

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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER
VE HARMONİKLERİN ANALİZİ**

SERHAT BERAT EFE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALATYA
Aralık 2006**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE HARMONİKLERİN ANALİZİ

Serhat Berat Efe

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

61 + viii Sayfa

2006

Danışman: Prof. Dr. M. Salih Mamiş

Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji ile sistemdeki yükler çeşitlilik kazanmıştır. Bu yüklerin her zaman lineer olması istenir. Ancak son otuz beş yılda ilerleyen yarı iletken teknolojisinin büyük etkisi ile sistemdeki nonlineer yüklerde artış görülmüştür.

Nonlineer yükler, akım ve gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Sistemdeki bu nonlineer yükler, sistemde harmonik akımlar ile gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik oluşumuna sebep olan başlıca yükler; güç elektroniği elemanları, transformatörler, kesintisiz güç kaynakları (UPS), dönüştürücüler ve yüksek güçlü endüksiyon motorlarıdır. Harmonikler sistemde ek enerji kayıplarına, ısınmalara, yalıtımlarının zarar görmelerine yol açarlar. Bu nedenlerden dolayı harmoniklerin oluşmadan veya oluşuktan sonra giderilmesi önem taşımaktadır. Harmoniklerin yok edilmesi için en önemli yöntem harmonik filtreler yoluyla harmoniklerin süzülmesidir.

Bu çalışmada; öncelikle harmoniklerle ilgili temel bilgiler verilerek nasıl ve neden oluştukları, elektrik enerji sistemi üzerindeki etkileri ve filtreleme yöntemleri incelenmiştir. Daha sonra örnek bir elektrik enerji tesisinin modeli MATLAB programında oluşturulmuş, pasif filtrelerin etkisi incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Harmonik analizi, güç sistemlerinde harmonikler,
harmonik bozulma

ABSTRACT

Graduate Thesis

HARMONICS IN POWER SYSTEMS AND ANALYSIS OF HARMONICS

Serhat Berat Efe

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

61 + viii Pages

2006

Supervisor: Prof. Dr. M. Salih Mamiş

Different kinds of loads appear in electrical systems due to significant developments in the technology in recent years. For reliability of the system, it is preferred that the loads be linear. However, due to developments in the semiconductor technology in last 35 years the number of nonlinear loads in the system has increased rapidly.

Nonlinear loads affect the system by generating harmonic currents and voltages. Power electronic components, transformers, uninterruptible power supplies (UPS), converters and high-power induction motors are some power system elements that cause harmonics. Harmonics in the current and voltage waveform cause extra power loss, heating in the system elements and damage in the insulation of system equipment. For these reasons, elimination of harmonics in electrical system has gained more importance. One of the suitable methods for removing harmonics is to use passive filters.

In this thesis, the theory about harmonics is given and some investigation about how and why harmonics are produced is carried out. The techniques that can be used for filtering the harmonics are introduced. A test system is studied using MATLAB-Simulink Power Systems Blockset and the obtained results are discussed.

KEYWORDS : Harmonic analysis, power system harmonics, harmonic distortion

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgmeden beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Salih MAMİŞ'e;

Güç sistemleri ile ilgili her türlü yardımlarını gördüğüm Yüzüncü Yıl Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ hocama;

Kaynak sıkıntısı çektiğim sıralarda bana destek olan Dicle Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Yrd. Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ hocama ;

Şu ana kadarki eğitimimde olduğu gibi bu tezin hazırlanmasında da maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili Annem, Babam, Kardeşim'e ve biricik hayat arkadaşım Filiz'ime,

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nonlineer Elemanların Tanımı.....	6
2. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT KAVRAMLAR.....	8
2.1. Nonsinüsoidal Durumda Elektrik Büyüklükleri.....	8
2.2. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD).....	9
2.3. Toplam Talep Distorsiyonu (TTD).....	10
2.4. Şekil(Form) Faktörü.....	10
2.5. Tepe Faktörü.....	10
2.6. Telefon Etkileşim Faktörü (TEF).....	10
2.7. Transformatör K-Faktörü.....	11
2.8. Distorsiyon Güç Faktörü.....	12
3. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLARIN TANIMLANMASI....	13
3.1. Harmonik Kaynakları.....	13
3.1.1. Bilgisayarlar.....	14
3.1.2. Statik kompanzatörler.....	14
3.1.3. Ark fırınları.....	14
3.1.4. Jeneratörler.....	15
3.1.5. Dönüştürücüler.....	16
3.1.6. Transformatörler.....	16
4. HARMONİKLİ BİR SİSTEMDE AKIM VE GERİLİM KALİTESİNİ BELİRLENMESİ ve HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER.....	18
4.1. Transformatörler üzerindeki etkileri.....	21
4.2. Motorlar ve jeneratörler üzerindeki etkileri.....	22
4.3. İletkenler üzerindeki etkileri.....	22
4.4. Kondansatörler üzerindeki etkileri.....	24
4.5. İletim sistemleri üzerindeki etkileri.....	26
4.6. Elektronik elemanlar üzerindeki etkileri.....	26
4.7. Sigortalar üzerindeki etkileri.....	26
4.8. Direnç ve reaktanslar üzerindeki etkileri.....	27
4.9. Aydınlatma elemanları üzerindeki etkileri.....	27
4.10. Ölçü aletleri üzerindeki etkileri.....	27
4.11. Güç faktörü üzerindeki etkileri.....	28
4.12. Harmoniklerin Rezonans Etkisi.....	28
5. SİSTEMLERDE HARMONİKLERİN ENGELLENMESİ.....	32
5.1. Aktif Filtreler.....	32
5.2. Pasif Filtreler.....	34
5.2.1. Seri filtreler.....	35
5.2.2. Paralel (şönt) filtreler.....	36
5.2.2.1. Tek ayarlı filtreler.....	37
5.2.2.2. Çift ayarlı filtreler.....	37

5.2.2.3.Sönümlü filtreler.....	38
5.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi.....	40
5.3.1. Fourier analizinde simetri.....	42
5.3.1.1.Çift fonksiyon simetrisi.....	42
5.3.1.2.Tek fonksiyon simetrisi.....	43
5.3.1.3.Yarım dalga simetrisi.....	44
5.3.2. Fourier katsayılarının bulunması.....	44
5.3.2.1.Analitik yöntemle Fourier katsayılarının bulunması.....	44
5.3.2.2.Grafik yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması.....	45
5.3.2.3.Ölçme yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması.....	46
6. HARMONİK FİLTRE SİMÜLASYONLARI.....	48
6.1. Giriş.....	48
6.2. Örnek Sistem.....	48
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
8. KAYNAKLAR.....	58
9. EKLER.....	60
10. ÖZGEÇMİŞ.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Lineer ve nonlinear yük akım-gerilim dalga şekilleri.....	2
Şekil 1.2. Frekansı 50 Hz olan bir dalğanın bazı harmoniklerinin şekilleri.....	3
Şekil 1.3. Nonlinear yük ve güç kaynağı modeli.....	4
Şekil 1.4. Üç fazlı 4 telli bir sistemde harmonik akımları ve nötr bağlantısı.....	5
Şekil 4.1. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi.....	23
Şekil 5.1. Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi.....	32
Şekil 5.2-a. Paralel bağlı aktif filtre.....	32
Şekil 5.2-b. Seri bağlı aktif filtre.....	33
Şekil 5.3. Endüktif düşük geçiren filtre.....	33
Şekil 5.4. Kapasitif Yüksek Geçiren Filtre.....	33
Şekil 5.5-a. Düşük Q tipi filtre.....	34
Şekil 5.5-b. Yüksek Q tipi filtre.....	34
Şekil 5.6. Bir devrede seri filtrenin kullanımı.....	34
Şekil 5.7. Bir devrede paralel filtrenin kullanımı.....	35
Şekil 5.8. Tek ayarlı filtre.....	36
Şekil 5.9. Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi ve çift ayarlı filtre.....	37
Şekil 5.10. Birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi sönümlü filtreler.....	37
Şekil 5.10-a. Yüksek geçiren paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi....	38
Şekil 5.11-a. Çift fonksiyon simetrisi.....	41
Şekil 5.11-b. Tek fonksiyon simetrisi.....	42
Şekil 5.12. Grafik yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması.....	45
Şekil 6.1. Filtresiz sistem.....	48
Şekil 6.2. Filtresiz sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri.....	48
Şekil 6.3-a. Filtresiz sistemde oluşan gerilim harmonikleri.....	49
Şekil 6.3-b. Filtresiz sistemde oluşan akım harmonikleri.....	49
Şekil 6.1. Filtreli sistem.....	50
Şekil 6.2. Filtreli sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri.....	50
Şekil 6.3-a. Filtreli sistemde oluşan gerilim harmonikleri.....	51
Şekil 6.3-b. Filtreli sistemde oluşan akım harmonikleri.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı....	2
Çizelge 1.2.	Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler.....	6
Çizelge 3.1.	Harmonik dereceleri ve bunların dizi tipleri.....	16
Çizelge 5.1.	Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması.....	38
Çizelge 6.1.	Sistemdeki harmonikli akımların genlikleri.....	52
Çizelge 6.2.	Sistemin gerilim ve akım değerleri.....	52
Çizelge 6.3.	THD değerleri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Hz	Hertz
ω	Açısal frekans
α	Harmonikli gerilimin faz açısı
θ	Harmonikli akımın faz açısı
pf_{toplam}	Toplam güç faktörü
$pf_{\text{dist.}}$	Distorsiyon güç faktörü
λ	Dalgalılık katsayısı
DF	Distorsiyon (bozulma) faktörü
β_n	n. harmonik için tanımlanan gerilim harmoniği oranı
α_n	n. harmonik için tanımlanan akım harmoniği oranı
$\cos\phi$	Güç faktörü
X_L	Endüktif reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
R	Direnç
Q	Kalite faktörü
Z	Empedans

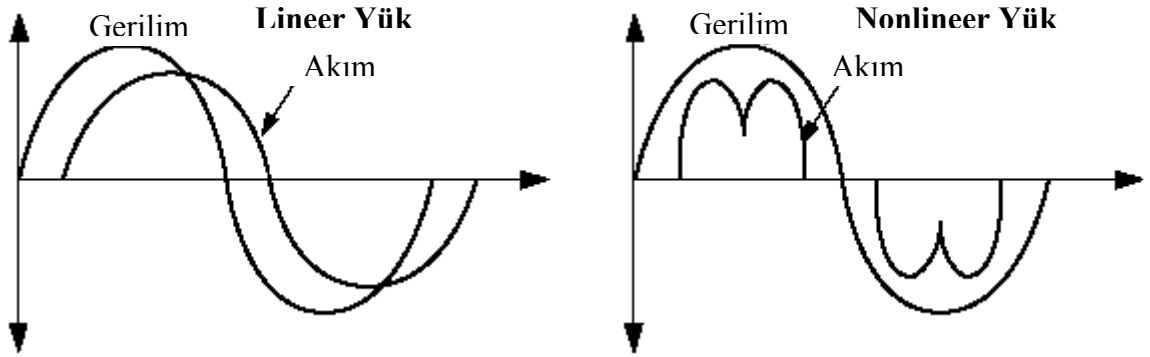
1.GİRİŞ

İletim sistemi, bir elektrik güç sisteminin omurgasını teşkil etmektedir. Bir elektrik iletim sisteminde elektrik enerjisinin kalitesi; elektriğin sürekliliği, gerilim ve frekansın limitler dâhilinde değişimi ve dalga biçimi düzgünlüğü ile birlikte tanımlanır. Elektrik güç sistemlerinin güvenilir biçimde çalışabilmesi için tasarım ve işletim aşamasında bir takım etkenlerin göz önüne alınması gerekir. Bu etkenlerden biri, güç kalitesini belirleyen parametrelerden olan nonlinear karakteristikli elemanların meydana getirdiği harmoniklerdir. Elektrik güç sistemlerindeki nonlinear elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerji kalitesini olumsuz etkilemektedir [1, 2].

1893'te Hartford'da bir motordaki ısınma problemiyle uğraşan mühendisler, ısınmanın asıl kaynağını motorun bağlı olduğu güç sistemindeki rezonans olduğunu gözlediler [3]. Güç sisteminde oluşan bu rezonansın sistemde var olan değişken dalga şekillerinden, yani harmoniklerden dolayı oluştuğunu tespit ettiler. Bu tarihten 3 yıl kadar önce de Portland'da elektrikçiler, hat frekans harmoniklerinden kaynaklandığı olası farklı bir iletim hattı sorunuyla uğraşmışlardı. Bunlar, kayıtlı ilk güç sistemi harmonik analizleridir. Avrupa'daki elektrik üreticileri yüksek frekans kullanmadıklarından o dönemlerde bu problemden etkilenmediler [3]. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte harmonik problemi tüm dünyada büyük bir sorun teşkil etmeye başladı. Bundan sonraki dönemlerde tespit edilen bu harmonikli dalgaların tespit edilmesi ve engellenmesi için çeşitli yöntemler geliştirildi.

Harmonik akım ve gerilimlerinin tespit edilmesi için Alabama'da bulunan 12 darbeli bir dönüştürücü ile kontrol edilen sanayi fırınlarının ele alındığı bir çalışmada öncelikle harmonik analizi için eşdeğer devre çıkarılmış ve yapılan simülasyonlar sonucunda dönüştürücü tarafından fırınlara 5, 7, 11 ve 13. harmoniklerin enjekte edildiği bulunmuştur [4]. Ölçümler IEEE-519 standardı göz önünde bulundurularak yapılmış, buna göre sistemde her faz için ayarlı şönt filtre veya paralel LC filtre bağlanabileceği tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise değişken yüklü bir motor devresi ele alınmış, günlük ölçüm sonuçlarına göre bir simülasyon devresi oluşturulmuştur. Bundan sonra sistemde mevcut harmonikli akım ve gerilimler çıkarılmıştır [5]. Daha küçük güçlerde yapılan diğer bir çalışmada tek fazlı tam dalga doğrultucu ile kontrol edilen nonlinear yüklerin bağlı olduğu bir devrenin deneysel karakterizasyonu yapılmış, harmonikli akım ve gerilim harmonikleri bulunmuştur [6].

Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gereklidir. Bir sistemdeki lineer elemanda akım, gerilimle uyumludur. Ancak güç sistemlerine bağlı olan dönüştürücüler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları gibi nonlineer yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin nonsinüzoidal olmasına, yani harmonik distorsiyonuna neden olabilirler. Nonlineer yüklerin güçleri düşük değerde olsa bile yine de gerilimin dalga şeklini bozarlar. Lineer ve nonlineer yüklerin akım-gerilim dalga şekilleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



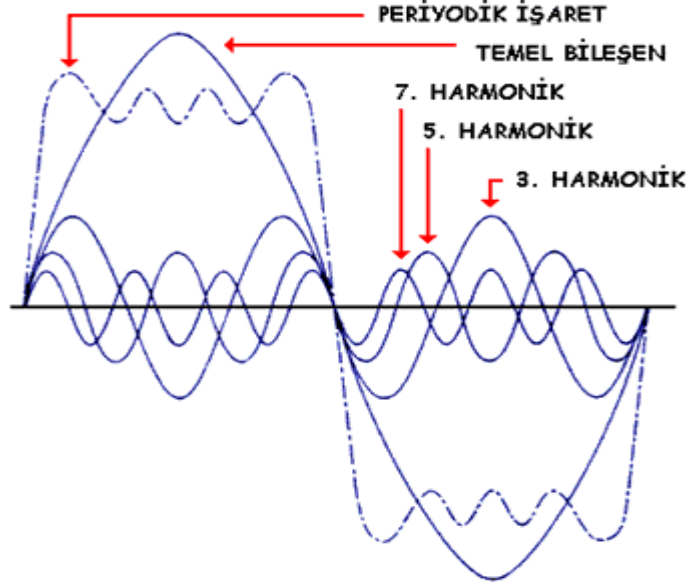
Şekil 1.1. Lineer ve nonlineer yük akım-gerilim dalga şekilleri .

Sinüzoidal gerilimli günümüz şebekelerinde, gerilim-akım karakteristiği lineer olmayan bazı yükler, şebekeden zamana göre sinüzoidal olmayan akımlar çekerler. Akımlar, şebekedeki seri empedanslar üzerinde, sinüzoidal olmayan gerilim düşümleri yaparlar. Bunun sonucunda sinüzoidal kaynak geriliminden sinüzoidal olmayan şebeke gerilim düşümlerinin çıkartılması ile oluşan alıcı uçlardaki gerilim de artık sinüzoidal olmayacaktır [3,7].

Belirli bir frekanstaki tüm periyodik dalga şekilleri kendi frekansının katlarındaki sinüs dalgalarının toplamına eşittir. Toplanarak periyodik dalgayı oluşturan sinüs dalgalarının her birine harmonik denilmektedir. Birinci harmonik analizi yapılan periyodik işaretle aynı frekanstadır ve temel bileşen olarak adlandırılır. İkinci harmonik temel bileşenin frekansının iki katıdır. Genel olarak ifade edilecek olursa n. harmoniğin frekansı temel bileşenin frekansının n katıdır. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı Çizelge 1.1’de, bu frekanslara ait şekiller Şekil 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı.

Temel Bileşen (1.Harmonik)	50Hz
2.Harmonik	100Hz
3.Harmonik	150Hz
4.Harmonik	200Hz
5.Harmonik	250Hz
6.Harmonik	300Hz



Şekil 1.2. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin şekilleri.

Harmonik bozunum elektriksel kirliliğin bir ifadesidir. Harmonik bozunumların toplamının (THD) belirli sınırların üzerinde olması bazı elektriksel problemlere neden olmaktadır. Örnek olarak akım harmoniklerinin yüksek olması kabloların aşırı ısınmasına ve zarar görmesine neden olabilir. Elektrik motorlarında da aşırı ısınmaya, gürültülü çalışmaya ve tork salınımlarına neden olmaktadır. Kapasitörlerde de aşırı ısınmaya, bunun sonucu dielektrik denem birbirinden yalıtılmış plakaların delinmesine neden olabilmektedir. Ayrıca işlemciler, elektronik göstergeler, LED'ler harmonik bozunumlardan etkilenmektedir [7, 8, 9].

Gerilim ve akımda meydana gelen harmonik bozunumlarının (THD) kaynağı non-linear yüklerdir. Non-linear yükler arasında KGK'lar, motor yol vericileri, motor sürücüleri, bilgisayarlar ve elektronik aydınlatma ve kaynak makineleri vardır. Ayrıca tüm güç elektroniği dönüştürücüleri şebekedeki harmonik bozunumu artırıcı etki gösterirler.

Bir işaretin harmonik bozunumunun matematiksel ifadesi

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

I_n = n. harmoniğin RMS değeri, I_F = İşaretin temel bileşeninin RMS değeri olmak üzere

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \quad (1.1)$$

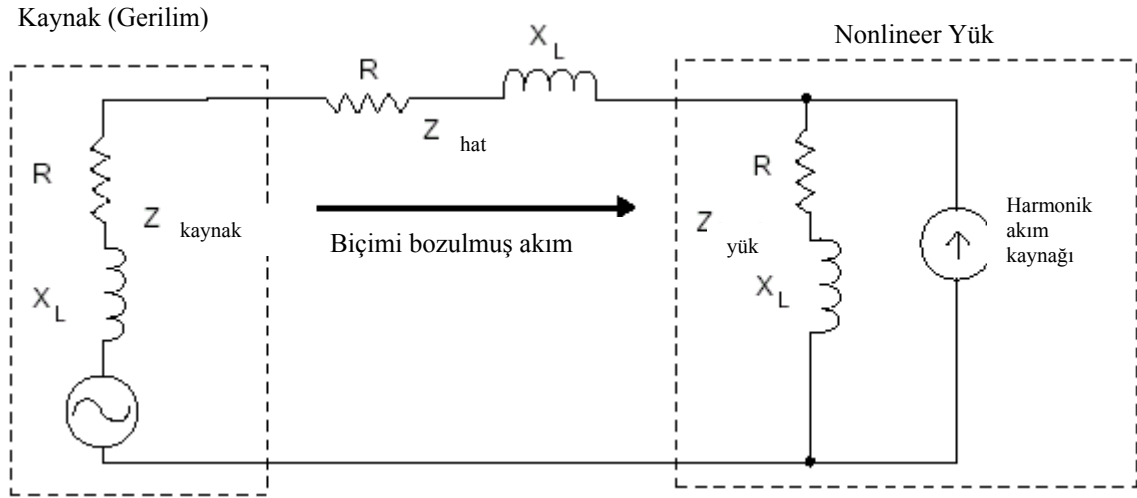
şeklinde hesaplanabilir.

Toplam harmonik bozunumun yüzde olarak ifadesi

$$THD(\%) = \frac{I_H}{I_F} \cdot 100 \quad (1.2)$$

olur.

Zamana göre değişen ve sinüzoidal olmayan bu gerilimler harmonikli gerilimler olarak adlandırılır. Kısaca harmonikler; bazı tüketiciler ve bağlantı elemanlarının doğrusal olmayan karakteristikleri dolayısıyla şebekeden sinüs biçiminde olmayan akımlar çekmesiyle oluşan akım ve gerilim bozulmalarıdır. Kaynak hattında mevcut olan empedans, lineer olmayan yük tarafındaki harmonik akım ve gerilimlerinin dağıtım sistemine geri dönmesinde etkindir. Bu ilişki Şekil 1.3'te gösterilmiştir [9,10].



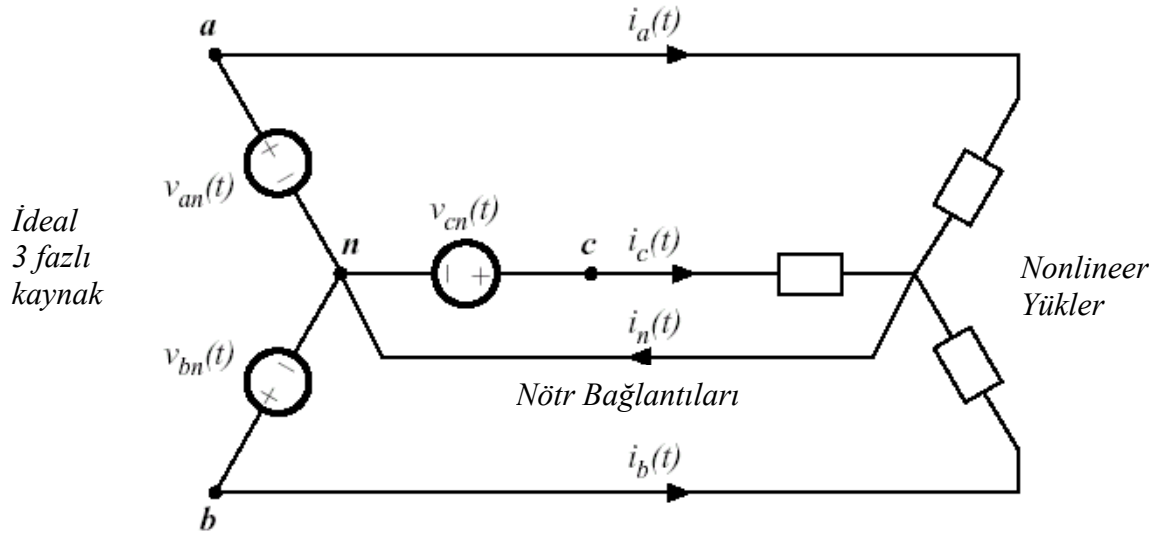
Şekil 1.3. Nonlineer yük ve güç kaynağı modeli.

Harmonikler modern elektronik ürünleridir. Bilgisayarlar, kesintisiz güç kaynakları, değişken frekanslı sürücüler ve AC-DC dönüştürücülerin hepsi birer harmonik kaynağıdır. Bilgisayarlar gibi tek fazlı lineer olmayan yükler 3., 5., 7., 9., ... gibi tek harmonikleri oluştururlar. Tek fazlı elektronik cihazlar için hata harmonikleri 3 ve 3'ün katı olan harmoniklerdir. Bu harmoniklere üçüller denir çünkü A, B ve C faz harmonikleri birbirini etkilemektedir. Bu harmonikler 3 fazlı 4 iletkenli bir sistemin nötr

iletkenine ihmal edilemeyecek kadar ek bir yük uygular. Bunun sonucunda eğer bu tip bir yük için uygun seçilmemişse, nötr iletkenine aşırı yüklenme olur. Öte yandan 3-fazlı DC sürücüler gibi 3 fazlı lineer olmayan yükler akım üçül harmoniklerini oluşturmazlar. Bu tip yükler öncelikle 5. ve 7. harmonikleri oluştururlar. Küçük bir kısım 11., 13. ve daha büyük dereceli harmonikleri oluşturur. 3 fazlı 4 telli bir sistemde harmonik akımları Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Bu sisteme göre harmonikli nötr akımı

$$i_n(t) = 3I_0 + \sum_{k=3,6,9,\dots}^{\infty} 3I_k \cos(k\omega t - \theta_k) \quad (1.3)$$

biçiminde olacaktır.



Şekil 1.4. Üç Fazlı 4 Telli bir sistemde harmonik akımları ve nötr bağlantısı [8].

Enerji iletim hatlarında alternatif akımla güç iletiminde akım ve gerilimin sinüs biçiminden uzaklaşması ile ortaya çıkan harmoniklere bağlı olarak ek kayıplar meydana gelmektedir. Pratikte gerilim şeklinin az bozulmasına karşın, akımlarda belirgin harmonikler ortaya çıkmaktadır. Bu akım harmoniklerinin değerce büyümesi, enerji iletim sistemlerindeki yalıtım koordinasyonu ile bağlantı elemanlarının güç seviyesi üzerinde olumsuz etki yapmakta, ilgili elemanların aşırı ısınmasına yol açmakta ve tesisin işletme maliyetini yükseltmektedir [8].

Fliker ise yüklerdeki dalgalanmalar nedeniyle ortaya çıkan ve aydınlatma armatürlerinde kıpraşmaya yol açabilen 50 Hz altındaki gerilim salınımlarıdır. Harmonik etkilerinden dolayı iletim sistemine bağlı tesis, teçhizat ve bağlantı elemanları, harmonik içerik bakımından Ek-1'de verilen çizelgedeki değerlere uygun olarak tasarlanır.

1.1. Nonlinear Elemanların Tanımı

İki uçlu bir nonlinear elemanın ya da yükün tanımı çeşitli şekillerde yapılabilir. En çok kullanılan tanım, elemana adını veren nonlinear özelliğinden dolayı yapılır. Buna göre uç karakteristiği yani akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan elemana nonlinear (doğrusal olmayan) eleman, bu elemanların oluşturduğu devrelere de nonlinear devre denir. Nonlinear devre, içinde nonlinear elemanların bulunduğu devre olabileceği gibi; en az bir elemanı nonlinear diğerleri lineer olan elemanların oluşturduğu devre de olabilir. Nonlinear bir elemanın akım-gerilim arasındaki ilişkisi çoğu devreler için

$$i = a + bU + cU^2 + dU^3 + \dots \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada i , nonlinear elemanın akımı, U ise gerilimidir. Eşitlikteki a , b , c ve d katsayılarıdır. Bu sabit değerler her eleman için farklı değerlere sahip olup elemanların bazılarında bulunabilir, bazılarında ise bulunmayabilirler. Nonlinear elemanlara; demir çekirdekli bobinler, diyot, transistör, tristör gibi yarıiletken malzemeler içeren elemanlar, ark fırınları, dönüştürücüler, kaynak makineleri örnek verilebilir. Besleme kaynağının dışındaki harmonikler genel olarak manyetik ve elektrik devrenin lineersizliğinden kaynaklanmaktadır.

Bazı elemanların gerilimi ile akımı aynı oranda değişmez. Bu, elektrik devresinin lineer olmaması demektir. Devredeki elektrik lineersizlik harmonik bileşenler meydana getirecektir. Elektrik enerji sistemlerinde nonsinüzoidal işaretlerin ortaya çıkması, besleme kaynağının ve devre parametrelerinin karakteristikleri ile yakından bağlantılıdır. Besleme geriliminin nonsinüzoidal olması veya yükün nonlinear olması durumunda nonsinüzoidal (harmonikli) akım ve gerilim meydana gelir. Nonlinear elemanlardaki lineersizlik devre uç karakteristiğinden veya manyetik malzemenin lineersizliğinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 1.2'de kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonikli bileşenler gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler [1].

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	Açıklama
Sinüzoidal	Lineer	-	-	Harmonik bileşenler yok
Sinüzoidal	Nonlineer	-	Var	Yük nedeniyle akımda harmonikler oluşur
Nonsinüzoidal	Lineer	Var	Var	Gerilim ile aynı harmonik bileşenleri bulunur
Nonsinüzoidal	Nonlineer	Var	Var	Aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir

2. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT KAVRAMLAR

2.1. Nonsinüzoidal Durumda Elektrik Büyüklükleri

Bir fazlı sistemlerde ani güç, gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımına eşittir.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.1)$$

Gerilim ve akımın ani değerleri

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.3)$$

olduğu varsayıldığında ani güç ifadesi

$$\begin{aligned} p &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = VI \cos \varphi - VI \cos(2\omega t - \varphi) \\ &= P - P \cos(2\omega t) - Q \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

olur.

Burada

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.5)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır.

Harmonik içeren gerilimin en genel durumda

$$v(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{2}V_m \cos(m\omega t + \alpha_m) \quad (2.7)$$

şeklinde olduğu ve harmonik içeren akımın da

$$i(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (2.8)$$

olduğu kabul edilirse ani güç

$$p(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 2V_m I_n \cos(m\omega t + \alpha_m) \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (2.9)$$

biçiminde yazılabilir.

Bu eşitlik düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} p(t) &= \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m (1 + \cos(2m\omega t + 2\alpha_m)) - V_m I_m \sin \theta_m \sin(2m\omega t + 2\alpha_m) + \\ &\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ m \neq n}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n \{ \cos((m-n)\omega t + (\alpha_m - \alpha_n)) + \cos((m+n)\omega t + (\alpha_m + \alpha_n)) \} - \\ &\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ m \neq n}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n \{ \sin((m+n)\omega t + (\alpha_m + \alpha_n)) - \sin((m-n)\omega t + (\alpha_m - \alpha_n)) \} \end{aligned} \quad (2.10)$$

elde edilir. Bu eşitliklerden de görüldüğü gibi gerilim ve akımın harmonik içermesi durumunda ani güçte dört bileşen ortaya çıkmaktadır.

Bileşenlerden biri doğru bileşen olup, diğerleri şebeke frekansının iki katı frekansta salınan bileşenlerden oluşmaktadır. Ani güç ifadesinin ortalama değeri alınırsa

$$P = \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m \quad (2.11)$$

elde edilir. Ani gücün ortalaması sonucunda elde edilen değer ile her bir harmoniğin ortalama güçlerinin toplamı aynıdır. Dolayısıyla harmonikler ortalama (aktif) gücün hesabına etki etmemektedir.

2.2. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akım için sırasıyla

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.12)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Toplam harmonik distorsiyonunun gerilim için diğer ifadeleri

$$THD = \frac{[V^2 - V_1^2]^{1/2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD = \frac{[I^2 - I_1^2]^{1/2}}{I_1} \quad (2.13)$$

ve benzer şekilde, n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekli harmonik distorsiyonları sırasıyla

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad \text{ve} \quad HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.14)$$

olarak tanımlanır.

2.3. Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.15)$$

Burada I_L yük tarafından besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır. 12 ay öncesinden başlanarak hesaplamanın yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.

2.4. Şekil (Form) Faktörü

Nonsinüzoidal bir dalga için şekil faktörü

$$k_f = \text{Efektif Değer} / \text{Ortalama Değer}$$

olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüzoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verecek olan bu faktör, sinüzoidal bir dalga için 1.11 ' e eşittir.

2.5. Tepe Faktörü

Bu faktör, nonsinüzoidal akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör

$$\text{Tepe Faktörü} = \text{Tepe Değer} / \text{Temel Bileşenin Efektif Değeri}$$

eşitliği ile hesaplanır. Sinüzoidal bir dalga için bu değer, $\sqrt{2}$ dir.

2.6. Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin belirlenmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri, telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Bu büyüklük gerilim için

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n V_n)^2}}{V_{ef}} \quad (2.16)$$

ve akım için

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (2.17)$$

şeklinde bulunur. Burada w_n , n'inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini yapılan hesaba katan bir katsayıdır.

2.7. Transformatör K-Faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. Standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde meydana gelen düşüşlerin belirlenmesinde kullanılan bir büyüklüktür. Bu değer anma gücü 500 kVA'nın altında olan transformatörler için tanımlanmıştır. Diğer bir deyişle, transformatör K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır.

Nonlinear yükleri besleyen bir transformatör için K-Faktörü

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (2.18)$$

olarak tanımlanır. Transformatörün efektif akımına göre normlaştırıldığında, K-Faktörü

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot I_n)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot I_n)^2}{I^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\left(\frac{I}{I_1} \right)^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{1 + THD_I^2} \quad (2.19)$$

şeklini alır. Burada I efektif akımı, I_n n. harmonik bileşen akımını belirtmektedir.

2.8. Distorsiyon Güç Faktörü

Harmonikler içeren gerilim ve akımın efektif değerleri

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (2.20)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (2.21)$$

olarak ifade edilebilir. Aynı şekilde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonu değerleriyle

$$pf_{toplam} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (2.22)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik aynı zamanda

$$pf_{toplam} = \cos(\theta_1 - \delta_1) pf_{dist.} \quad (2.23)$$

ifadesi ile de verilebilir. Burada ilk terim ($\cos(\theta_1 - \delta_1)$), kayma güç faktörü, ikinci terim ($pf_{dist.}$) distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Kayma güç faktörü 1'den büyük olamaz.

Bu sebeple

$$pf_{toplam} \leq pf_{dist.} \quad (2.24)$$

olacaktır. Yüksek akım distorsiyonlu tek faz nonlineer yükler için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonansa neden olma olasılığından ötürü bu gibi yükler için güç faktörü düzeltici elemanlar kullanılmalıdır. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu da nonlineer yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır.

3. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLARIN TANIMLANMASI

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Bunların başında lineer olmayan manyetik ve elektrik devreleri gelir. Jeneratör, transformatör ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlarda aşırı akı yoğunluğundan dolayı doymanın meydana gelmesi, demir çekirdeğin lineer olmayan manyetik devreye dönüşmesi anlamına gelir. Ark fırınlarında olduğu gibi normal işletme gereği bir arkın oluşması veya yarıiletken kullanılarak sinüzoidal gerilimin şeklinin değiştirilmesi ise elektrik devrelerinin nonlinear çalışmasına örnek verilebilir. Eğer lineer olmayan devre jeneratörün manyetik devresi ise jeneratörün ürettiği gerilim sinüzoidal olmaması nedeniyle harmonikli olacaktır. Eğer lineer olmayan devre transformatöre ait ise sekonder tarafına bağlanan kullanıcının gerilimi de harmonikli olacaktır. Eğer kullanıcının manyetik ya da elektrik devresi lineer fakat bu kullanıcıyı besleyen gerilim sinüzoidal değil ise, bu kullanıcının çektiği akım da harmonikli olacaktır. Kullanıcıyı besleyen gerilim sinüzoidal ve kullanıcı yükünün karakteristiği lineer değilse, kullanıcının şebekeden çektiği akım harmonikli olacaktır. Bilgisayar modellemesi yapılırken böyle bir yüke ait harmonikli akımın iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağında üretildiği kabul edilir. Sonuç olarak harmonik, jeneratörde olduğu gibi ya kaynak tarafındaki harmonikli gerilim etkisinden ya da kullanıcının, örneğin yarıiletken devre içeren, lineer olmayan bir devreye sahip olmasından dolayı meydana gelir [11,12].

3.1. Harmonik Kaynakları

Yukarıda da belirtildiği gibi gerilim ve akımın sinüs dalga şeklinden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, akım-gerilim karakteristiği düzgün olmayan ve harmonik kaynağı olarak adlandırılan elemanlar tarafından üretilmektedir. Bir güç sisteminin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve daha temel tanımlama yapılabilmesi için sistemdeki harmonik kaynakları;

- 1- Küçük güçlü nonlinear elemanlar
- 2- Büyük güçlü, karakteristiği sürekli değişen nonlinear yükler
- 3- İletim sistemlerindeki büyük güçlü güç elektroniği elemanları

olarak üç grupta incelenebilir. Birinci gruptaki harmonik kaynaklarının çoğu alçak gerilim cihazlarının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynaklarında bulunan doğrultuculardır. Güçleri düşük olmasına rağmen sistemde fazla sayıda bulunmaları

harmonik etkilerini önemli ölçüde arttırmaktadır. İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının en önemlilerinden biri filtre sistemiyle donatılmamış, yüksek güçlü ark fırınlarıdır. Bu elemanların empedansları zamana göre rasgele değişim gösterdiğinden sisteme gönderdikleri harmonik akımları düzensizdir. Üçüncü grupta ise yüksek güçlü dönüştürücüler öne çıkmaktadır. Dönüştürücünün çalışması sırasında ortaya çıkan harmonik bileşenler enerji sistemine olumsuz etki yapmaktadır. Harmonik meydana getiren elemanlar genel olarak ; dönüştürücüler, jeneratörler, yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar, jeneratörler, motorlar, senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler, transformatörler, gaz boşalmalı aydınlatma elemanları, bilgisayarlar, elektronik balastlar, kesintisiz güç kaynakları, anahtarlamalı güç kaynakları, kaynak makineleri, kontrol devreleri, frekans dönüştürücüler, statik kompanzatörler, ark fırınları, yüksek gerilimli enerji iletim sistemleri ve elektrik ulaşım sistemleri olarak verilebilir [8, 13,14].

Yukarıda sıralanan kaynaklardan bazıları aşağıda incelenmiştir.

3.1.1. Bilgisayarlar

Bilgisayar sistemleri hassas yüklerdir. Ancak yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer etki kaynağıdır. Sahip oldukları nonlineer karakteristikler nedeniyle güç sistemlerinde gerilim düşümlerine neden olabilmektedirler.

3.1.2. Statik kompanzatörler

Reaktif güç kontrolü için kullanılan statik VAR kompanzatörleri, içerdikleri nonlineer elemanlar nedeniyle lineer olmayan uç karakteristiklerine sahiptirler. Bu nedenle de bağlı oldukları güç sisteminde nonsinüzoidal büyüklükler oluştururlar. Bu nonsinüzoidal büyüklüklerin içerdikleri harmoniklerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir.

3.1.3. Ark fırınları

Güçleri MW seviyesinde olan ve elektrik ark oluşumu esasına dayalı olan ark fırınları, elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonik üretirler. Ark olayının başlamasıyla ark gerilimi azalırken ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görünür. Ark fırınlarının empedansının dengesiz olması, sisteme gönderilen harmoniklerin akımlarının da dengesiz olmasına

neden olur. Harmoniklerin rasgele değişim göstermesi ark fırınlarının modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalarda tipik bir ark fırınında 2,3,...9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşenin temel bileşenin % 30'u kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2,3,4 ve 5 seviyesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında, 6,7,8,9 ve 10 seviyesindeki harmoniklerin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'ü ile %1.3'ü arasında dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

3.1.4. Jeneratörler

En doğal harmonik üreticileridir. Senkron jeneratörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınarak gerilim eğrisinin sinüzoidal olması sağlanır. Jeneratör gücünün 1000 kVA'dan küçük olması durumunda senkron jeneratörlerin oluşturduğu harmonikler dikkate alınmazlar. Jeneratör bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar. Eğer jeneratör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunurlar. Fazlar arası gerilimlerde ise bulunmazlar. Eğer yıldız bağlı jeneratöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası jeneratörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Bu sebeplerden dolayı, jeneratör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Jeneratörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katı harmonik akımları, jeneratörde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir.

3.1.5. Dönüştürücüler

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarıdır. Üç fazlı dönüştürücüler, dönüştürücü transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır.

Genel olarak dönüştürücülerin ürettikleri harmonik bileşenler $n=k.p\pm 1$ ile ifade edilir. Burada $k = 1,2,3,\dots$ olmak üzere tamsayıları, $p = 6,12,\dots$ olmak üzere darbe sayısını belirtmektedir. Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir.

Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan dönüştürücünün bir fazına ait hat akımının ani değeri

$$i(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada I_d , doğrultucu tarafındaki akımı ifade etmektedir.

Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması halinde ise dönüştürücünün bir fazına ait hat akımının ani değeri

$$i(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Görüldüğü gibi 6 darbeleri dönüştürücüde 5.,7.,11.,13.,17.,19.,... harmonik bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Harmonik seviyesi arttıkça her bir harmonik bileşenin genliği azalmaktadır. Aynı zamanda yıldız/üçgen bağlı durumda 5., 7., 17., 19., ... seviyesindeki harmonikler, yıldız/yıldız bağlı transformatörlü dönüştürücünün ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır.

3.1.6. Transformatörler

Enerji sistemlerinin en önemli elemanlarından olan transformatörler de harmoniklere neden olurlar. Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün doymasından kaynaklanmaktadır. Devresinde demir çekirdek bulunan elemanlarda akım-gerilim ilişkisi lineer değildir. Bunun nedeni demir çekirdekte doymanın meydana gelmesidir. Transformatör bağlantıları, farklı harmoniklerin gerileyen veya ilerleyen yöndeki faz sırasına neden olması veya bazılarını elimine etmesi ile akım dalgasının şeklini etkileyebilir. Çizelge 3.1’de harmonik derecesine göre dizi tipleri verilmiştir. Bu dizi tipleri dönen makinelerde meydana gelen momentin yönünü etkilemektedir.

Çizelge 3.1. Harmonik dereceleri ve bunların dizi tipleri [8].

Harmonik Derecesi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dizi Tipi	(+)	(-)	(0)	(+)	(-)	(0)	(+)	(-)	(0)	(+)	(-)	(0)

Jeneratör, hat ve transformatörden meydana gelen bir güç sistemlerinde harmonik akımları; jeneratör reaktansı, transformatörün primer reaktansı ve hattın reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir. Jeneratörde sinüs şeklinde gerilim üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilimin dalga şekli bozulabilir.

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi transformatör bağlantı grubuna, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmamasına ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır. Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenlerinin dışındaki diğer harmonik bileşenler, aralarındaki 120^0 'lik faz farkı nedeniyle yıldız noktasında toplanarak sıfır edecektir. Bu durumda her bir faz sargısında endüktif gerilim sinüs şeklindedir. Akı sinüzoidal ve mıknatıslanma akımı nonsinüzoidal olacaktır. Primerin yıldız noktası topraklanmamış olan transformatörlerde ise 3 ve 3'ün katı harmonikler şebekeye geçemez, 5., 7., 11., 13. harmonik akımlarının toplamı, yıldız noktasında sıfır olur. Primeri üçgen bağlı transformatörlerde sinüzoidal beslenen her sargı bağımsız gibidir. Faz sargılarındaki mıknatıslanma akımlarında 3 ve 3'ün katı harmonikler meydana gelir. Bu harmonikler üçgen sargıdan dışarı çıkamazlar. Bu yüzden mıknatıslanma akımı için şebekeden 3 ve 3'ün katı harmonikler çekilmez. Fakat 1., 5., 7., ... harmonikler çekilir. Manyetik akı 3 ve 3'ün katı harmonikleri içermez. Sonuç olarak;

- Transformatörler primeri ve sekonderi nasıl bağlanırsa bağlansın, primer ve sekonderin yıldız noktası nötre bağlansın veya bağlanmasın, çekirdek tipi nasıl olursa olsun şebekelerden 1, 5, 7, 11, 13 harmoniklerini daima çekerler
- Şebekelerde 3 ve 3'ün katı harmonikleri önlemek için primer yıldız topraklanmaz veya sargılardan biri üçgen bağlanır.
- Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun 3 ve 3'ün katı harmonik akımları dengesizlik nedeniyle şebekeye geçer.

4. HARMONİK Lİ BİR SİSTEMDE AKIM VE GERİLİM KALİTESİNİN BELİRLENMESİ ve HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER

Doğru akım ile çalışan elektrikli cihazların besleme devresine alternatif akım bileşeninin ulaşması istenmez. Aynı şekilde 50 Hz ile çalışan cihazlara 50 Hz dışındaki frekanslarda bir gerilimin ulaşması da istenen bir durum değildir. Tüketicilerin kullandığı cihazları besleyen gerilimin kalitesi cihazın verimini ve cihaz ömrünü doğrudan etkiler.

Güç sistemlerindeki elemanların harmonik domenindeki modellerine

- harmonik üreten yüklerin lineer yüklere ve güç sistemlerine etkisini tahmin edilmesi,
- rezonans frekansındaki akım ve gerilim değerlerinin hesaplanması,
- güç sistemindeki elemanlara ait harmonik indislerini hesaplanması,
- güç akışı hesaplamalarında kullanılması,
- reaktif güç kompanzasyonu kapasitesi ve harmonik filtrelerinin büyüklüklerinin belirlenmesi

gibi işlemleri yapmak için ihtiyaç duyulur. Harmonik problemlerinin en aza indirilebilmesi, güç sistemlerinin kesintisiz ve güvenli çalışmaları için harmonik üreten yüklerin doğru şekilde modellenmesi büyük önem taşır [11, 12, 15].

Bu sebeple elektrikli cihazların besleme gerilimleri ile ilgili standartlar geliştirilmiş, bu standartlar için bir takım büyüklükler tanımlanmıştır. Eğer cihaz doğru gerilim ile besleniyorsa, tanımlanan büyüklüklerden bir tanesi “ λ dalgalılık katsayısı”dır. Bu katsayı

$$\lambda = \frac{\sqrt{V^2 - V_0^2}}{V_0} = \sqrt{\frac{V^2}{V_0^2} - 1} \quad (4.1)$$

olup gerilim dalga şeklinin düzgün gerilimden olan uzaklığını gösteren bir ölçüdür. Burada kullanılan V değeri

$$V = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (4.2)$$

dır.

Doğru gerilim ile beslenen cihazlar için besleme geriliminin kalitesini ölçen diğer bir katsayı “*şekil katsayısı*”dır. Bu katsayı

$$F = \frac{V}{V_0} \quad (4.3)$$

eşitliği ile verilir. F değeri küçüldükçe gerilim kalitesi artar.

Alternatif gerilim ile beslenen cihazlar için besleme gerilimi kalitesi “*distorsiyon (bozulma) faktörü*” ile ölçülür.

Bozulma faktörü

$$DF = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (4.4)$$

olup harmonik içeren alternatif gerilim içinde ana harmonik (birinci harmonik) dışında kalan harmoniklerin ana harmoniğe olan oranını ölçen bir büyüklüktür. Eğer besleme gerilimi doğru bileşen içermiyorsa ($V_0 = 0$ durumu) bu durumda ifade

$$DF = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} \quad (4.5)$$

olarak da yazılabilir.

Güç sistemlerinin harmonik domeninde analizleri için yaygın şekilde kullanılan modelleme ve çözüm algoritmasına göre değişen birçok metot bulunmaktadır. Bu analiz metotlarının en önemlilerinden biri “*Frekans Tarama*” metodudur. Diğer analiz metotlarıyla karşılaştırıldığında daha az veri gerektirmesi frekans tarama metodunu kolayca uygulanabilir hale getirmiştir. Bu metodun dezavantajı ise ancak tipik harmonik karakteristiğine sahip yüklere uygulanabilir olmasıdır. Frekans tarama metodu, harmonik üreten yükün özelliğine göre iki farklı biçimde kullanılmaktadır.

Bunlardan biri, harmonikli yükün bulunduğu düğüme akım kaynağı bağlanıp sistemdeki harmonik gerilimlerinin

$$[Y_h][V_h] = [I_h] \quad (4.6)$$

ifadesinden hesaplanmasıdır. Bu denklemde Y_h ; h. harmoniğe ait admittans matrisi, V_h ; düğüm gerilimler matrisi ve I_h ; akım kaynakları vektörüdür.

“*Gerilim Transfer Fonksiyonu*” olarak da adlandırılan ikinci tip frekans tarama metodunda ise harmonik üreten yükün bulunduğu düğüme gerilim kaynağı bağlanıp (4.6) denklemi her harmonik için çözülür. Bu tip analiz genelde, her barada meydana gelen harmonik gerilimlerinin etkilerinin araştırılmasında kullanılır. Frekans tarama metodu, harmonik üreten cihazların tam olarak yüklenmediği veya aşırı yüklendiği durumlarda, dengesizlik durumlarında, tipik olmayan harmonik spektrumuna sahip yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde yeterli değildir [8].

Bunlarla birlikte bu metotta, harmonik üreten yükün gerilim bağımlılığı özelliği de dikkate alınmamaktadır. Harmonik üreten yüklerin gerilim bağımlılığının hesap edilmesi gerekliliği, “*Harmonik İterasyon*” metodunu ortaya çıkarmıştır.

Bu metotta, harmonik üreten cihazlar kaynak gerilimine bağımlı akım kaynağı olarak

$$I_h = F(V_1, V_2, \dots, V_h, c) \quad ; \quad h = 1, \dots, h \quad (4.7)$$

biçiminde, c kontrol değişkenine ve gerilim harmoniklerine bağılı olarak modellenmektedir. Buna göre, tahmin edilen kaynak gerilimi için (4.7) denklemi bir kez çözülür.

Daha sonra harmonik akım kaynağının spektrumu yeterli doğruluğa ulaşıncaya kadar (4.6) ve (4.7) denklemleri iteratif olarak çözülür. Harmonik iterasyon metodu kullanılırken rezonans durumlarında iraksama problemi ortaya çıkabilir.

Diğer bir iteratif metotta ise gerilim bağımlı harmonik üreten cihazlar, Newton tipi algoritma aracılığıyla (4.6) ve (4.7) denklemleri eşzamanlı olarak çözümlenerek analiz edilir.

Bu metodun en önemli zorluğu birçok harmonik üreten cihaz için türevi alınabilir kapalı form ifadeler gerektirmesidir.

Son zamanlarda, sistemdeki olası değişimlerde daha doğru sonuçların elde edilebildiği “*Norton Model*” kullanılarak harmonik analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu metotta harmonik üreten yükler Norton akım kaynağı ve bu kaynağa paralel bağılı norton empedansından oluşan bir eşdeğer devre biçiminde modellenmiştir [16].

Harmoniksiz akım ve gerilimlerin bulunduğu bir elektrik enerji sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistemdir. Güç elektroniği ve nonlineer elemanların yaygın kullanılması, güç sistemlerine dahil edilen harmonik akımlarında artışa neden olmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerden dolayı gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açar. Gerilim düşümünün artması, güç üretiminde ve iletiminde verimin düşmesi, sistem elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması, jeneratör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması, kompanzasyon tesislerinin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri nedeniyle aşırı yüklenip zarar görmeleri, kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi, koruma sistemlerinin hatalı çalışması, yalıtım malzemesi delinmeleri, mikroişlemcilerin hatalı çalışmaları, ses ve görüntü araçlarının parazitli

çalışması, elektrikli cihazların ömrünün kısılması, başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması sayılabilecek bazı problemlerdir. Harmoniklerin etkisi, boşa çalışmada ve düşük yüklerde, şebekelerin tam yüklenmesi haline göre daha büyüktür.

Güç sistemlerinde oluşan harmonikler, motorlar, jeneratörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara yol açarlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistemi elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına neden olabilir. Harmoniklerin bazı sistem elemanlarına olan etkileri aşağıda incelenmiştir.

4.1. Transformatörler üzerindeki etkileri

Harmonikler, transformatörlerdeki ısınmayı ve kayıpları arttıran önemli bir etkidir. Akım harmonikleri kaçak akı kayıplarında ve bakır kayıplarında artışa neden olmaktadır. Gerilim harmonikleri, demir kayıplarında artışlara ve yalıtım zorlanmalarına neden olmaktadır. Bu kayıp artışları sonucunda transformatörde ek ısınma meydana gelecektir. Ayrıca harmonik bileşenler transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı bir yükün veya devre elemanının arasında rezonans meydana getirebilmektedir. Harmonik gerilim ve akımlarının neden olduğu transformatör kayıpları frekansla ilişkilidir. Frekansın artmasıyla kayıplar da artmaktadır. Harmonik bileşenlerin seviyesi arttıkça frekans değeri büyüdüğünden yüksek seviyeli harmonik bileşenler, düşük seviyeli harmonik bileşenlerden daha etkili olmaktadır.

Transformatör kayıpları yüklü ve yüksüz kayıplar olarak ayrılabilir. Yüklü kayıplar I^2R kayıpları ile kaçak akı kayıpları olarak ayrılabilir. Kaçak akı kayıpları sinüzoidal olmayan akım dalga şekli etkisi nedeniyle ek ısınmalara sebep olur. I^2R kayıpları ise ısınma nedeniyle meydana gelmektedir. Bunun nedeni dirençte oluşan artmadır. Ayrıca harmonikler sargılardaki nüve ve bağlantı noktalarındaki manyetik akıdan dolayı oluşan kaçak kayıpların da artmasına neden olurlar.

Genel olarak açıklanacak olursa, manyetik çekirdekli bir elemanda oluşacak demir kayıpları, bu elemana uygulanacak gerilim şekli ile ilgilidir. Manyetik çekirdekli bir elemana uygulanan harmonikli gerilimin N tane harmonik bileşen içermesi durumunda ani değer

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (4.8)$$

ve efektif değer

$$V = \left(\sum_{n=1}^N V_n^2 \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

olmak üzere bu elemanda oluşacak demir kayıpları

$$P_{Fe} \cong K_m V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (4.10)$$

ile ifade edilir. Burada K_m , makinenin yapısıyla ilgili bir sabittir.

Benzer şekilde

$$\beta_n = V_n / V_1 \quad (n=2,3,\dots,N) \quad (4.11)$$

şeklinde n. harmonik için tanımlanan gerilim harmoniği ifadesi kullanılarak

$$P_{Fe} \cong K_m V_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2 \right) = P_{Fe_1} + P_{Fe_H} \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Görüleceği gibi sinüzoidal gerilimin meydana getirdiği demir kaybına ilave olarak gerilim harmoniklerine bağlı kayıplar söz konusu olmaktadır.

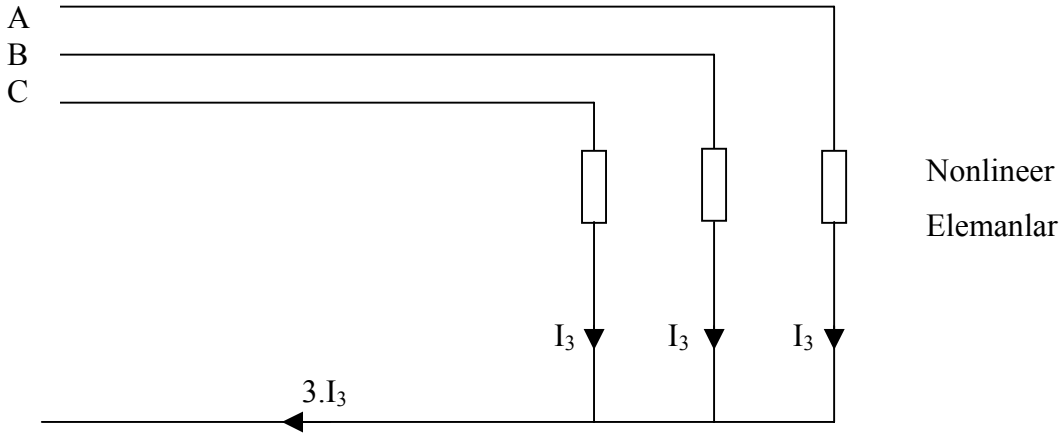
4.2. Motorlar ve jeneratörler üzerindeki etkileri

Harmonik gerilim ve akımlarının en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Bu yüzden harmonik bileşenler, döner makinelerin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüzoidal beslemeli bir motora göre daha gürültülü çalışmalarına neden olur. Motor ve jeneratör gibi elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan biridir. Her bir harmonik gerilimi (5., 7., 11., ...) makinenin statorunda bir harmonik akım indükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısısı yükselecektir. Harmonikler sebebiyle motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla bir fazlı motorlar etkilenmektedir.

4.3. İletkenler üzerindeki etkileri

Harmonik akımlar, iletkenlerde ısınmanın dolayısıyla kayıpların artmasına neden olurlar. Harmonik akımları iletkenlerde ısınmaya iki şekilde neden olurlar. Bunlardan birincisi “skin-effect” olarak bilinen akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşmasıyla etkin direncin artması sonucu oluşan ek artıştır. İkinci etki ise tek fazlı

yükleri besleyen 3 fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile oluşur. Şekil 4.1’de böyle bir sistem gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi.

Bazı nonlineer elemanlar büyük değerde 3 ve 3’ün katları harmonik bileşen üretirler. Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3 fazlı sistemlerde üçüncü seviyeden harmonikler nötr iletkeninde birbirlerinin zayıflatmaz tam tersine güçlendirirler. Harmonik seviyesi için fazlar arasında $n.120^0$ ’lik faz farkı olduğundan 3 ve 3’ün katı harmoniklerin her biri 360^0 ’lik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olurlar. Bir omik dirençte oluşacak kayıp güç, bu elemanlardan geçen akım ile ilgilidir. Omik direnci R olan bir iletkeninden geçen ve N tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i(t)_n \quad (4.13)$$

olmak üzere efektif değeri

$$I = \left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

olacaktır.

Bu durumda n. harmonik için akım harmoniği oranı

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (n=2,3,\dots,N) \quad (4.15)$$

olarak tanımlanırsa üç fazlı sistemde oluşacak omik kayıplar için

$$P_K = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 \quad (4.16)$$

yazılabilir. Burada I_n n. harmonik akımın efektif değeri, R_n ise hattın n. harmonik frekansındaki direncidir. Direncin frekansla artması ihmal edilirse kayıp güç

$$P_K = 3RI^2 = 3RI_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K_1} \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K_1} + P_{K_H} \quad (4.17)$$

formunda ifade edilebilir. Buna göre sinüzoidal akımın meydana getirdiği kayıplara ilave olan kayıpların, akım harmoniği arttıkça daha etkin olduğu söylenebilir.

4.4. Kondansatörler üzerindeki etkileri

Enerji sistemlerinde çok önemli elemanlardan olan kondansatörler harmonik bileşenlerinden oldukça etkilenirler. Harmoniklerden dolayı oluşan olumsuzluklar sistemlerde ilk olarak kondansatörlerde görülürler. Başka bir deyişle, sistemlerde harmonik bileşenlerin varlığını ilk haber veren elemanlar kondansatörlerdir.

Kondansatörler harmonik üreten elemanlar olmamakla beraber sistemde bulunan harmonik seviyelerinin etkin biçimde artmasına neden olurlar. Yüksek değerli harmonik bileşenli veya harmoniklerle distorsiyona uğramış bir gerilim, kondansatörde aşırı gerilime ve bunun sonucunda da dielektrik malzemede zorlanmalara ve arızalara neden olmaktadır. Harmonikler kondansatörlerde hem aşırı reaktif yüklenmeye, hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucu ısınmaya neden olurlar.

Harmonik distorsiyonunun mevcut olduğu durumda, güç faktörü düzelten kondansatörlerin gerilimleri izin verilen değerlerin üstüne çıkabilir. Elektrik enerji sistemlerinde simetriden dolayı tek dereceli harmonik bileşenler ($n=3, 5, 7, \dots$) bulunur. Bu şekilde harmonik bileşenler içeren bir gerilimin efektif değeri

$$V = \left[V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (4.18)$$

eşitliği ile belirlenir.

Bir kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri

$$I_n = 2\pi f_n C V_n = n\omega_1 C V_n \quad (4.19)$$

ile belirlenir. Bu eşitlikten görülebileceği gibi herhangi bir harmoniğin akımdaki oranı, gerilimdeki oranından büyük olmaktadır.

Kondansatörden geçen harmonikli bir akımın efektif değeri

$$I = \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{n=1}^N (n\omega CV_n)^2 \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

ile bulunur. Bu eşitliğe göre tek dereceli harmonik bileşenler için kondansatör akımı

$$I = \omega C \left[V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (4.21)$$

olarak hesaplanabilir.

Bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik seviyesi

$$n = \sqrt{\frac{Q_S}{Q_C}} \quad (4.22)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada Q_S sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_C ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermektedir.

Nominal olarak, Q reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan bir harmonikli gerilim durumunda reaktif güç

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n C V_n^2 \quad (4.23)$$

ile bulunur.

Kullanılan kondansatörün kayıp gücünün bulunduğu ve eşdeğer devresinde paralel R omik direncinin bulunduğu kabul edilirse, kondansatörün aktif güç kaybı

$$P_K = \sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (4.24)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $\tan \delta = R \left(\frac{1}{\omega C} \right)$ ile gösterilen ifade kayıp faktörüdür.

$\omega_n = 2\pi fn$, n . harmonik için açısal frekans, V_n ise n . harmonik geriliminin efektif değeridir.

Kondansatörler için genel olarak şu açıklamalar yapılabilir:

- Kondansatörler, bağlı olduğu sistemde gerilim yükselmesine neden olacaklarından yüklerin az bulunduğu bir zaman diliminde sistemdeki transformatörleri doyma bölgesine sokarak harmonik bileşenlerin de artmasına neden olacaktırlar. Bu nedenle kondansatörler sisteme bağlanmadan önce harmonik analizleri yapılmalı ve gerilim distorsiyonu belirlenmelidir.
- Harmonik bileşenler içeren gerilimler, kondansatörün dielektrik malzemesinin zorlanmasına ve dielektrik kayıpların artmasına neden olmaktadır.
- Harmonik derecesi arttıkça kondansatörde olumsuz etkiler artış göstermektedir. İki harmonik bileşenin temel bileşen içerisindeki yüzdesi aynı olsa bile büyük

dereceli harmonik bileşenlerin küçük dereceli harmonik bileşenlere göre oluşturacağı aşırı akım değeri ve aşırı reaktif güç değeri daha fazla olacaktır.

- Harmonik bileşenler, kondansatörün nominal şartların dışındaki çalışma değerlerine (akım, gerilim ve reaktif güç değerlerinin değişmesine) neden olmaktadır.

4.5. İletim sistemleri üzerindeki etkileri

Bir şebekedeki harmonik akımların akışı, iki temel etkiyi meydana getirmektedir. Birincisi iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde gerilim düşümü oluşturmasıdır. Akımın n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü

$$|\Delta V_n| = |I_n| \cdot |Z_n| \quad (4.25)$$

olarak ifade edilir. Harmonik akımların oluşturduğu ikinci etki ise

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (4.26)$$

formülü ile hesaplanan ek kayıplardır. Burada I_n n. harmonik bileşen akımını, R_n ise n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direncini göstermektedir.

4.6. Elektronik elemanlar üzerindeki etkileri

Güç elektroniği elemanlarının doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Bir sistemde oluşacak harmonikler, gerilimin sıfır geçişlerinin kaymasına veya bir noktadaki fazlar arası gerilimin diğer bir noktadaki fazlar arası gerilimden büyük olmasına neden olabilirler. Elektronik kontrol devrelerinin pek çok çeşidi oluşabilecek bu kayma nedeniyle yanlış işlev görebilirler. Örneğin tristör kontrollü devrelerde, harmonik distorsiyon sonucu tristörlerin ateşleme anları değişebilir.

4.7. Sigortalar üzerindeki etkileri

Enerji hatlarında meydana gelen harmonikler, devre kesiciler ve sigortaların akım kesme yeteneklerini etkilemektedir. Sigortaların çalışmasında oluşan aksaklıklar doğrudan elektro manyetik endüksiyon bobini ile ilgilidir. Açma esnasında oluşacak elektrik arkı, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürülür. Dolayısıyla bobin çalışmasında oluşacak anormallikler arkın yeniden oluşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına neden olur. Ayrıca harmonik elemanlar, devre kesiciler

ve sigortalarda ısınmayı ve kayıpları arttırır. Böylece sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Buna ek olarak akım geçişlerinde temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmekte ve akım kesme işlevi zorlaşmaktadır.

4.8. Direnç ve reaktanslar üzerindeki etkileri

Harmonik bileşenlerin seviyesi arttıkça frekans değeri de artmaktadır. Frekansın artması sonucu iletkende 'skin-effect' oluşmakta, dolayısıyla iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin sinüzoidal akımdaki R_1 temel bileşen omik direnç değerine nonsinüzoidal akım akışı durumunda her bir harmonik bileşen için R_n direnci eklenir. Birçok durumda harmonikler nedeniyle oluşan ilave direnç ihmal edilmekle beraber detaylı analizlerde hesaba katılmalıdır. Elektrik şebekelerinin ve elemanlarının modellenmesinde oldukça geniş yer tutan reaktanslar için ise şu yorumlar yapılabilir:

- Temel bileşendeki değeri X_L olan bir endüktif reaktans, n. harmonikte $X_{L_n} = n.X_L$ değerinin alır.
- Benzer şekilde, temel harmonik bileşenindeki değeri X_C olan bir kapasitif reaktans ise n. harmonikte

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \text{ değerinin almaktadır.}$$

4.9. Aydınlatma elemanları üzerindeki etkileri

Harmonik bileşenli gerilimler, floresant lambalarda duyulabilecek gürültülere ve demir kayıplarına neden olmaktadır. Akkor telli lambaların kullanım ömürleri ise oldukça kısalmaktadır. Örneğin normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimde kullanılan bir akkor lambanın ömrü %50 oranında azalmaktadır.

4.10. Ölçü aletleri üzerindeki etkileri

Yüksek mertebeli harmonik bileşenler sistemleri rezonansa soktuklarından ölçü aletlerini olumsuz etkilemektedir. Harmonik bozulmanın neden olduğu faz dengesizliği sayaç gibi endüksiyon disk aletlerinde hatalı çalışmaya neden olurlar. Akım ve gerilim dalga şekillerinin değişmiş olduğu bir durumda endüksiyon disk sayaçları %20 civarında hatalı çalışmaktadır. Aynı şekilde etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve amperetreler harmoniklerin mevcut olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir.

4.11. Güç faktörü üzerindeki etkileri

Aktif güç P, görünür güç S olmak üzere bir devredeki güç faktörü

$$GF = P/S \quad (4.27)$$

ile ifade edilmektedir. Güç faktörü düzeltilmesindeki amaç, devreden çekilen aktif gücün devredeki elemanların yüklenmesine esas olan görünür güç değerine yaklaştırmaktır. Hatta birbirine eşit olması durumunda güç faktörü 1 değerini alacaktır. Genel olarak harmonikli akım ve gerilimin devrede dolaşması durumunda güç faktörü, harmoniksiz duruma göre değişecektir. Güç faktörü değişiminde en çok karşılaşılan durum sinüzoidal bir şebekeye nonsinüzoidal bir eleman bağlanması sonucu oluşan durumdur. Sinüzoidal bir şebekeye nonsinüzoidal bir eleman bağlanması durumunda çekilecek harmonik akımlar sebebiyle güç faktörü

$$GF = \frac{VI_1 \cos \varphi}{V \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2}} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi \quad (4.28)$$

olarak bulunur. Burada birinci ifade akımın bozulma faktörü, ikinci ifade ise kayma faktörü olarak adlandırılır. Birinci terim daima 1'den küçük olduğundan güç faktörü sinüzoidal durumdaki $\cos \varphi$ değerinden daha düşük bir değer olacaktır. Buradan da anlaşılacağı gibi sistemde mevcut bulunabilecek harmonik bileşenler güç faktöründe düşüslere neden olacaktır.

4.12. Harmoniklerin Rezonans Etkisi

Bir elektrik devresinde, endüktif reaktans ve kapasitif reaktans değerlerinin eşitliği sonucu rezonans meydana gelir. Telsiz ve radyo gibi bazı cihazların çalışması rezonans oluşması prensibine göre olmasına karşın enerji sisteminde rezonans oluşması sistemde aşırı gerilim ve akım gibi bazı problemlere ve enerji akışının kesilmesine neden olabilmektedir. R,L,C elemanlarından oluşan bir devrede kaynak tarafından sağlanan gerilim ve akım aynı fazda yani L ve C elemanları olmasına rağmen sistem omik yüklü ise bu devredeki L ve C elemanları rezonans halindedir.

Bu durum bir seri RLC devresinde oluşuyorsa seri rezonans, paralel RLC devresinde oluşuyorsa paralel rezonans adını alır.

Seri rezonans durumunda devre empedansı düşüktür ve devreye düşük genlikli bir gerilim uygulansa bile devreden yüksek genlikli rezonans akımları akacaktır. Seri R,L,C elemanlarından meydana gelen devrede empedans ifadesi

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L - X_C) \quad (4.29)$$

şeklindedir.

Kaynak gerilimine ait açısal frekans ω olmak üzere eğer devrede

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (4.30)$$

ise

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (4.31)$$

olur.

Rezonans meydana geldiğinde

$$X_{L_r} = X_{C_r} \Rightarrow \frac{1}{\omega_r C} = \omega_r L \quad (4.32)$$

buna göre rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f}{\omega\sqrt{LC}} = f \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.33)$$

olur.

Seri R,L,C devresine harmonik içeren bir V_n gerilimi uygulandığında devreden harmonikli bir akım geçer. Bu durumda devre her bir harmonik mertebesi için ayrı ayrı incelenir ve sonuç süper pozisyon yöntemiyle elde edilir. Harmonikli durumda devre elemanları

$$R_n = R_0 + R \quad (4.34)$$

$$X_{L_n} = nX_L \quad (4.35)$$

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (4.36)$$

olarak tanımlanır.

Harmonik bileşenlerin göz önünde bulundurulması halinde temel frekansta eşdeğer empedans

$$Z_n = R_n + j(X_{L_n} - X_{C_n}) = R + j(nX_L - \frac{X_C}{n}) \quad (4.37)$$

biçiminde ifade edilir.

Seri rezonans esnasında derenin empedansı sadece dirençten oluşur. Seri rezonans devresi bir harmonik bileşenin filtrelenmesinde kullanılır. Filtreler için tanımlanan kalite faktörü

$$Q = \frac{X_r}{R} \quad (4.38)$$

dır.

Paralel rezonans durumunda devrede empedans çok büyüktür ve devreye düşük genlikli bir akım uygulansa bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli, tehlikeli rezonans gerilimleri meydana gelir.

Paralel R,L,C devresi için devre empedansı

$$Z = \frac{-jRX_LX_C}{R(X_L - X_C) - jX_LX_C} \quad (4.39)$$

olacaktır.

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olacağından rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.40)$$

şeklinde olacaktır. Paralel rezonans devresinin harmonikli gerilimle beslenmesi durumunda devreden çeşitli harmonikleri içeren bir akım geçer. Daha önceden de tanımlandığı gibi herhangi bir n. harmonik seviyesi için devre elemanlarının değerleri

$$R_n = R_0 + R \quad (4.41)$$

$$X_{L_n} = n.X_L \quad (4.42)$$

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (4.43)$$

şeklinde olacaktır. Buna göre herhangi bir harmonik bileşendeki empedans ifadesi

$$Z_n = \frac{-jRX_LX_C}{R(nX_L - \frac{X_C}{n}) - jX_LX_C} \quad (4.44)$$

olur.

Paralel rezonans durumunda devre empedansı sadece dirençten oluşur. Bu durumda Q kalite faktörü,

$$Q = \frac{R}{X_r} \quad (4.45)$$

olur. Bu ifade, devrede kondansatör üzerinden geçen akımdır.

Tek fazlı devrede kaynak gerilimi $V_n < 0^\circ$ olması durumunda kondansatörün temel frekanstaki akımı,

$$I_{C_1} = \frac{Q_{C_1}}{V_n} \quad (4.46)$$

eşitliğinden reaktif güç değeri kullanılarak bulunabilir. Kondansatörün harmonik bileşen akımı ise

$$I_{C_n} = \frac{V_{C_n}}{-jX_{C_n}} = jn \cdot \frac{V_{C_n}}{X_{C_1}} \quad (4.47)$$

ifadesine göre hesaplanabilir.

Bir sistemde rezonans oluşması arıza ve hasarlara yol açabilir. Rezonans durumunda L ve C elemanlarına ait gerilimler yükselir ve bu elemanlardan aşırı akım geçer. Devre elemanlarında özellikle kondansatörlerde izolasyon zorlanmaları ve dielektrik malzeme delinmeleri meydana gelir. Harmonik gerilimler yükselir ve buna bağlı olarak tüketiciye verilen gerilimin dalga şekli ve dolayısıyla enerji kalitesi bozulur. Seri rezonans sistemde nadir oluşmasına karşın oluşumu durumunda meydana gelecek büyük akımlar anahtar ve kontaktörlerde aşırı ısınmaya neden olur. Benzer şekilde paralel rezonans lineer olmayan yüklerden dolayı oluşan harmonik akım değerlerinde artışa neden olur. Kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiğinden bu eleman zarar görebilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden büyük harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu da şebeke geriliminin bozulmasına yol açar.

5. SİSTEMLERDE HARMONİKLERİN ENGELLENMESİ

Harmonikler nedeniyle oluşacak zararlı etkilerin engellenmesi sadece tasarımda alınacak tedbirlerle mümkün olmamaktadır. Harmonik akımların şebekeye geçmesini önlemek için ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi “ adı verilir. Harmonik filtrelerin amacı bir yada daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin yani harmoniklerin etkisini azaltmaktır. Harmonik filtrelerinin görevleri harmonik üreten bir cihazdan beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek, AC sisteme katılan istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek ve radyo frekans girişimlerini elemek şeklinde özetlenebilir [11, 15-17].

İşlev bakımından filtreler ikiye ayrılır;

- Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu “aktif” filtreler
- Filtre bileşenlerinin direnç endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu “pasif” filtreler

5.1. Aktif Filtreler

Harmoniklerin ortadan kaldırılması için geliştirilmiş elemanlardır. Bu filtreler ileri güç elektroniği temellerine dayanır ve pasif filtrelerden çok daha pahalıdır. Aktif filtreler birden fazla harmonik frekansı için adreslenebilir ve enerji kalitesini etkileyen problemleri ortadan kaldırabilir. Aynı zamanda en önemli üstünlükleri mevcut dağıtımda değişiklikler yapıldığında bile etkili harmonik kompanzasyonuna devam edebilmeleridir.

Aktif filtrenin çalışma prensibi, nonlinear yükün çekeceği temel bileşen dışındaki akımı karşılamaktır. Buna göre aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederek harmonik bileşenleri uygun bir fazda yüke uygularlar. Nonlinear bir yük şebekeye bağlandığında I_s şebeke akımını çeker. Bu akım temel bileşen yanında harmonik bileşenleri de içermektedir.

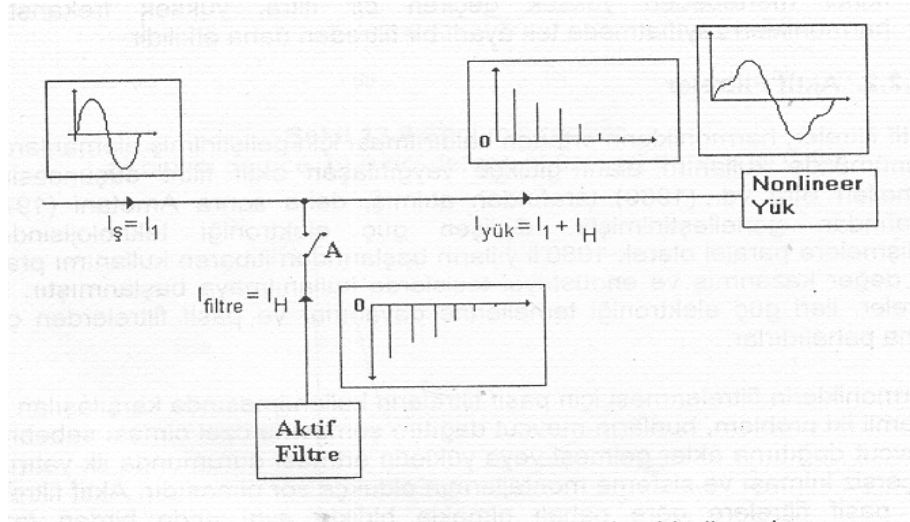
$$I_s = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H \quad (5.1)$$

şeklinde harmonik bileşen akımlarını sağlayan bir eleman olması durumunda şebekeden sadece temel bileşen akımı çekilir.

Aktif filtre akımı için de

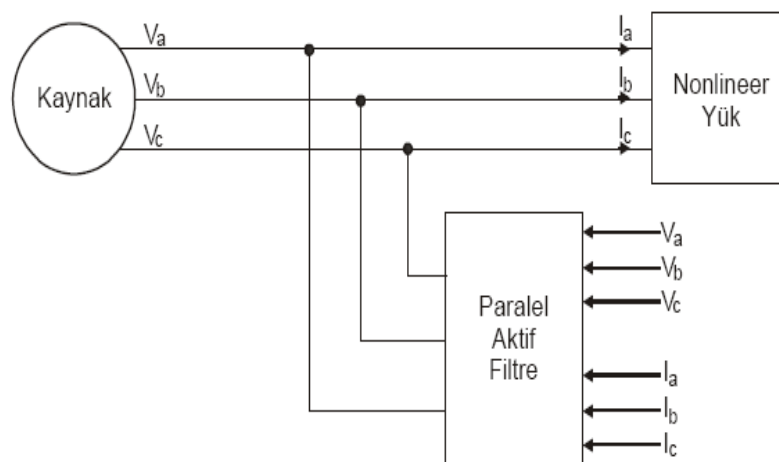
$$I_f = I_H \quad (5.2)$$

yazılabilir. Buna göre aktif filtrelerin şebekeden harmonik akımların çekilmemesine neden oldukları sonucuna varılabilir. Şekil 5.1'de aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi gösterilmiştir.

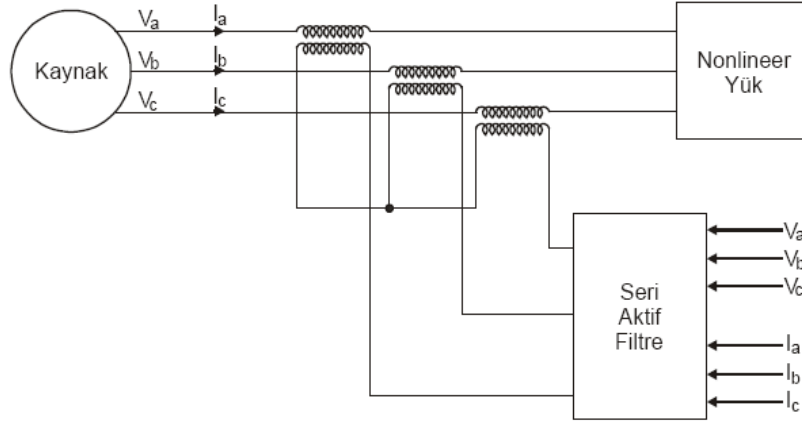


Şekil 5.1. Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi [16].

Aktif filtreler devreye seri ve paralel olmak üzere iki şekilde bağlanabilirler. Paralel filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak çalışabildiğinden daha çok kullanılır. Şekil 5.2-a'da paralel bağlı aktif filtre, Şekil 5.2-b'de ise seri bağlı aktif filtre gösterilmiştir.



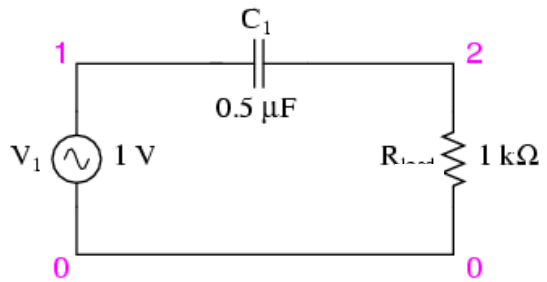
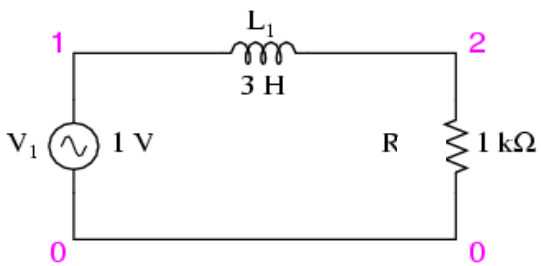
Şekil 5.2-a. Paralel bağlı aktif filtre [18].



Şekil 5.2-b. Seri bağlı aktif filtre [18].

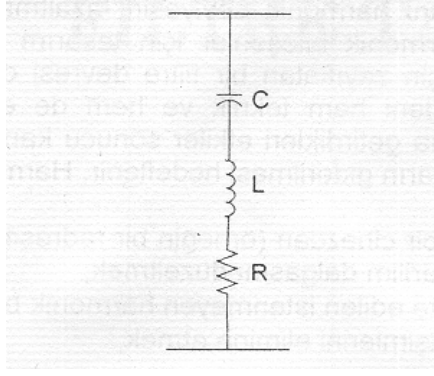
5.2. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör ve endüktans bileşimidir. Bazı durumlarda omik direnç de ilave edilebilir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu gereklidir. “Q” kalite faktörüne göre filtreler yüksek geçiren veya düşük geçiren filtreler olarak ayrılırlar. Şekil 5.3 de endüktif düşük geçiren filtre, Şekil 5.4’de de kapasitif yüksek geçiren filtre gösterilmiştir.

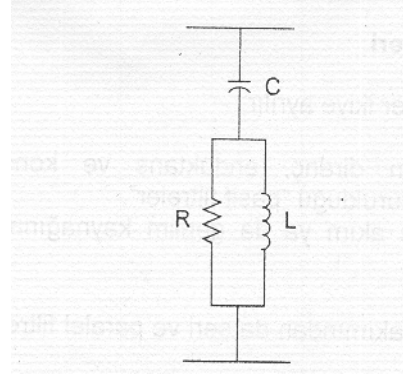


Şekil 5.3. Endüktif düşük geçiren filtre [18]. Şekil 5.4. Kapasitif yüksek geçiren filtre [18].

Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslarından birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek seviyeli harmonikleri süzmek için kullanıldığından yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Şekil 5.5-a’da düşük Q tipi filtre, Şekil 5.5-b’de ise yüksek Q tipi filtre gösterilmiştir.



Şekil 5.5-a. Düşük Q tipi filtre [16].



Şekil 5.5-b. Yüksek Q tipi filtre [16].

Q kalite faktörü

$$Q = X_r / R \quad (5.3)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede X kondansatör veya endüktansın rezonans frekansındaki reaktansını, R ise filtrenin direncini gösterir. Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde ise ayar keskinliği ifadesi

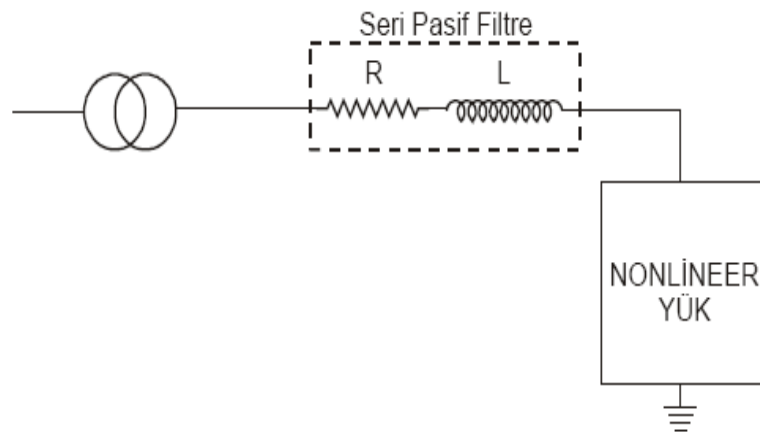
$$Q = R / X_r \quad (5.4)$$

şeklindedir.

Harmoniklerin engellenmesi için pasif filtreler olarak seri filtreler ve paralel filtreler kullanılmaktadır.

5.2.1. Seri filtreler

Şekil 5.6'da bir devrede seri filtrenin kullanımı gösterilmiştir.



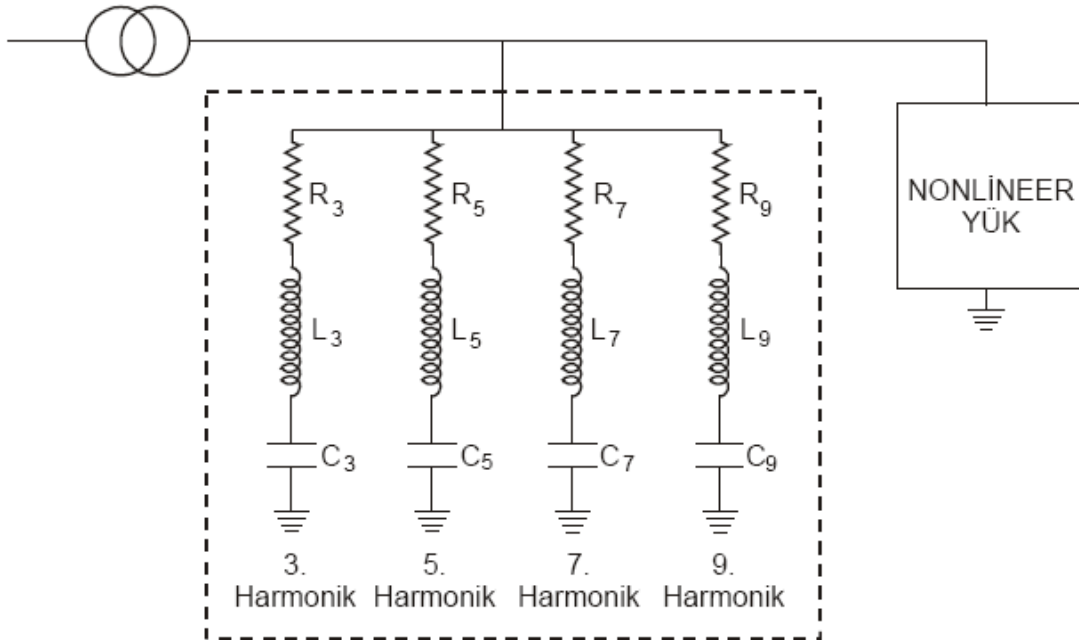
Şekil 5.6. Bir devrede seri filtrenin kullanımı [18].

Seri filtreler, harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır.

Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için, sadece o frekans bileşenine yüksek empedans, temel frekansta düşük empedans gösterirler. Seri filtrelerin en büyük dezavantajları devreye seri olarak bağlandıklarından tam yük akımını taşımak ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Bununla birlikte rezonansa yol açmamaları en büyük avantajlarıdır.

5.2.2. Paralel (şönt) filtreler

Paralel filtrenin bir devreye bağlantısı şekil 5.7’de gösterilmiştir.

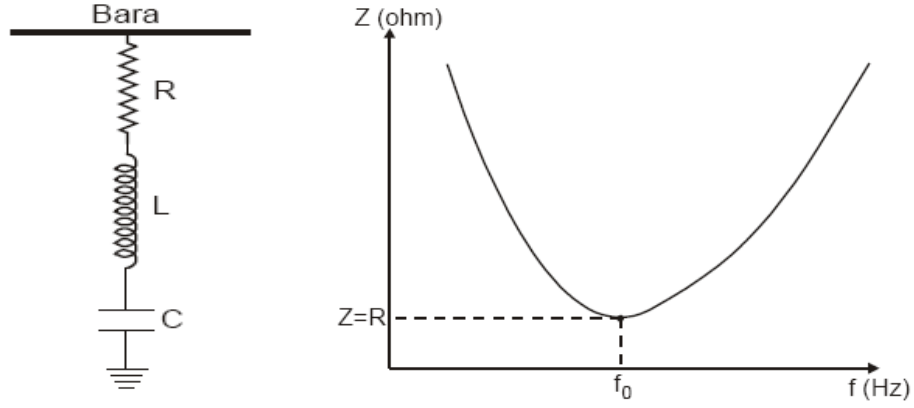


Şekil 5.7. Bir devrede paralel filtrenin kullanımı [18].

İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir paralel yol yardımıyla toprağa aktarılarak sistemde dolaşmaları engellenebilir. Harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerde amaç, düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımlarının filtre üzerinden geçmesinin sağlanmasıdır. Ayrıca temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılırlar. Tasarımları kolaydır. Ancak paralel filtre bileşenleri mevcut şebeke empedanslarıyla birbirini etkileyerek rezonansa neden olurlar. Paralel filtrelere örnek olarak tek ayarlı filtreler, çift ayarlı filtreler ve sönümlü filtreler verilebilir.

5.2.2.1 Tek ayarlı filtreler

Tek ayarlı filtreler, seri RLC devresinden meydana gelmektedir. Yapısı şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Tek ayarlı filtre ve empedans değişimi [18].

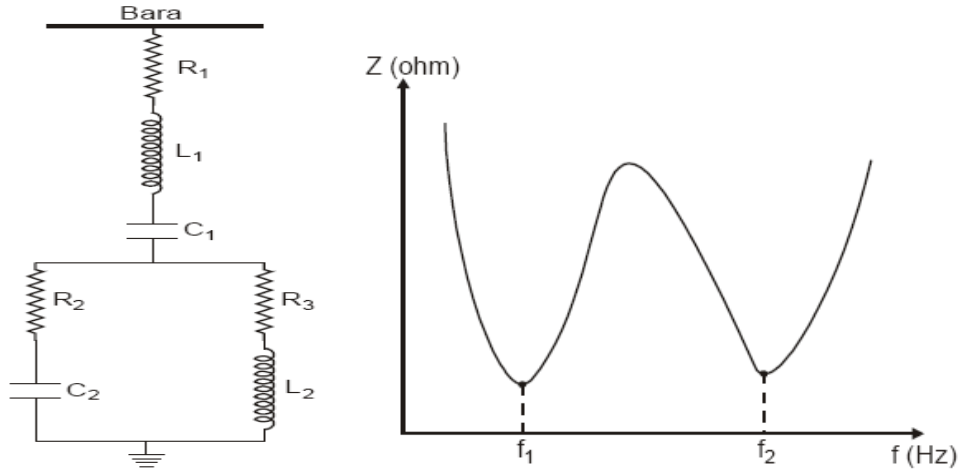
Tek ayarlı filtreler, düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanstaki harmonik akımının bastırılmasını sağlarlar. Tek ayarlı filtre için ω açısıl frekansındaki filtre empedansı Z_f

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.5)$$

ifadesiyle hesaplanabilir.

5.2.2.2 Çift ayarlı filtreler

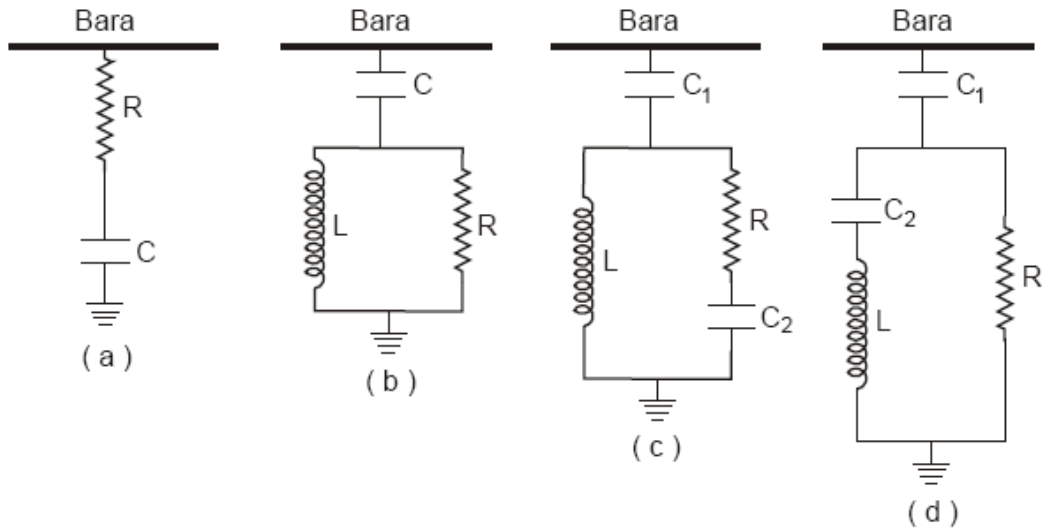
Adından da anlaşılacağı gibi iki ayrı frekansa ayarlı olup ayarlandıkları bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu frekanstaki harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlarlar. En önemli özelliği temel frekansta güç kaybının az olmasıdır. Ayrıca endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün darbe gerilimlerini denetim altına alırlar. Örnek bir çift ayarlı filtre ve filtrenin empedans değişimi Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Çift ayarlı filtre ve çift ayarlı filtre ve empedans değişimi [18].

5.2.2.3 Sönümlü filtreler

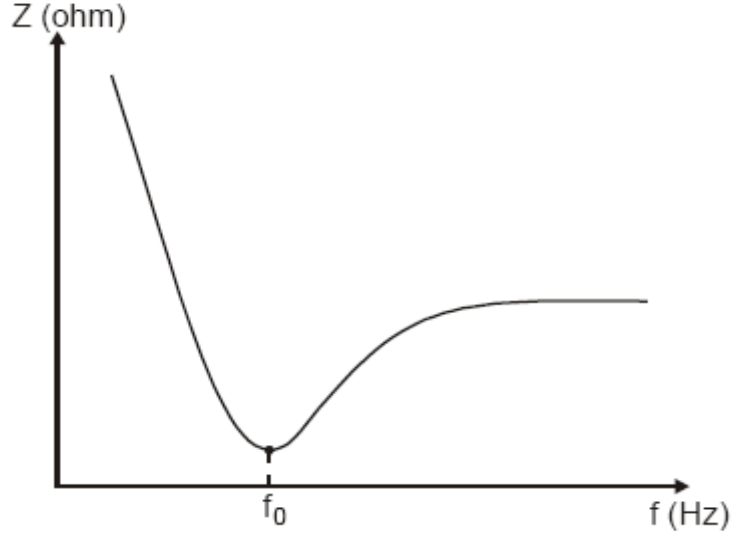
Sönümlü filtreler, yüksek dereceli (örneğin 17 ve üzeri) harmonikleri filtrelemek için kullanılır. Bu nedenle yüksek geçiren filtre olarak adlandırılırlar. Buna göre, bu filtreler yüksek frekansa küçük empedans, düşük frekansa da yüksek empedans gösterirler. Şekil 5.10' da birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi sönümlü filtreler gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi sönümlü filtreler .

Bu filtreler karşılaştırıldığında, her filtrenin farklı özellikleri vardır. Örneğin birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansta aşırı kayıplara sahiptirler ve bu sebeple yaygın olarak kullanılmazlar. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlamakla beraber temel frekans kayıpları gösterirler.

Üçüncü dereceden filtrelerin en temel özelliği temel frekans kayıplarının olmamasıdır. C tipi filtrenin performansı, ikinci ve üçüncü dereceden filtreler arasında olup temel frekans kayıplarının azlığı önemli bir avantajdır. Şekil 5.10-a'da yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi gösterilmiştir. Benzer şekilde, aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 5.10-a. Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi [18].

Çizelge 5.1. Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması.

KONU	PASİF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonikli akımların kontrolü.	Her harmonik frekansı için bir filtre ister.	Aynı anda birçok harmonik akımı kontrol edilebilir.
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi.	Filtrenin etkinliği azalır.	Etkilenmez.
Empedans modifikasyonu etkisi.	Rezonans riski vardır.	Etkilenmez.
Akım yükselmesi riski.	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.	Aşırı yüklenme riski yoktur.
Sisteme yeni yük ilave edilmesi.	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.	Herhangi bir probleme yol açmaz.
Sistemdeki temel dalganın frekans değişimi.	Değiştirilmesi gerekir.	Ayar ile uyum mümkündür.
Boyutlar ve ağırlık.	Harmonik genliği ve derecesine göre değişken.	Küçüktür.
Maliyet.	İlk maliyet çok düşük ama bakım yüksek.	İlk maliyet çok yüksek ama bakım düşük.

5.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

Nonlinear elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasıyla sistemdeki akım ve gerilim dalga şeklinin bozulduğu bilinmektedir. Bozulan bu dalga şekillerine *Fourier Analizi* olarak bilinen analiz yöntemi uygulanarak bu dalgaların analizi yapılabilir.

Fransız matematikçi J. Fourier, sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, diğer bir deyişle; sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların, genlik ve frekansları farklı olan sinüzoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir.

Fourier serisinin elde edilme işlemi, dalga analizi veya dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Periyodik fonksiyonlar Fourier Serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve kosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir.

Bir $f(t)$ fonksiyonu;

- Sonlu sayıda süreksizlik barındırıyorsa
- Sonlu sayıda maksimum ve minimum noktası varsa
- Ortalaması sonlu değer alıyorsa

Fourier Serisine açılabilir. Bu şartlar Dirichlet şartları olarak bilinir.

T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası yukarıda belirtilen üç şartı sağladığında Fourier'e göre

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (5.6)$$

veya

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (5.7)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerde;

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

A_0 : "0" indisi ile gösterilen sabit terimdir.

1 indisi ile gösterilen birinci terime temel bileşen adı verilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüzoidal dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler. 2, 3, 4, ..., n indisi ile gösterilen bileşenlere ise harmonik adı verilmektedir. $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n, B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ $f(t)$ fonksiyonunun Fourier katsayılarıdır. n ise 1,2,3,...,n pozitif tamsayı olmak üzere harmonik mertebesini göstermektedir.

T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası Fourier'e göre ;

$$f(t) = C_0 + \sin(t \mp \varphi_1) + C_2 \sin(2t \mp \varphi_2) + C_3 \sin(3t \mp \varphi_3) + \dots + C_n \sin(nt \mp \varphi_n) \quad (5.8)$$

veya

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt \mp \varphi_n) \quad (5.9)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada

C_0 : sabit terim

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

$$C_0 = \sqrt{A_0^2 + B_0^2} \quad (5.10)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (5.11)$$

dır.

Ayrıca $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ harmoniklerin faz açıları olup

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{A_1} \right) \quad (5.12)$$

ve

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right) \quad (5.13)$$

eşitlikleri yazılabilir.

Elektrik enerji sistemlerinde t değişkeni ωt değişkenine dönüştüğünden denklemler

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + \dots + A_n \cos n\omega t \\ + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \dots + B_n \sin n\omega t \quad (5.14)$$

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (5.15)$$

veya

$$f(\omega t) = C_0 + \sin(\omega t \mp \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t \mp \varphi_2) + C_3 \sin(3\omega t \mp \varphi_3) + \dots + C_n \sin(n\omega t \mp \varphi_n) \quad (5.16)$$

$$f(\omega t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t \mp \varphi_n) \quad (5.17)$$

şekline dönüşür.

5.3.1 Fourier analizinde simetri

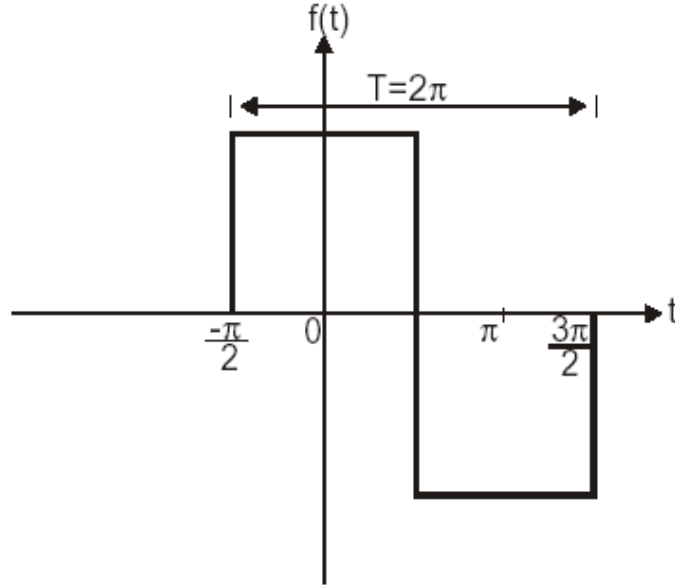
Analizi yapılması istenen periyodik bir fonksiyonun Fourier serisine açılımında terimlerin hepsi bulunmayabilir. Bu periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğriye bakılarak serinin hangi terimlerden oluştuğunu tespit etmek mümkündür. Böylece serinin elde edilmesi için gereksiz işlemlerin yapılmaması sağlanabilir.

Simetri, genellikle dalganın şekline bakmakla görülebilir. Bunun için bazı matematiksel yöntemler de vardır. Başlıca simetri türlerini aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz:

- Çift fonksiyon simetrisi
- Tek fonksiyon simetrisi
- Yarım dalga simetrisi

5.3.1.1 Çift fonksiyon simetrisi

Bu tip simetri $f(-t) = f(t)$ özelliği ile tanımlanır. Bu simetriye örnek Şekil 5.11-a' da verilmiştir.



Şekil 5.11-a. Çift fonksiyon simetrisi .

Periyodik dalganın, düşey eksenin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında sola katlandığı zaman, dalganın sol tarafındaki eğrisi ile tam tamına üst üste gelirse bu fonksiyon çift fonksiyon simetrisine sahiptir denir. Bu çift fonksiyonun Fourier

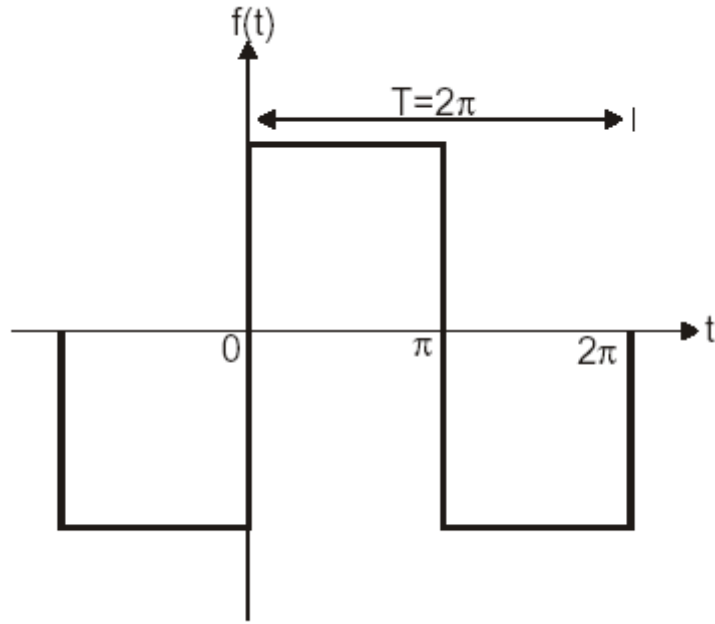
serisinde yalnız kosinüslü terimler vardır. Bu durumda, $B_0 = B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B_n = 0$ olur ve fonksiyon

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + \dots + A_n \cos n\omega t \quad (5.18)$$

şeklinde ifade edilebilir.

5.3.1.2 Tek fonksiyon simetrisi

Bu tip simetri $f(-t) = -f(t)$ özelliği ile tanımlanır. Bu simetriye örnek Şekil 5.11-b de verilmiştir.



Şekil 5.11-b. Tek fonksiyon simetrisi .

Periyodik dalganın düşey ekseninin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında önce sola, sonra soldaki eğrinin üstüne gelecek biçimde yatay eksen etrafında (aşağı yada yukarı) katlandığı zaman, bu iki eğri parçası üst üste gelirse, bu fonksiyon tek fonksiyon simetrisine sahiptir denir. Bu tek fonksiyonun Fourier serisinde yalnızca sinüslü terimler vardır. Tek fonksiyonda sabit terim A_0 'da sıfır dır. Bu durumda

$$A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_n = 0$$

olur ve fonksiyon

$$f(\omega t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \dots + B_n \sin n\omega t \quad (5.19)$$

şeklinde ifade edilebilir.

5.3.1.3 Yarım dalga simetrisi

Bu tip simetri $f(t + \pi) = -f(t)$ özelliği ile tanımlanır. Periyodik bir fonksiyonun yarım periyot parçası, yatay eksen boyunca sağa yada sola doğru π kadar kaydırılır, ve bu eksen etrafında katlamakla iki eğri parçası üst üste gelirse bu fonksiyonda yarım dalga simetrisi vardır. Böyle bir fonksiyonun yatay eksen üzerindeki eğrisi içindeki alan ile yatay eksen altındaki eğrisi içindeki alan birbirine eşit olup böyle bir fonksiyonun Fourier serisinde sabit terim yoktur ve seri yalnız tek harmonikli bileşenlerden oluşur. Fourier serisine açılabilen bir $f(\omega t)$ fonksiyonu yalnız yarım dalga simetrisi ise fonksiyon

$$f(\omega t) = A_1 \cos \omega t + A_3 \cos 3\omega t + A_5 \cos 5\omega t + \dots + A_n \cos n\omega t + B_1 \sin \omega t + B_3 \sin 3\omega t + B_5 \sin 5\omega t + \dots + B_n \sin n\omega t \quad (5.20)$$

Fourier serisine açılabilen bir $f(\omega t)$ fonksiyonu, tek fonksiyon ve yarım dalga simetrisi ise fonksiyon

$$f(\omega t) = A_1 \cos \omega t + A_3 \cos 3\omega t + A_5 \cos 5\omega t + \dots + A_n \cos n\omega t \quad (5.21)$$

şeklini alır.

5.3.2 Fourier katsayılarının bulunması

Sinüzoidal olmayan bir periyodik fonksiyonun Fourier Serisine göre sonsuz sayıda harmonikli bileşeni vardır. Ancak uygulamada bütün bu harmonikli bileşenlerin katsayıları bulunması olanaksızdır. Bu sebepten uygulamada sadece dikkate değer genliği olan katsayılı terimler hesaplanır ve bu harmonikli bileşenler işleme katılır. Fourier serisinin katsayılarının bulunmasında analitik yöntem, grafik yöntemi ve ölçme yöntemi kullanılır.

5.3.2.1 Analitik yöntemle Fourier katsayılarının bulunması

T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(\omega t)$ fonksiyonunun Fourier katsayıları (A_0, A_n, B_n) analitik yöntemle aşağıdaki formüllerle bulunabilir;

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t \quad (5.22)$$

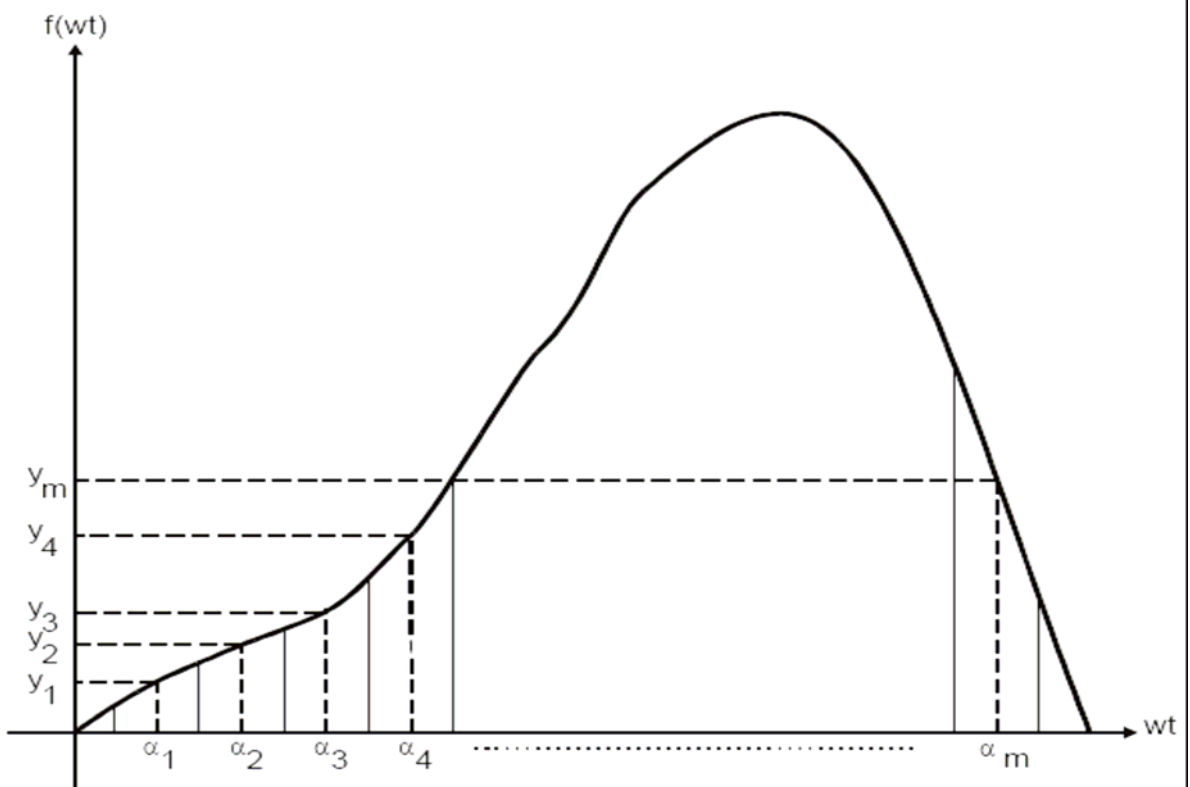
$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (5.23)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (5.24)$$

5.3.2.2 Grafik yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması

T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(wt)$ fonksiyonunun Fourier katsayılarının diğer bir bulunma yöntemi grafik yöntemidir. Bu yöntem çoğunlukla analiz uygulanacak fonksiyonun sayısal değerinin bilinmeyip grafiğinin bilindiği durumlarda kullanılır.

Elektrik enerji sistemlerinde harmonik analizörlerinin günümüzdeki kadar yaygın kullanılmadığı dönemlerde sistemin akım yada gerilimine ait osiloskoptan alınan grafiklerin kağıt üzerine aktarılmasıyla elde edilen akım veya gerilim fonksiyonuna bu yöntem uygulanarak sistemin akım yada gerilimindeki harmonikler hesaplanabiliyordu. Bu yöntemde, osiloskop çıktısı alınan fonksiyonun yarım periyodu Şekil 5.12'deki gibi parçalara ayrılır ve her parçanın orta noktası için alınan α ve y değerleri, ilgili sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren denklemler kullanılarak fonksiyonun Fourier açılımı bulunur. Bu yöntemden iyi bir sonuç elde edebilmek için fonksiyonun şekli mümkün olduğunca çok parçaya ayrılmalı ve bu parçalara ait α ve y değerleri büyük bir doğrulukla tespit edilmelidir.



Şekil 5.12. Grafik yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması [18].

Şekil 5.12’de x eksenini boyunca m adet aralığa bölünmüş bir simetrik nonsinüzoidal dalganın pozitif yarı dalgası görülmektedir. Her bir aralığın orta noktası için alınan a ve y değerleri kullanılarak temel bileşen için Fourier eşitlikleri

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cos \alpha_1 + y_2 \cos \alpha_2 + y_3 \cos \alpha_3 + \dots + y_m \cos \alpha_m) \quad (5.25)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \sin \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_2 + y_3 \sin \alpha_3 + \dots + y_m \sin \alpha_m) \quad (5.26)$$

olarak bulunabilir.

Bu denklemler basit olarak

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos \alpha_i) \quad (5.27)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin \alpha_i) \quad (5.28)$$

şeklinde ifade edilebilir. Aynı şekilde 3. harmonik için

$$A_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos 3\alpha_i) \quad (5.29)$$

$$B_3 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin 3\alpha_i) \quad (5.30)$$

n . harmonik için

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \quad (5.31)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \quad (5.32)$$

şeklinde yazılabilir.

5.3.2.3 Ölçme yöntemiyle Fourier katsayılarının bulunması

Periyodik bir nonsinüzoidal dalganın Fourier bileşenlerinin ölçme yoluyla tespit edilmesi için çeşitli ölçme düzenleri geliştirilmiştir. Bu ölçme düzenlerinin çoğunun kullandığı yaygın yol, çok dar bantlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile harmoniklerin süzülerek bir voltmetre ile ölçülmesi temeline dayanır. Bu tür düzenler “harmonik genlik analizörü” ya da “dalga analizörü” olarak isimlendirilir. Bunlara harmonik genlik analizörü demek daha doğrudur. Çünkü bu tür analizörlerle harmoniklerin faz açıları ile ilgili hiçbir bilgi elde edilememektedir.

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan ölçme düzenlerinin bir kısmı da dijital harmonik analizörleridir. Bu analizörün belirgin üstünlüğü, incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli oluşudur. Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret/gürültü oranının çok büyük olması gerekir. Başka bir tabirle bir periyotta alınan örneklerin diğer periyotlardakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi gidermek için sadece bir periyot değil de birkaç periyot incelenerek ortalama alınır. Görülüyor ki örnek alma ve dijital hesaplama ile harmonikler faz açıları ile birlikte ölçülebilmektedir. Üstelik hassasiyette artırılmış olur.

6. HARMONİK FİLTRE SİMÜLASYONLARI

6.1 Giriş

Bu bölümde, örnek olarak alınan bir sistem üzerine harmonik filtre uygulaması yapılarak sistemin cevabı incelenmiştir. Simülasyonda MATLAB programı kullanılmıştır.

6.2. Örnek Sistem

Harmonik filtreler, 12 darbeli AC/DC dönüştürücü bağlı bir sistem üzerine uygulanmıştır [19]. Bu sistem organize sanayi bölgelerinde bulunan yüksek güçlü ark fırınları olarak tanımlanabilir [20]. Sistemde önceki bölümlerde tanımlanan filtre çeşitleri kullanılmıştır. Örnek olarak alınan sistemde yükün fazlara dengeli olarak dağıldığı kabul edilmiştir. Yani sistem dengeli bir sistemdir. Filtre uygulanırken filtre içinde kullanılan kapasite elemanlarının sisteme gerekli olan kompanzasyon gücünü de karşılaması gerekmektedir. Sistemin mevcut güç katsayısı 0,75'dir, bu değeri 0,95'e çıkartabilmek için gerekli olan kondansatör gücü

$$Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 1500(\tan 41,4^\circ - \tan 18,2^\circ) = 829,25kVAr \quad (6.1)$$

olarak hesaplanmıştır.

Burada

Q_C : Sistemin güç katsayısını istenilen değere çıkarabilmek için sisteme bağlanması gereken kondansatörlerin toplam gücü (VAr),

P : Sistemin mevcut aktif gücü (W)

$\tan \varphi_1$: Sistemin ilk andaki güç açısının tanjantı

$\tan \varphi_2$: Sistemin istenen güç açısının tanjantıdır.

Hesaplama sonucu bulunan 829,25 kVAr kondansatör değeri, standart kondansatör güç değerleri göz önüne alındığından, sistemde 1000 kVAr olarak alınmıştır. Bu güç değerine göre sisteme bağlanması gereken kapasitansların reaktansları

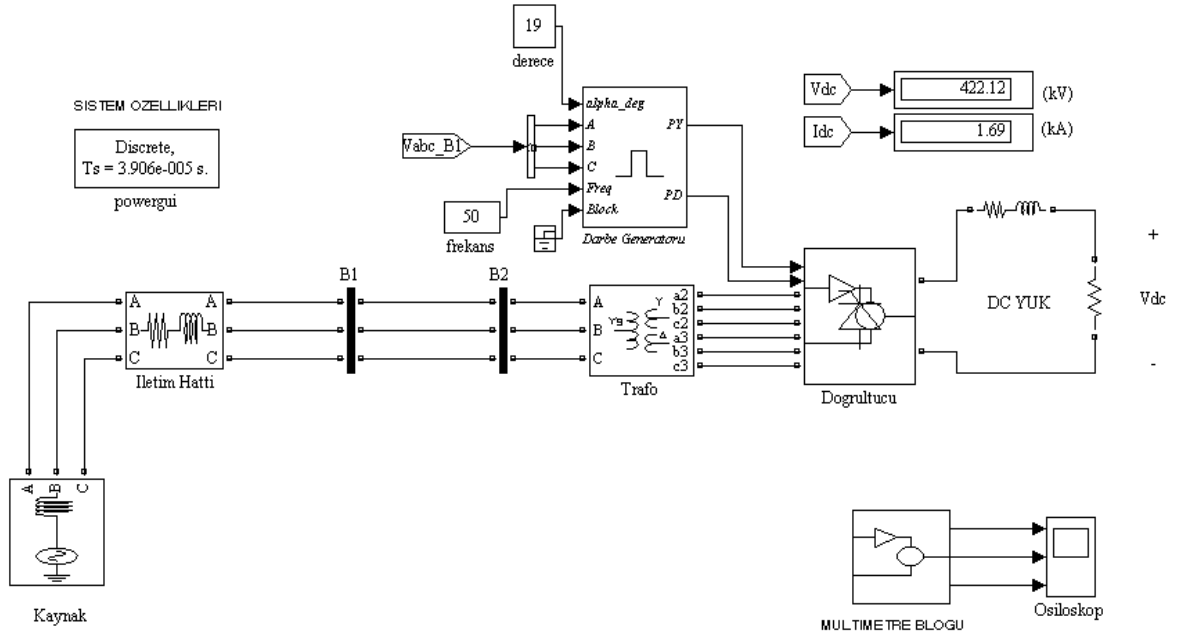
$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{500000^2}{1000000} = 250k\Omega \quad (6.2)$$

şeklinde bulunur. Kapasite değeri ise

$$C = \frac{1}{2\pi fX_C} = \frac{1}{2\pi 50(250000)} = 0,0127\mu F \quad (6.3)$$

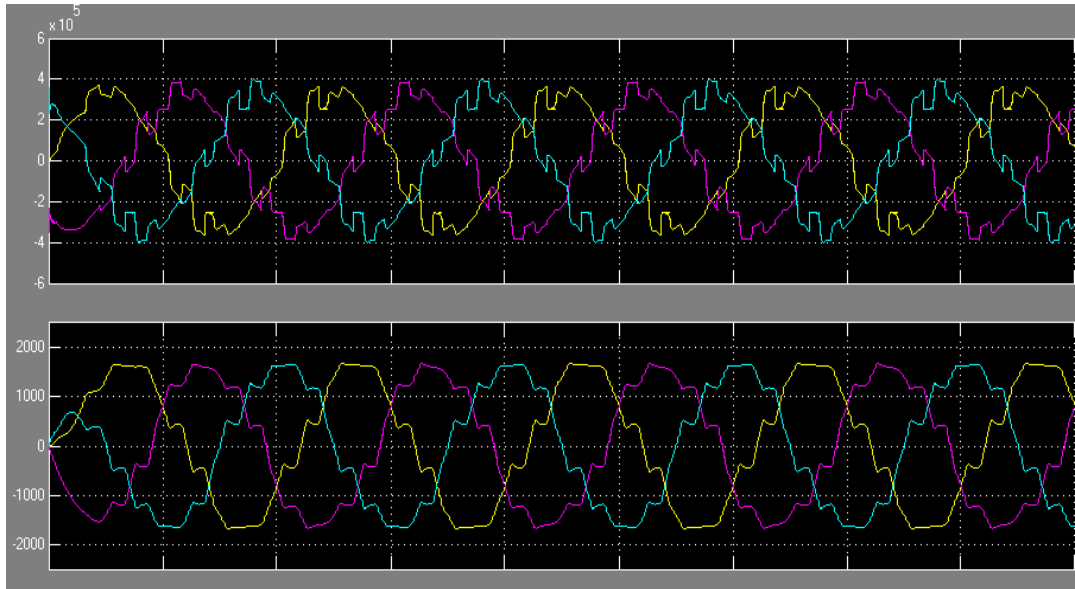
olarak hesaplanabilir.

Örnek sistemin harmonik filtre eklenmemiş durumu Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



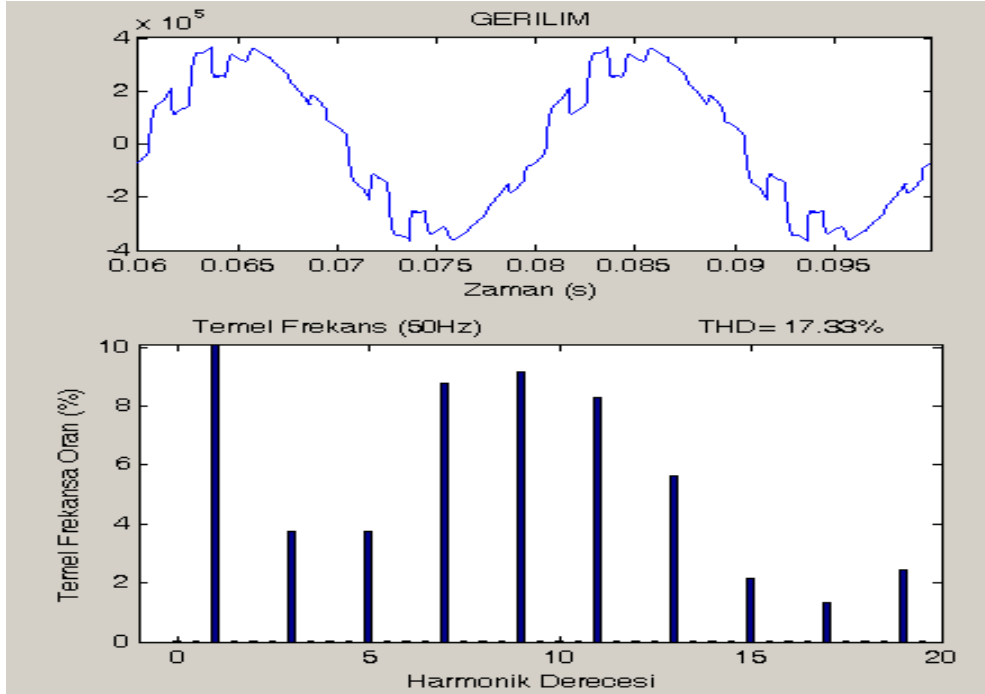
Şekil 6.1. Filtresiz Sistem.

Bu durumda sistemden gelen harmonikler engellenmeden şebekeye geçecektir. Böyle bir durumda şebekeye bağlı diğer sistemler bu harmoniklerden dolayı olarak etkilenecek ve dördüncü bölümde belirtilen durum ve arızalar oluşacaktır. Filtresiz sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

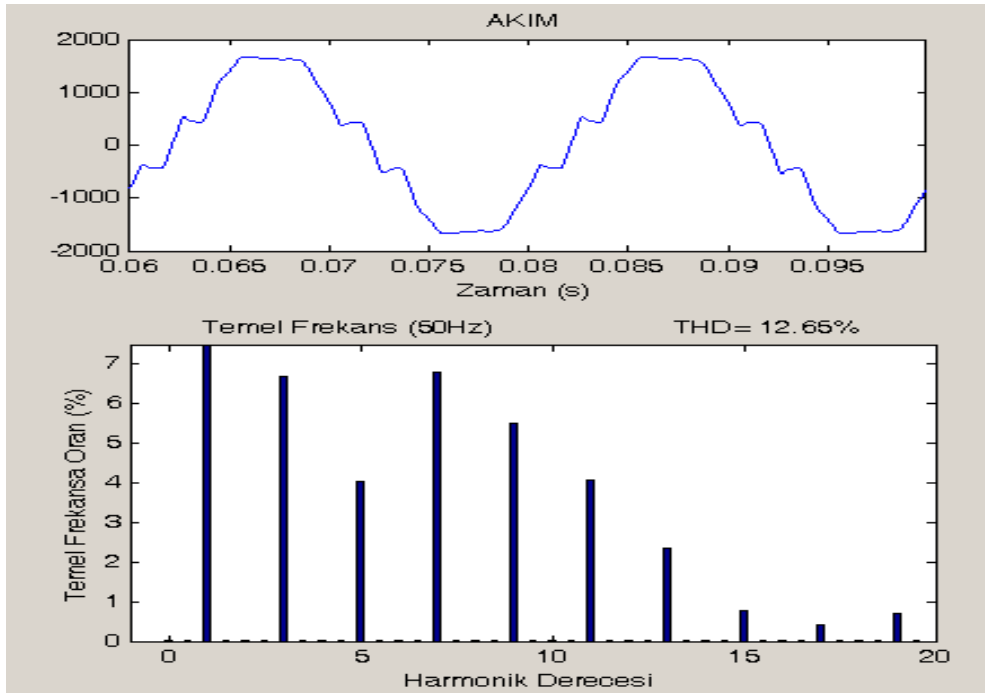


Şekil 6.2. Filtresiz sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri.

Şekil incelenecek olursa dalga şekillerinin nonsinüzoidal olduğu ve harmoniklerin sistemden çıkan dalgaları nasıl etkilediği görülecektir. Filtresiz sistemde oluşan gerilim ve akım harmonik dereceleri Şekil 6.3-a ve Şekil 6.3-b’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3-a. Filtresiz sistemde oluşan gerilim harmonikleri.



Şekil 6.3-b. Filtresiz sistemde oluşan akım harmonikleri.

Sistemin filtresiz durumu incelenmiş, sistemde 3, 5, 7, 9, 11 ve 13 dereceli harmoniklerin etkin olduğu tespit edilmiştir. Her harmonik derecesinin genlik değeri farklı olduğundan her bir kol, tasarlandığı harmonik derecesinin genlik değerindeki akımı taşıyabilmelidir. Sistemdeki harmonikli akımların genlikleri Şekil 6.3-b' den bulunabilir. Bu değerler Çizelge 6.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Sistemdeki harmonikli akımların genlikleri

Akım Harmoniği	Genliği (A)
I_3	325
I_5	200
I_7	335
I_9	275
I_{11}	200
I_{13}	125

Bu durumda

$$I_h = I_3 + I_5 + I_7 + I_9 + I_{11} + I_{13} = 325 + 200 + 335 + 275 + 200 + 125 = 1460 \text{ A} \quad (6.4)$$

ve sisteme bağlanması gereken toplam C değerinin kollara paylaşılması

$$C_3 = C \frac{I_3}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{325}{1460} = 0,00282 \mu F \quad (6.5)$$

$$C_5 = C \frac{I_5}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{200}{1460} = 0,00173 \mu F \quad (6.6)$$

$$C_7 = C \frac{I_7}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{335}{1460} = 0,00291 \mu F \quad (6.7)$$

$$C_9 = C \frac{I_9}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{275}{1460} = 0,00239 \mu F \quad (6.8)$$

$$C_{11} = C \frac{I_{11}}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{200}{1460} = 0,00173 \mu F \quad (6.9)$$

$$C_{13} = C \frac{I_{13}}{I_h} = 0,0127 \mu F \frac{125}{1460} = 0,00108 \mu F \quad (6.10)$$

şeklinde olur. Kapasite değerleri ve ayarlanmak istenen harmonik mertebesinin frekansı referans alınarak endüktans değerleri

$$L_3 = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_3^2 C_3} = \frac{1}{2^2 \pi^2 150^2 (0,00282)10^{-6}} = 399,21H \quad (6.11)$$

$$L_5 = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_5^2 C_5} = \frac{1}{2^2 \pi^2 250^2 (0,00173)10^{-6}} = 234,26H \quad (6.12)$$

$$L_7 = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_7^2 C_7} = \frac{1}{2^2 \pi^2 350^2 (0,00291)10^{-6}} = 71,05H \quad (6.13)$$

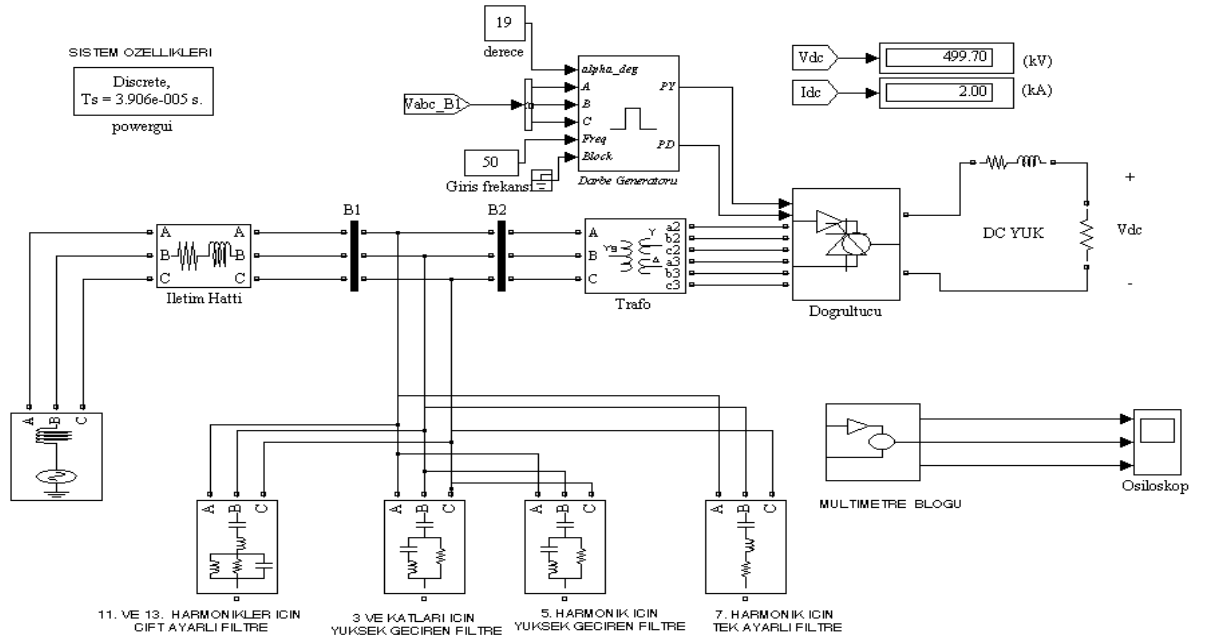
$$L_9 = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_9^2 C_9} = \frac{1}{2^2 \pi^2 450^2 (0,00239)10^{-6}} = 52,33H \quad (6.14)$$

$$L_{11} = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_{11}^2 C_{11}} = \frac{1}{2^2 \pi^2 550^2 (0,00173)10^{-6}} = 48,4H \quad (6.15)$$

$$L_{13} = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_{13}^2 C_{13}} = \frac{1}{2^2 \pi^2 650^2 (0,00108)10^{-6}} = 55,51H \quad (6.16)$$

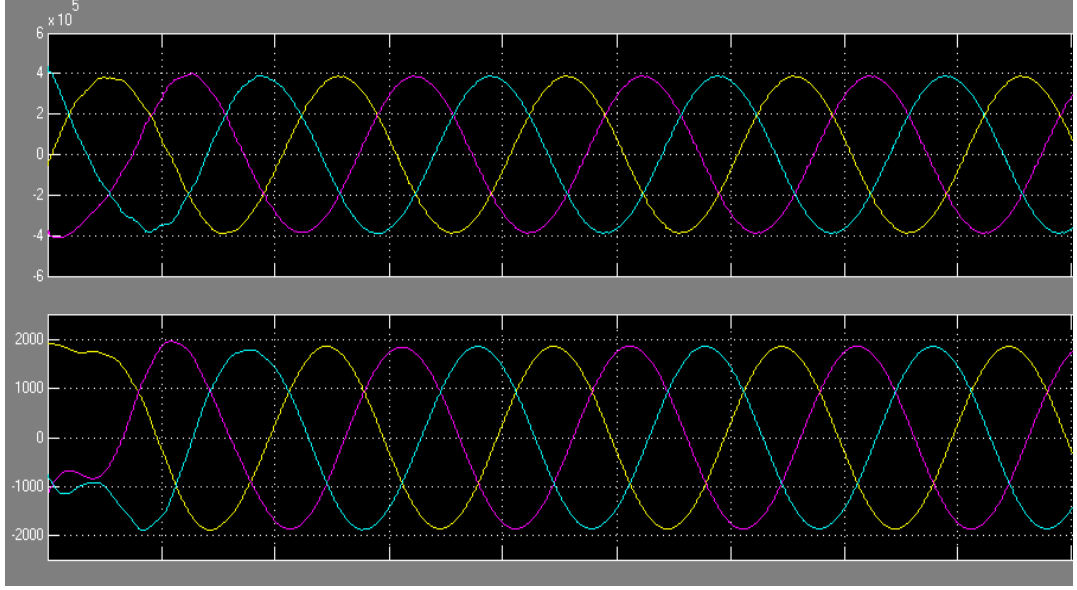
olarak hesaplanır.

Buna göre, sisteme Şekil 6.4'te gösterildiği gibi harmonik filtreler eklenmiştir.



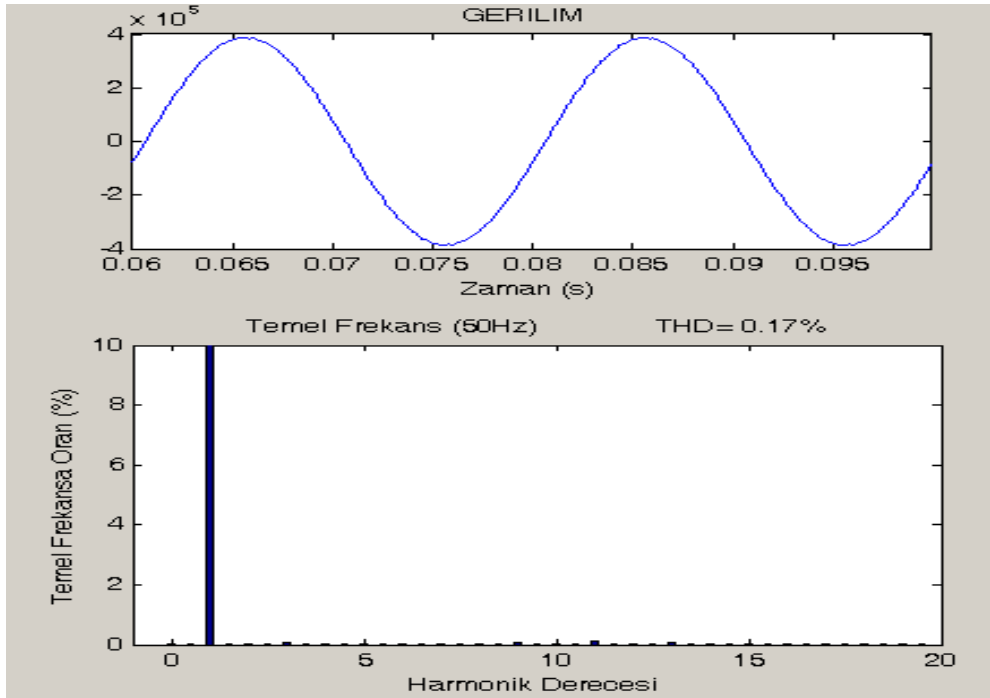
Şekil 6.4. Filtreli sistem.

Filtresiz sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 6.5'te verilmiştir. Dalga şekillerinden görüleceği üzere, sisteme eklenen harmonik filtreler, sistem akım ve gerilim dalgalarının sinüzoidal duruma dönüşmesini sağlamıştır.

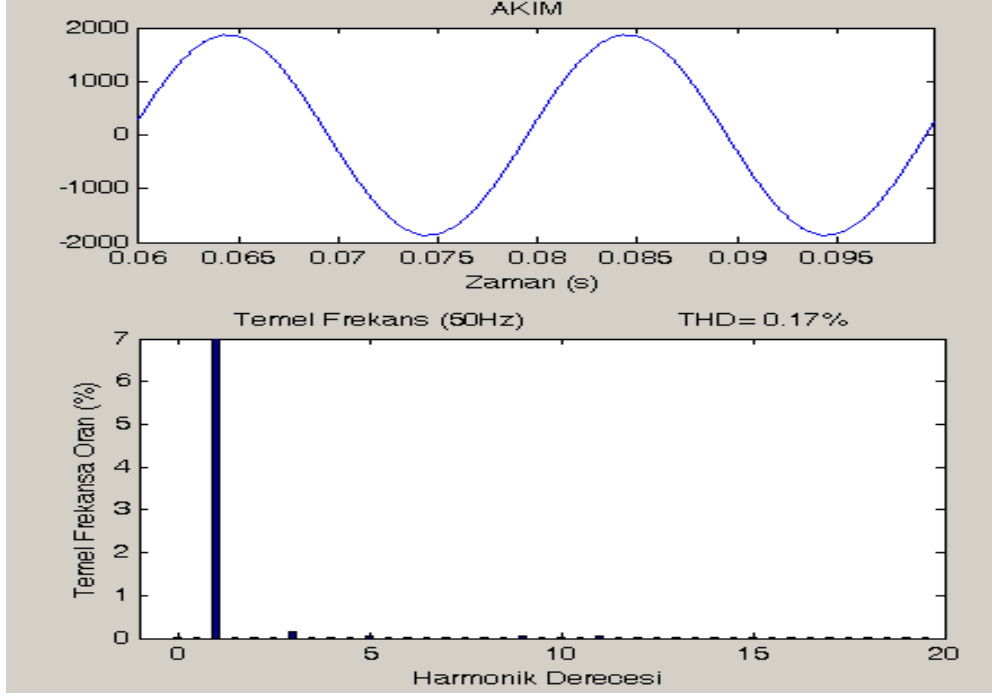


Şekil 6.5. Filtreli sisteme ait akım ve gerilim dalga şekilleri.

Sisteme eklenen harmonik filtrelerin etkilerinin daha iyi incelenebilmesi için filtre eklendikten sonra sistemde oluşan gerilim ve akım harmonik dereceleri incelenmelidir. Filtresiz sistemde oluşan gerilim ve akım harmonik dereceleri Şekil 6.6-a ve Şekil 6.6-b'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6-a. Filtreli sistemde oluşan gerilim harmonikleri.



Şekil 6.6-b. Filtreli sistemde oluşan akım harmonikleri.

Simülasyon sonucunda elde edilen akım ve gerilim değerleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Sistemin gerilim ve akım değerleri

SİSTEM	GERİLİM DEĞERİ (kV)	AKIM DEĞERİ (kA)
Harmonik Filtresiz	422,12	1,69
Harmonik Filtreli	499,70	2,00

Çizelgedan anlaşılacağı üzere harmonikler sistemde gerilim ve akım düşümlerine neden olmaktadır. Sisteme eklenen MATLAB sistem özellikleri modülündeki FFT analizi bölümünden bulunan THD değerleri Çizelge 6.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. THD değerleri

SİSTEM	GERİLİM (%)	AKIM (%)
Harmonik Filtresiz	17,33	12,65
Harmonik Filtreli	0,17	0,17

Harmonik bozulmalar için oluşturulan çizelge incelendiği zaman, akım bozulma oranının % 12,65'ten % 0,17' ye; gerilim bozulma oranının ise % 17,33'ten %0,17' ye düştüğü görülecektir. Bu sonuçlar, kullanılan harmonik filtrelerin sistem üzerinde beklenen olumlu etkiyi yaptığının ispatıdır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

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

Kuvvetli akım tesislerinde; aşırı doymuş transformatörler, ark fırınları, ark kaynak makineleri, elektrik makineleri ve artık günümüzde oldukça gelişen güç elektroniği elemanları, şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Şebekenin düşük güç faktörü ile yüklü olmasının ülke ekonomisine verdiği zararın anlaşılması ile kompanzasyon tesisleri önem kazanmış ve yaygınlaşmıştır. Bu, beraberinde harmoniklerin rezonans halinde kompanzasyon tesislerinde kullanılan kondansatörlerde tahribat ve yalıtkan kablolarda delinme meydana getirmesine sebep olabilmekte ve büyük bir problem teşkil etmektedir.

Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri; teknik ve ekonomik problemler olarak ikiye ayrılabilir. Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen ve tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise, harmoniklerin sistemde meydana getirdiği ek kayıpların oluşturduğu problemlerdir.

Harmoniklerin hiç olmaması enerji sistemleri için büyük bir yarar sağlar. Ancak günümüz şartlarında bunun mümkün olmadığı görülmektedir. O halde harmoniklerin etkilerinin azaltılması ve hatta tamamen giderilmesi düşünülebilir. Bunun iki yöntemi vardır; birincisi cihaz tasarlanırken harmonik üretmeyecek veya düşük seviyede üretecek şekilde tasarlanması, diğeri ise harmoniklerin filtreler yoluyla süzülerek sistemden uzaklaştırılmasıdır.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi kullanan tüm kesimler için çok önemli olan ve giderek artan harmoniklerin, tanımı, etkileri ve matematiksel analizi konuları incelenmiş ve harmoniklerin giderilmesi yöntemlerinden biri olan filtreler üzerinde durulmuştur. Son bölümde örnek olarak ele alınan bir 12 darbeli AC/DC dönüştürücü üzerine 3 farklı harmonik filtre türü uygulanarak sistemin cevabı incelenmiştir. Uygulanan filtre türleri tek ayarlı, çift ayarlı ve yüksek geçirgen filtredir. Yukarıdaki gösterilen devrelere ait

çıkış dalgaları incelendiğinde bir sistemde harmoniklerin engellenmesi için harmonik analizin ve filtre seçiminin doğru yapılması gerektiği görülecektir.

Harmonik ve etkilerini en aza indirmeye yönelik olarak şu önerilere yer verilebilir:

- ◆ Sistem üzerindeki nonlineer yüklerin olabildiğince dar bir alanda ve günlük yükleme periyodunun olabildiğince küçük bir diliminde kullanılmasına çalışılmalıdır.
- ◆ Harmonikli yük çekecek (veya çekmekte olan) tüketicilerin THD oranlarına sınırlamalar getirilmelidir. Bu sınırlamanın güç kompanzasyonuna benzer şekilde elektriği üretme ve dağıtmadan sorumlu olan kurum tarafından bir yaptırım halinde yönetmeliklere veya projelendirme esaslarına alınması düşünülebilir.
- ◆ Sanayi tesislerinin harmonik konusunda ortaya çıkabilecek teknik sorunlarına teknik danışmanlık ve çözüm getirmek üzere, (Güç kompanzasyonu örneğinde olduğu gibi) özel kuruluş ve birimlerin oluşturulması özendirilmelidir. Güç kompanzasyonu tasarım ve montajında gelinen noktaya harmonik filtre tasarımı ve donanımı konusunda da gelinmesi, gelecekte daha yaygın olarak gözlenecek harmonik probleminin çözümüne katkı sağlayacak nitelikte olacaktır.
- ◆ Ülkemizde harmonikler konusunun fazla gecikmeden ele alınmasında ve bazı önleyici tedbirlerin getirilmesinde büyük yarar vardır. Sanayi tesislerinde filtre kullanılmasının teşvik edilmesi ve tüketicilerin sebep olduğu THD ölçüsünde yeni bir fiyat tarifesi uygulanması gibi tedbirler düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] M.Izhar, C.M.Hadzer, S.Masri and S.Idris, *A study of the fundamental principles to power system harmonic*, National Power and Energy Conference (PECon), Malaysia, 2003, pp. 225-232.
- [2] R.Yacamini, *Power system harmonics*, IEE Power Engineering Journal, August 1994, pp. 193-198.
- [3] E.L.Owen, *A history of harmonics in power systems*, IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1998, p. 6-12 .
- [4] T.A. Haskew J. Ray ann B. Horn, *Harmonic filter design and installation: a case study with resonance*, Electric Power Systems Research, 40, 1997, pp. 121-125.
- [5] S.R.Kaprielian, A.E.Emanuel, R.V.Dwyer and H.Melita, *Predicting voltage distortion in a system with multiple random harmonic sources*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.3, July 1994, pp. 1632-1638.
- [6] L.Sainz, J.Pedra and J.J.Mesas, *Single- phase full-wave rectifier study with experimental measurements* , Electric Power System Research 77, 2007, pp. 339-351 .
- [7] G.W.Massey, *Power distribution system design for operation under non-sinusoidal load conditions*, Conference Paper, No.94 C-4, IEEE 1994.
- [8] U.Arifoğlu, *Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi*, İstanbul, 2002, s.305-381.
- [9] J.Arrillaga and R.N.Watson, "Power System Harmonics", USA, 2003, p. 46-196
- [10] SQUARE D Product Data Bulletin, *Power system harmonics*, Raleigh, NC, USA, August 1994, pp. 1-8.

- [11] A.Karakaş, C.Kocatepe, M.Baysal ve H.Çakır, Harmonikli sistemlerde filtre uygulamasının karşılaştırılması, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 17-18 Mayıs 2005.
- [12] M.Bayrak ve G.Genç, Dengesiz ve harmonikli şebekelerde güç ölçümü , Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 17-18 Mayıs 2005
- [13] S.Ay, *Alçak gerilim tesislerindeki gerilim harmonikleri ve filtre tasarımı*, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 95, 1996, s.81-88.
- [14] W.M.Grady and S.Santosa, *Understanding power system harmonics*, USA, 2001, pp. 37 – 44.
- [15] A.Demirören ve L.Zeynelgil, *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması*, İstanbul, 2004, s. 204-238.
- [16] C.Kocatepe, M.Uzunoğlu, R.Yumurtacı, A.Karakaş, ve O.Arıkan, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, İstanbul, 2003, s. 7-1 – 13-15.
- [17] R.G.Ellis, *Harmonic analysis of industrial power systems* , IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.2, March/April 1996, pp. 417-420.
- [18] M.Sucu, “*Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Türkiye, 2003.
- [19] P.Giroux, (Hydro-Quebec) , “*Three-Phase Harmonic Filters*” , Simulink Model.
- [20] W.M.Grady and S.Santosa, *Understanding power system harmonics*, IEEE Power Engineering Review,2001, p. 8-11.

EKLER

Ek-1 AG, OG ve YG güç sistemlerindeki harmonik gerilim seviyeleri

20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	02+03(25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi %3.					

*O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerindeki planlanan harmonik gerilim seviyeleri
(IEC 61000-3-7)*

3'ün katı olmayan tek harmonikler			3'ün katı tek harmonikler			Çift harmonikler		
Harmonik No. (h)	Harmonik gerilimi (%)		Harmonik No. (h)	Harmonik gerilimi (%)		Harmonik No. (h)	Harmonik gerilimi (%)	
	O.G.	Y.G- Ç.Y.G.		O.G.	Y.G- Ç.Y.G.		O.G.	Y.G- Ç.Y.G.
5	5	2	3	4	2	2	1.6	1.5
7	4	2	9	1.2	1	4	1	1
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
Toplam harmonik distorsiyonu (THD): O.G. şebekelerde %6.5 – Y.G. şebekelerde %3								

ÖZGEÇMİŞ

Serhat Berat Efe, 1979 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Diyarbakır'da tamamladıktan sonra 1998 yılında Dicle Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında bu bölümden mezun oldu. 2004 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen özel bir şirkette servis mühendisi olarak çalışmaktadır.