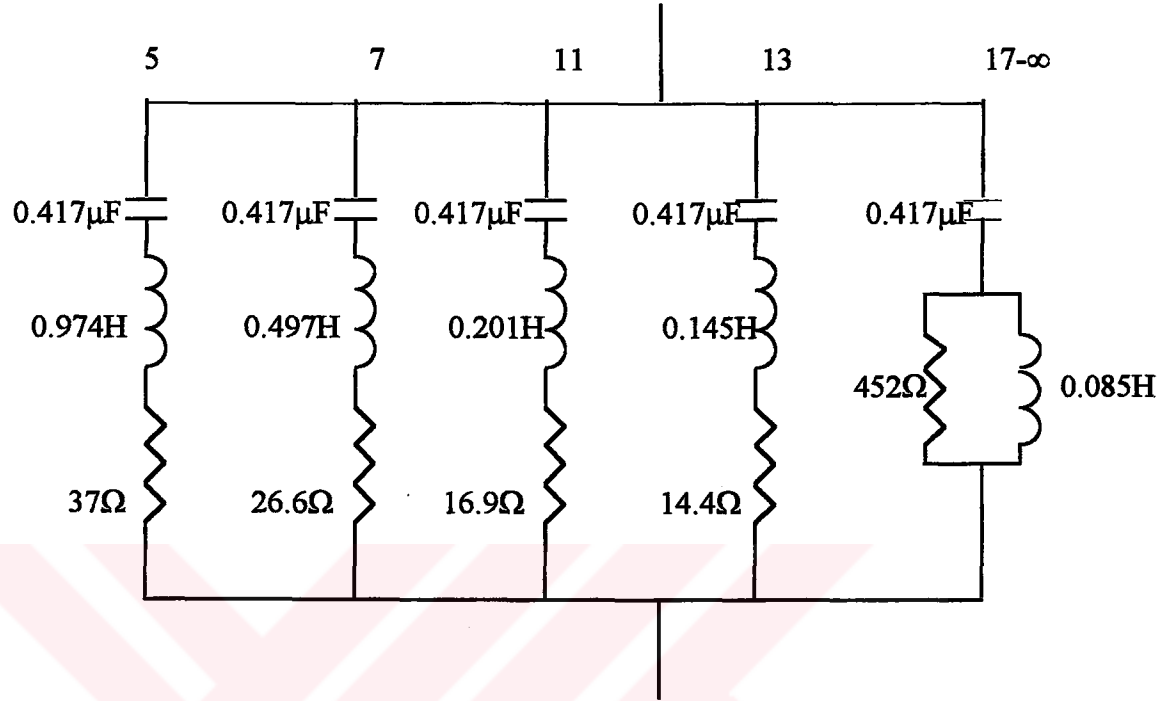
$$Q = \frac{1 + \cos 75^\circ}{2 * (0.016) * \sin 75^\circ} = 41$$

olarak elde edilir.

Q ve C bilinmektedir. Her bir rezonans koldaki L ve R değerleri ise hesaplanarak bulunmaktadır. Şekil 7.1 ' de örnek olarak dizayn edilmiş ac bir filtre verilmiştir.

Bu filtre ile ilgili olarak “pspice” programında yazılan program ve simülasyon çalışmaları aşağıda gösterildiği gibidir.

7.1 Tasarlanan Örnek Filtre ve Pspice'ta Yazılan Örnek Program İle Bunların Sonucunda Elde Edilen Simülasyon Sonuçları



Şekil 7.1 AC filtre dizaynı ile ilgili bir örnek.

Pspice'ta yazılan program

AC FİLTRE

```

I1 10 0 SIN(0 20A 50Hz)
I2 10 0 SIN(0 10A 250Hz)
I3 10 0 SIN(0 5A 350Hz)
I4 10 0 SIN(0 3A 550Hz)
I5 10 0 SIN(0 2A 650Hz)
I6 10 0 SIN(0 1A 2kHz)
C1 10 11 0.417μF IC=0
L1 11 12 0.974H IC=0
R1 12 0 37Ω
C2 10 13 0.417μF IC=0

```

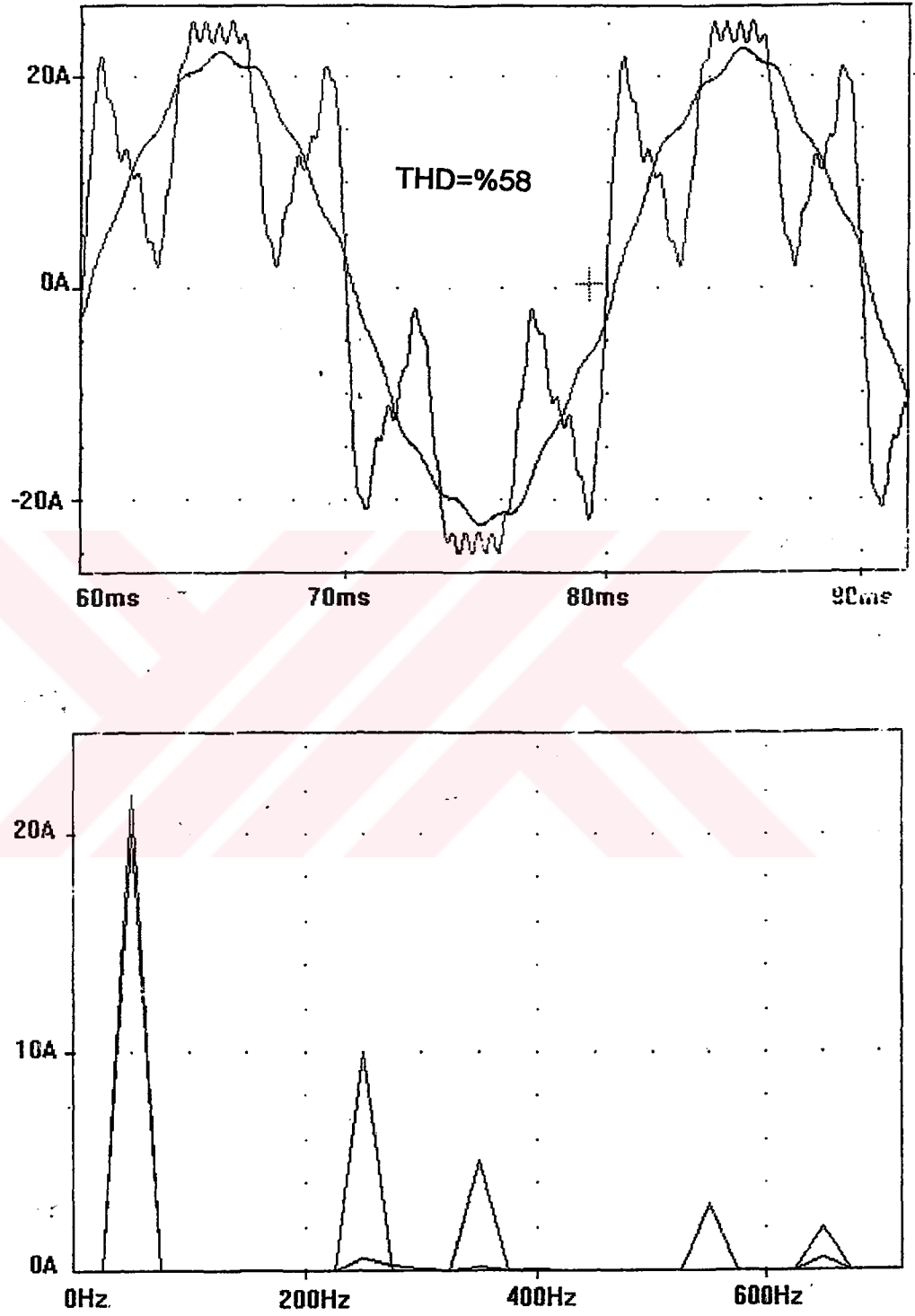
```

L2 13 14 0.497H IC=0
R2 14 0 26.6Ω
C3 10 15 0.417μF IC=0
L3 15 16 0.201H IC=0
R3 16 0 16.9Ω
C4 10 17 0.417μF IC=0
L4 17 18 0.145H IC=0
R4 18 0 14.4Ω
C5 10 19 0.417μF IC=0
L5 19 0 0.085H IC=0
R1 19 0 452Ω
RY 10 20 100Ω
LY 20 0 400mH
END

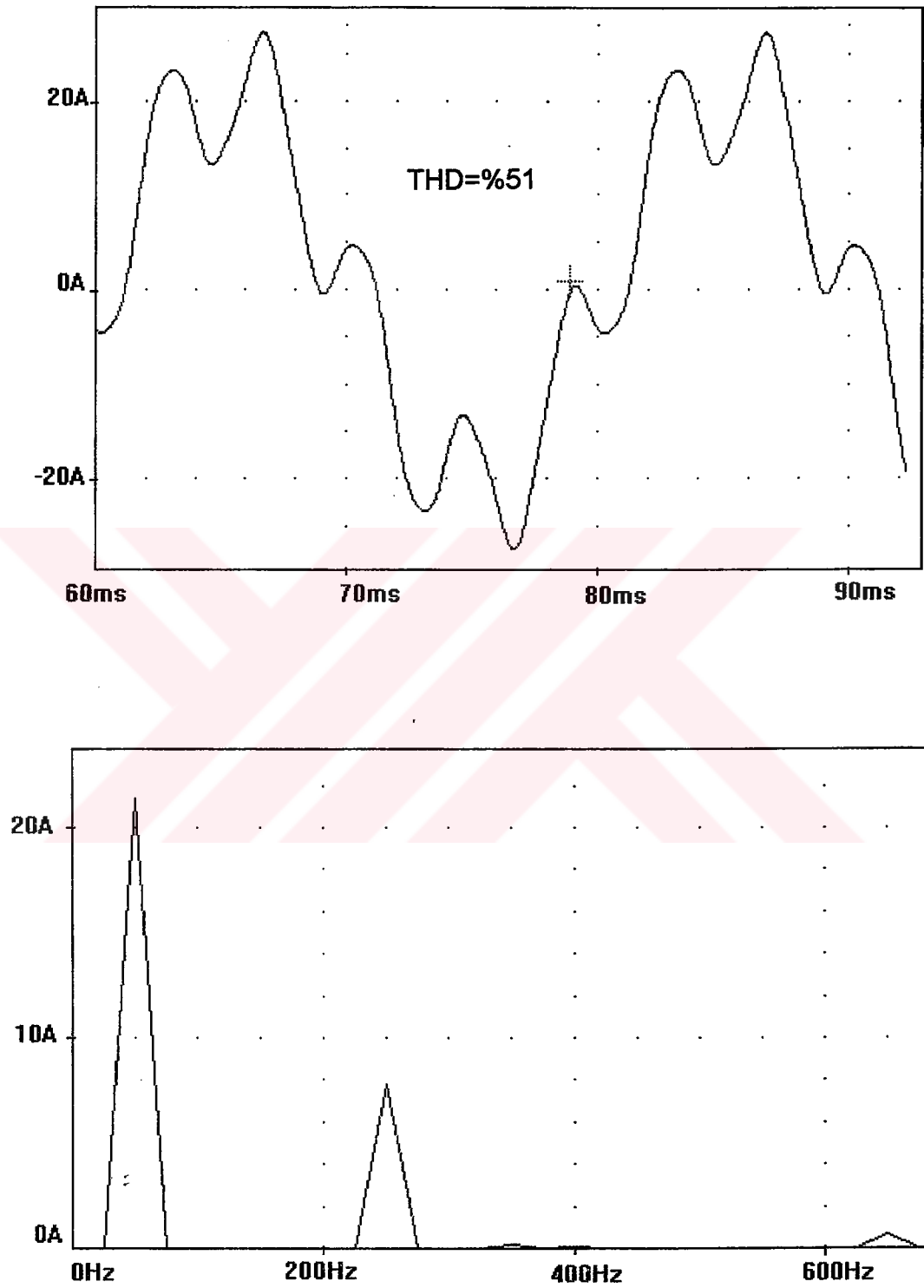
```

Pspice simülasyon programında tasarlanan filtre ile ilgili yukarıdaki program yazılmıştır. Şebekede en çok rastlanan temel bileşen, beşinci, yedinci, onbirinci, onüçüncü ve daha yüksek mertebeden harmonik akımlar ayrı birer akım kaynağı gibi düşünülerek filreye uygulanmıştır. Önce bu harmoniklerin toplamının temel bileşeni nasıl değiştirdiğini ve filtre devreye alındığında yük üzerindeki değişim incelenmiştir. Daha sonra harmoniklerin en etkili olan beşinci ve yedinci harmoniklerin etkilerini görebilmek için bu harmonikleri elimine etmek üzere tasarlanan kollar devreden çıkarılarak aynı giriş dalgasının yük üzerindeki etkileri incelenmiştir.

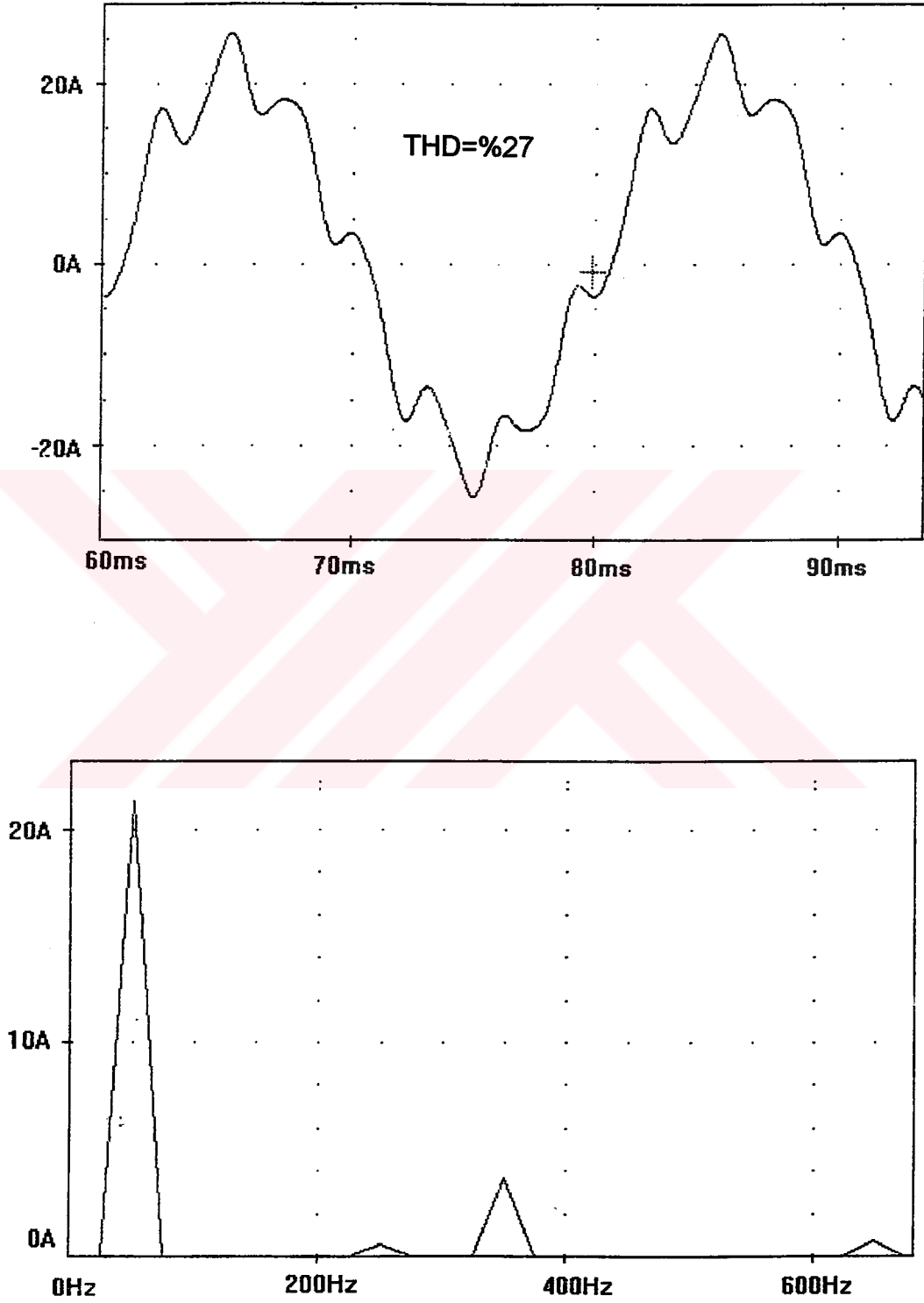
Alınan sonuçlar aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi beşinci ve yedinci harmoniklerin yok edilmesi ile problemin büyük bir kısmının halledildiği görülmektedir.



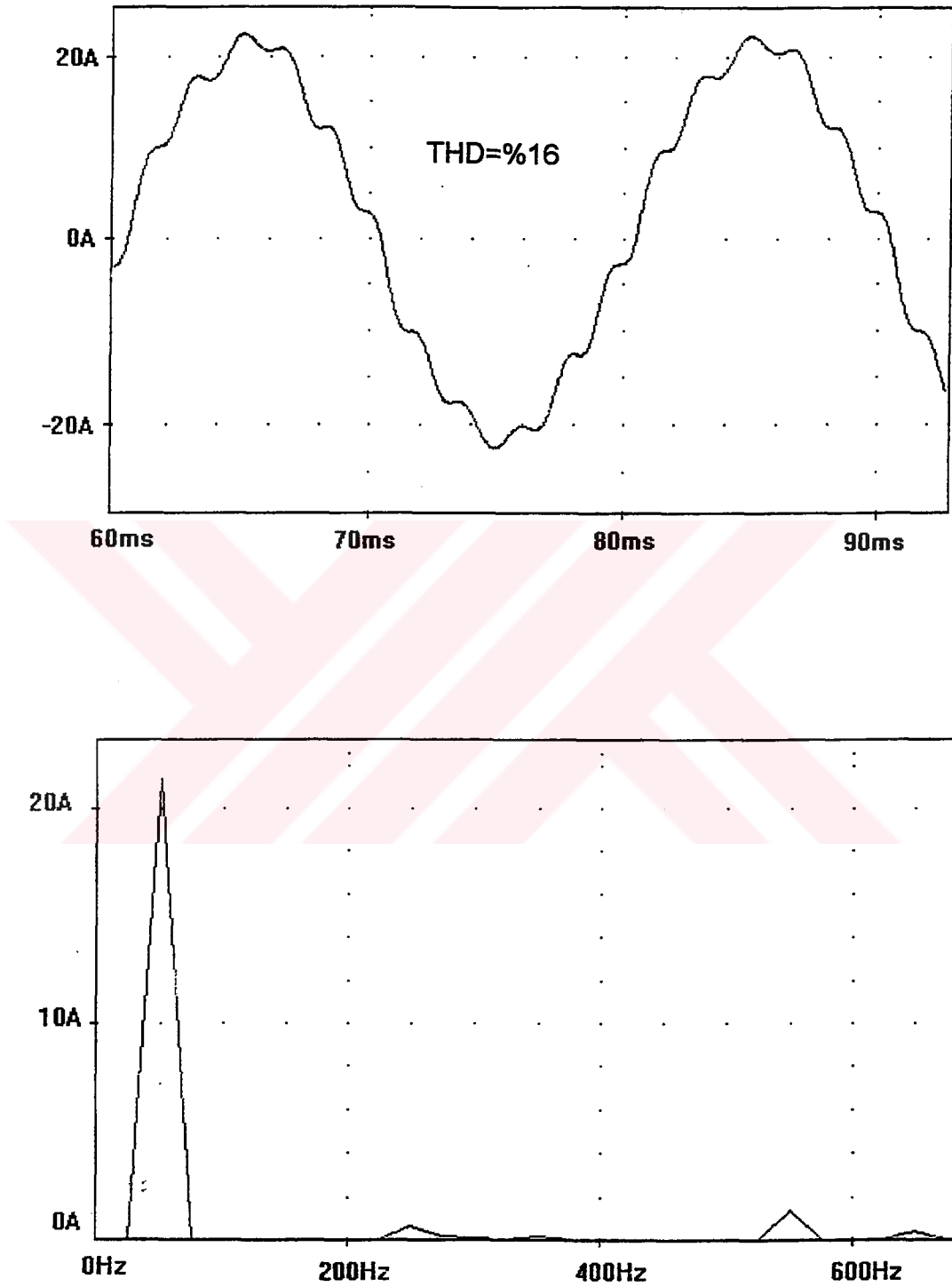
Şekil 7.2 Tasarlanan örnek filtrenin pspice simülasyon programından alınan giriş ve çıkış dalga şekilleri ile bu dalgalara ait harmonik dağılımı.



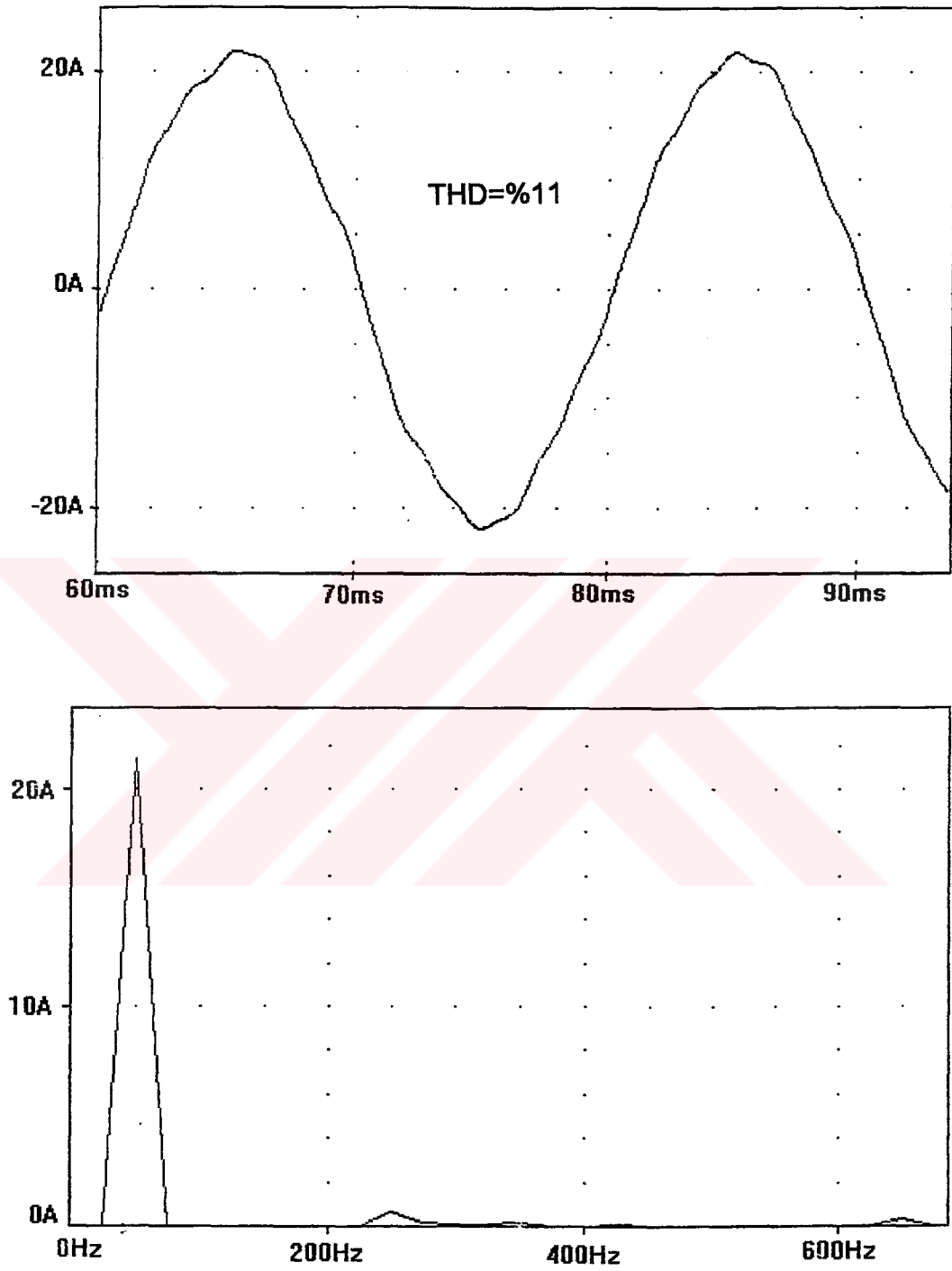
Şekil 7.3 Tasarlanan örnek filtrede 5. Harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun harmonik dağılımı.



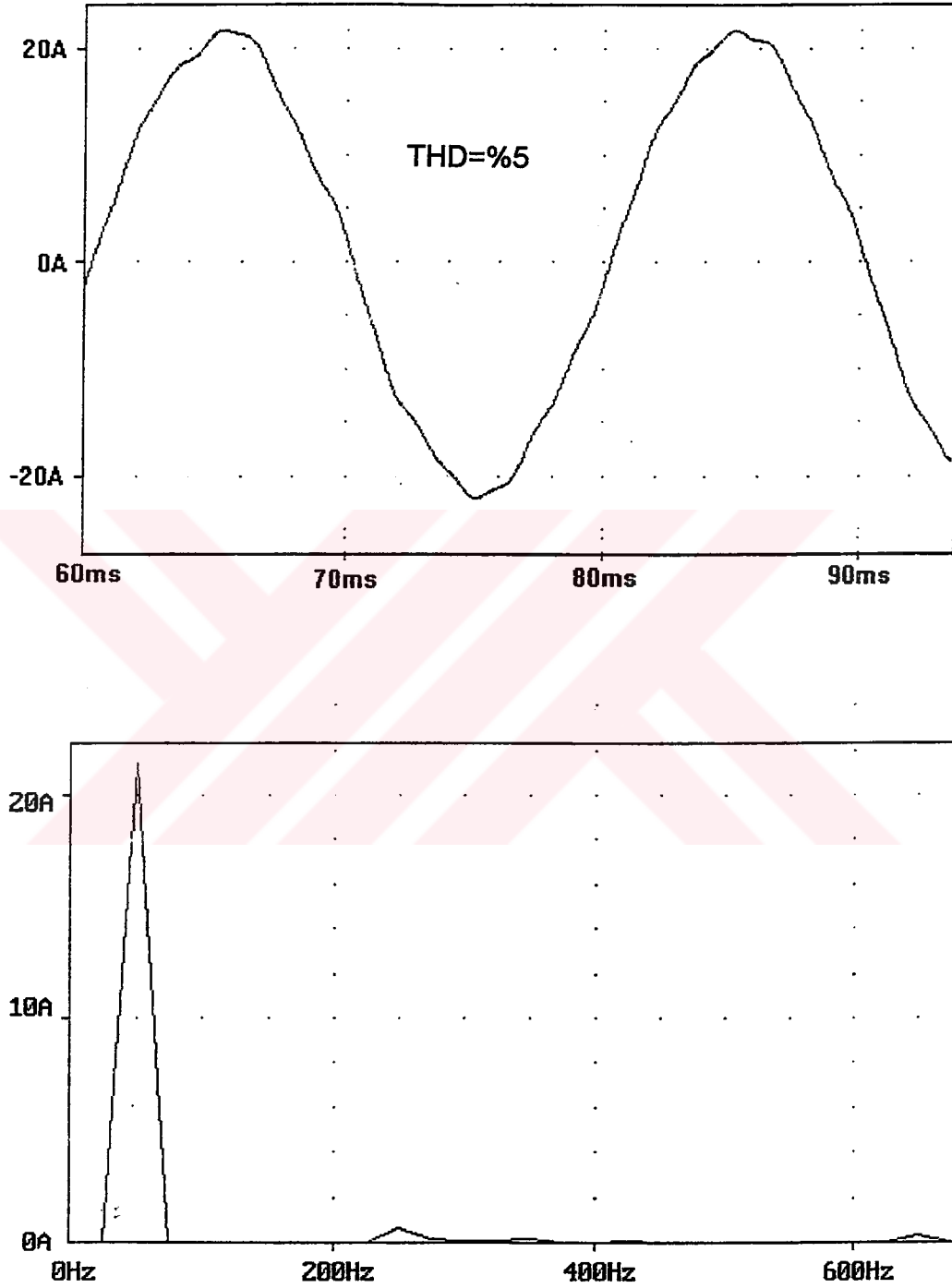
Şekil 7.4 Tasarlanan örnek filtrede 7. Harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun harmonik dağılımı.



Şekil 7.5 Tasarlanan örnek filtrede 11. Harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun harmonik dağılımı.



Şekil 7.6 Tasarlanan örnek filtrede 13. Harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun harmonik dağılımı.



Şekil 7.7 Tasarlanan örnek filtrede yüksek geçiren harmonik kolunun olmadığı kabul edilerek pspice simülasyon programından elde edilen çıkış dalga şekli ve bunun harmonik dağılımı.

SONUÇ

Enerjinin kalitesinin arttırılabilmesi için, şebekede bulunan harmoniklerin bir şekilde yok edilmesi gereklidir. Bunun için yaygın olarak pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda maliyetlerinin azalması ile birlikte aktif filtreler de kullanılmaya başlanmıştır.

Pasif filtre kullanımının kolay ve maliyetlerinin düşük olması bir avantajdır. Fakat bu tip filtrelerde kaynak empedansının filtrenin karakteristiğini etkilemesi, seri ve paralel rezonans oluşma olasılığının olması dezavantajdır. Bu gibi dezavantajlar, aktif filtre kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Fakat yüksek akımlı ve hızlı cevap süreli inverterlerin yapımı zor, maliyetlerinin ve işletme masraflarının oldukça yüksek olmasından dolayı, sadece aktif filtre yerine aktif ve pasif filtreden oluşan karma filtreler kullanılmaktadır. Karma filtrelerde harmonikli gerilimin dalga şeklinin büyük bir kısmı pasif filtre tarafından, geriye kalan küçük dalgalılıklar aktif filtre tarafından elimine edilir.

Filtre tasarımında fazla kondansatör kullanımı rezonansa neden olabilir. Filtreler tasarlanırken kompanzasyon olan tesislerde, mevcut reaktif güç gözönünde bulundurulmalıdır. Filtre yapılacak tesiste kompanzasyon yoksa, ayrıca kompanzasyon yapmaya gerek yoktur. Yapılan filtre hem harmoniklerin zararlarını minimuma indireyecek hem de kompanzasyon yapacak şekilde tasarlanmalıdır.

Elektrik enerjisi, yasal bir kalite standardı yayınlanmamış birkaç tüketim ürününden biridir. Gelişmiş güç elektroniği sistemlerinin hızla artan uygulama alanları nedeniyle, elektrik sistemlerinde gözlenen harmonik kirlenmeler giderek artmakta ve enerji kalitesinde düşmektedir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu harmoniklerin sebep olduğu problemleri ve ne şekilde engellenebileceğini araştırmaktadır. Ülkemizde de

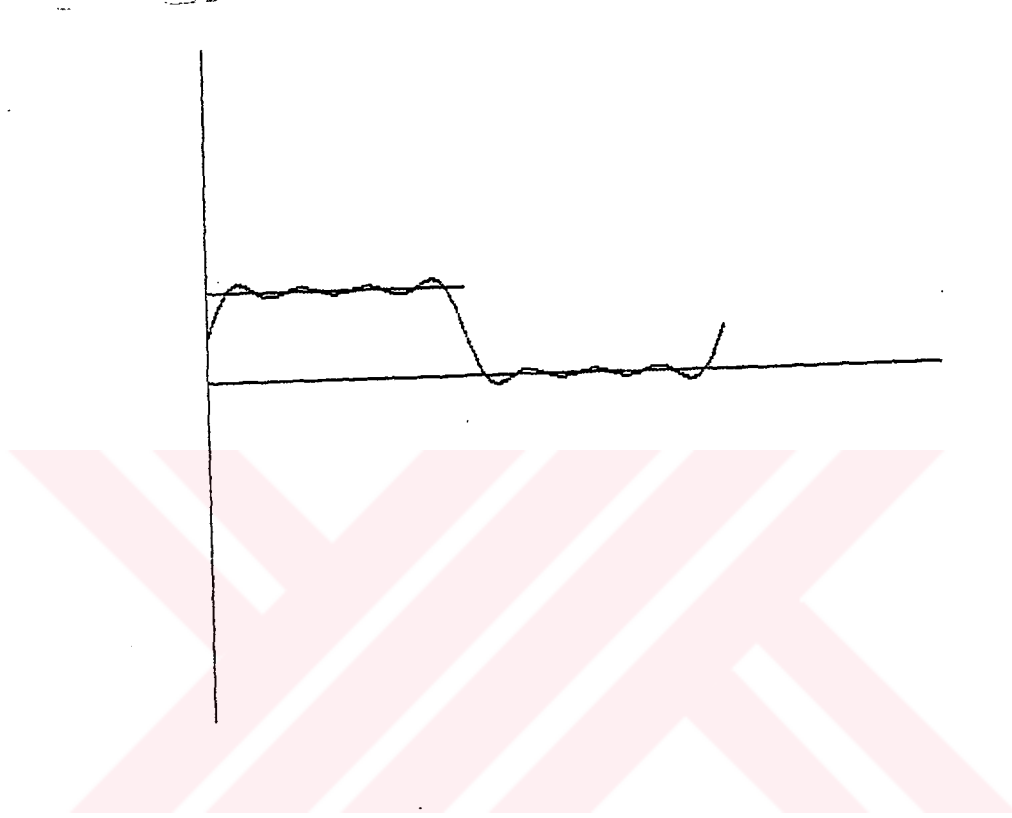
harmonikler konusunun fazla gecikmeden ele alınmasında ve bazı önleyici tedbirlerin getirilmesinde büyük yararlar vardır.



KAYNAKLAR

- [1] BAYRAM, M. ,Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerindeki Etkileri. Elektrik Mühendisliği Konferansı, İ.T.Ü , 1984.
- [2] TEK , Bozucu Etkilerin incelenmesi, 1992.
- [3] YÖRÜKEREN, N. , Güç Sistem Harmonikleri ve Bu Harmoniklerin Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi. KO.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Kocaeli, Aralık 1993.
- [4] ÖZBULUR, V. ,Güç Sistem Harmoniklerinin Bilgisayarlı Simülasyonu ve Ölçümü. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Y.Lisans Tezi, İstanbul, Temmuz 1991.
- [5] ATMACA, E. , Harmoniklerin Elektrik Donanımları Üzerine Etkileri. 3e, s.59-65, 1995.
- [6] ERTAN, U. , Elektrik Şebekelerinde Harmonikler. Kaynak Elektrik, s.109-115, İstanbul, 1994.
- [7] ARRILLIGA, J. , BRADLEY, D.A. , BODGER, P. ,Power System Harmonics. John Wiley and Sons, 1985.
- [8] YACAMİNİ, R. , Power System Harmonics Measuremants and Calculations. IEE Power Engineering Journal, Vol.9 , No.1, U.K. , Şubat 1995.
- [9] FUJITA, H. and AKAGİ, H. , A Pratical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - Series Connetion of Passive and Active Filters. IEEE TRANSACTIONS On INDUSTRY APPLICATIONS, Vol.27, No.6, P.1020-1025, Japan, 1991.

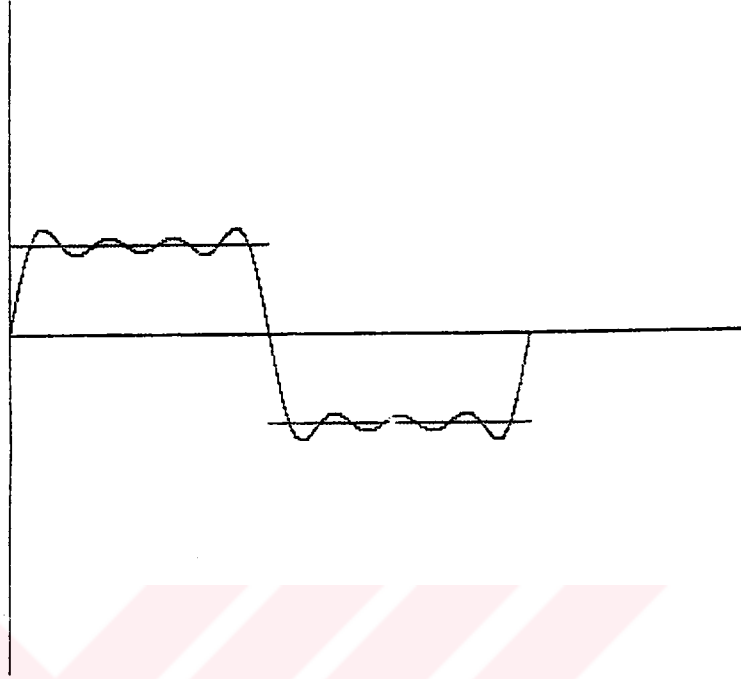
EK A



n	a ₀	a _n	b _n
1.00000	0.49990	-0.00013	0.63662
2.00000	0.49990	-0.00018	-0.00002
3.00000	0.49990	-0.00011	0.21223
4.00000	0.49990	-0.00022	-0.00000
5.00000	0.49990	-0.00012	0.12732
6.00000	0.49990	-0.00020	-0.00000
7.00000	0.49990	-0.00012	0.09095

$f(x) = .4998985$
 $+ -1.348801E-04 * \cos(1 * t) + .6366218 * \sin(1 * t) + -1.809489E-04 * \cos(2 * t) + -1.117816E-04 * \cos(3 * t) + .2122338 * \sin(3 * t) + -2.169652E-04 * \cos(4 * t) + -1.156692E-04 * \cos(5 * t) + .1273213 * \sin(5 * t) + -2.012771E-04 * \cos(6 * t) + -1.194821E-04 * \cos(7 * t) + 9.094739E-02 * \sin(7 * t)$

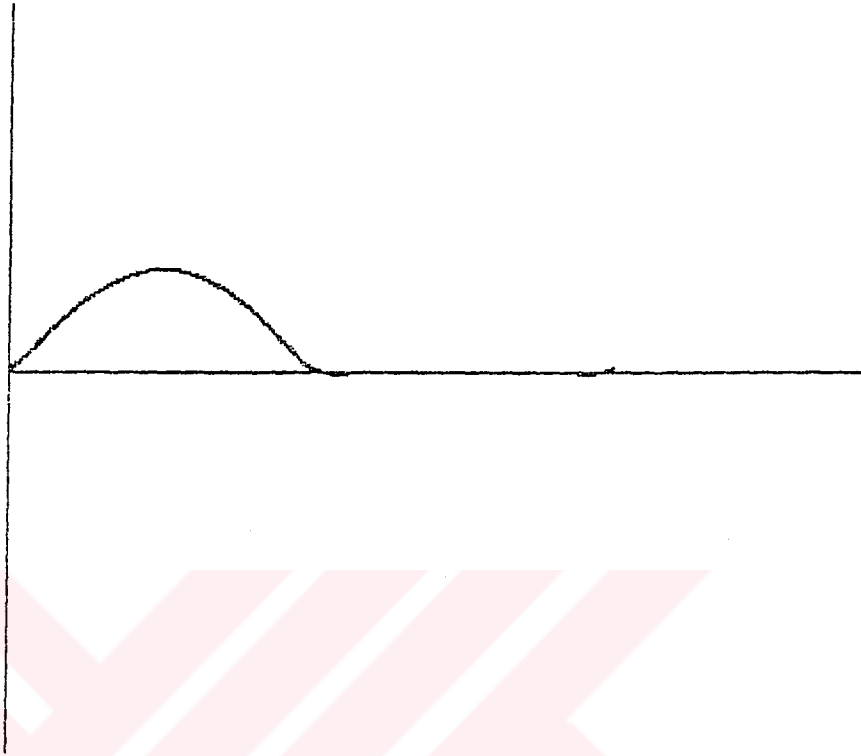
Şekil A.1 Yarıml kare dalğanın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı



n	a ₀	a _n	b _n
1.00000	-0.00008	0.00005	1.27329
2.00000	-0.00016	-0.00024	-0.00002
3.00000	-0.00016	-0.00008	0.42446
4.00000	-0.00016	-0.00027	-0.00000
5.00000	-0.00016	-0.00009	0.25465
6.00000	-0.00016	-0.00026	-0.00000
7.00000	-0.00016	-0.00009	0.18190

$f(x) = 1.273287 * \sin(1 * t) - 2.378608E-04 * \cos(2 * t) + .4244555 * \sin(3 * t) - 2.74306E-04 * \cos(4 * t) + .2546546 * \sin(5 * t) - 2.585224E-04 * \cos(6 * t) + .1818996 * \sin(7 * t)$

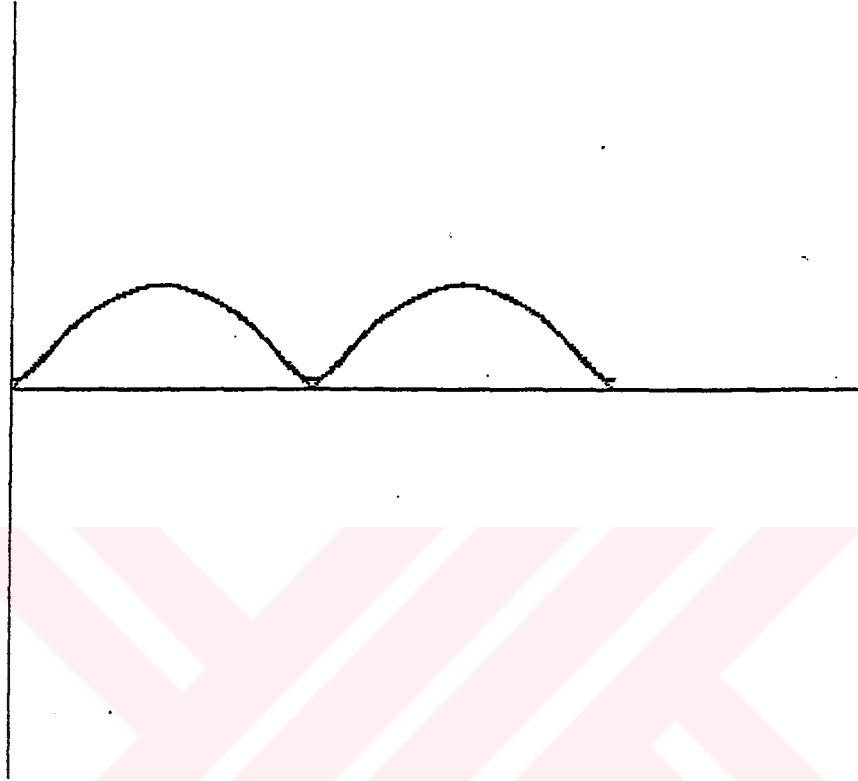
Şekil A.2 Tam kare dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı



n	a0	an	bn
1.00000	0.31831	-0.00001	0.50000
2.00000	0.31831	-0.21219	-0.00001
3.00000	0.31831	0.00001	0.00002
4.00000	0.31831	-0.04246	0.00000
5.00000	0.31831	0.00000	-0.00001
6.00000	0.31831	-0.01819	0.00000
7.00000	0.31831	-0.00000	-0.00000

$f(x) = .3183109$
 $+ .4999961 * \sin(1 * t) - .2121933 * \cos(2 * t) + 4.245618E-02 * \cos(4 * t) - 1.818688E-02 * \cos(6 * t)$

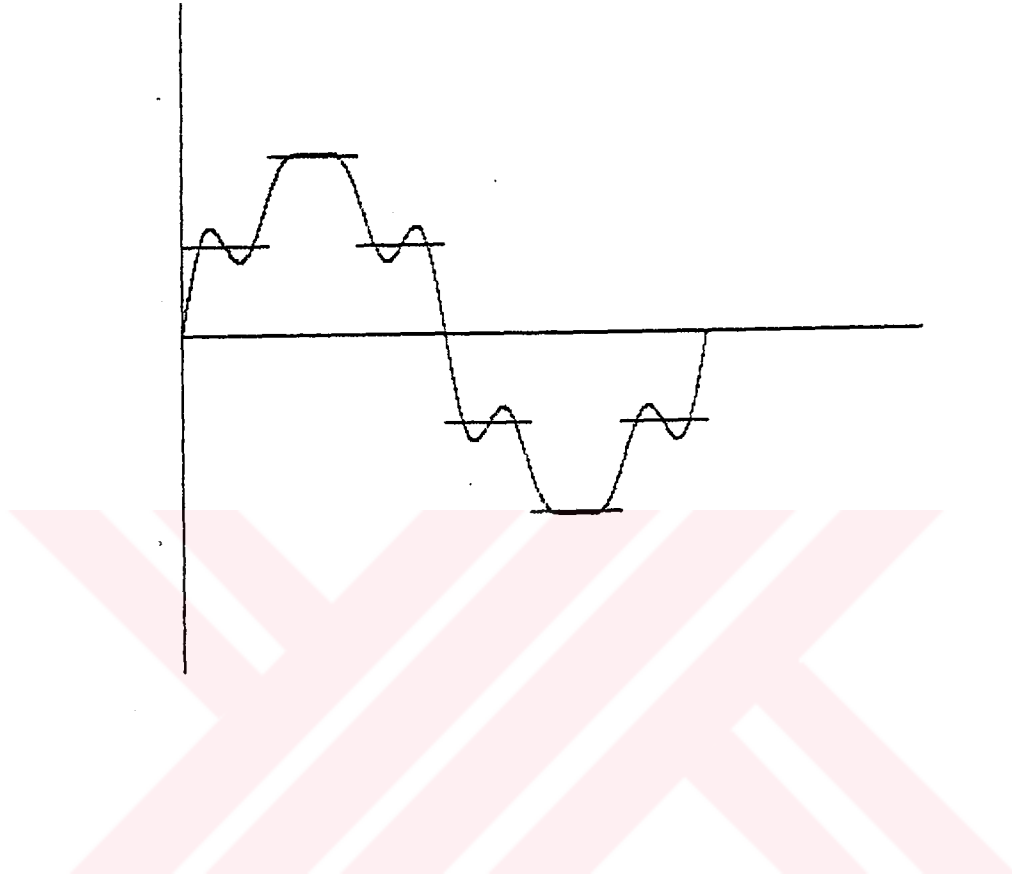
Şekil A.3 Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı



n	a0	an	bn
1.00000	0.63664	-0.00001	-0.00004
2.00000	0.63664	-0.42442	-0.00001
3.00000	0.63664	0.00001	0.00002
4.00000	0.63664	-0.08490	0.00000
5.00000	0.63664	0.00000	-0.00001
6.00000	0.63664	-0.03638	0.00000
7.00000	0.63664	-0.00000	-0.00000

$f(x) = .6366436$
 $+ -.4244158 * \cos(2 * t) + -.8490046E-02 * \cos(4 * t) + -.3637728E-02 * \cos(6 * t)$

Şekil A.4 Tam dalga doğrultulmuş sinüs dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı



n	a ₀	a _n	b _n
1.00000	-0.00024	-0.00000	1.91008
2.00000	-0.00032	-0.00097	-0.00017
3.00000	-0.00032	0.00003	0.00004
4.00000	-0.00032	-0.00015	0.00014
5.00000	-0.00032	-0.00014	0.38182
6.00000	-0.00032	-0.00054	-0.00000
7.00000	-0.00032	-0.00014	0.27301

$$f(x) = 1.910076 * \sin(1 * t) + -1.66366E-04 * \sin(2 * t) + -1.503097E-04 * \cos(4 * t) + 1.449009E-04 * \sin(4 * t) + -1.405351E-04 * \cos(5 * t) + .3818215 * \sin(5 * t) + -5.373119E-04 * \cos(6 * t) + -1.427672E-04 * \cos(7 * t) + .2730062 * \sin(7 * t)$$

Şekil A.5 Trapez dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı



n	a ₀	a _n	b _n
1.00000	0.49996	-0.00015	-0.31834
2.00000	0.50004	0.00002	-0.15917
3.00000	0.50004	0.00001	-0.10611
4.00000	0.50004	0.00001	-0.07958
5.00000	0.50004	0.00001	-0.06367
6.00000	0.50004	0.00001	-0.05305
7.00000	0.50004	0.00001	-0.04548

$f(x) = .4999581$
 $+ -1.471265E-04 * \cos(1 * t) + -.3183425 * \sin(1 * t) + -.1591682 * \sin(2 * t) + -.1061058$
 $* \sin(3 * t) + -.7.958369E-02 * \sin(4 * t) + -.6.366883E-02 * \sin(5 * t) + -.5.305419E-02 *$
 $\sin(6 * t) + -.0454764 * \sin(7 * t)$

Şekil A.6 Testere dişi dalganın Fourier katsayıları ve Fourier açılımı

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında İstanbul’ da doğdu. İlkokul ve ortaokulu İzmit’ de okudu. İzmit Endüstri Meslek ve Teknik Lisesi Elektrik Bölümünü, okul birincisi olarak bitirdi. Lisans öğrenimini 1986-1990 yıllarında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümünde gördü. 1995 yılında SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’ nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında, Yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu öğrenimine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

