

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDEKİ HARMONİKLERİN ELİMİNASYONU İÇİN SAYISAL FİLTRE TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elek. ve Elekt. Müh. Halis Emre ÇALIŞKANER

Enstitü Anabilim Dalı : ELEK. VE ELEKT. MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. ALİ YALÇIN

Eylül 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDEKİ HARMONİKLERİN
ELİMİNASYONU İÇİN SAYISAL FİLTRE TASARIMI

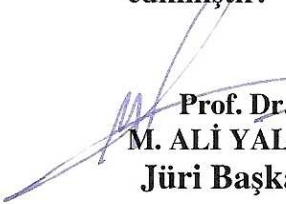
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Elek. ve Elekt. Müh. Halis Emre ÇALIŞKANER

Enstitü Anabilim Dalı : ELEK. VE ELEKT. MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 29 / 08 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
M. ALİ YALÇIN
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr.
YILMAZ UYAROĞLU
Üye


Yrd. Doç. Dr.
CEMİL ÖZ
Üye

ÖNSÖZ

Harmonikler ve harmoniklerin etkileri, günümüzde kullanılan yarı iletken teknolojisi sebebi ile artış göstermektedir. Bu nedenle harmonikler ve etkileri konusunda yoğun çalışmalar yapılmakta ve bazı sınırlamalar getirilmektedir.

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

Bu çalışmada harmonikler teorik ve pratik olarak incelenmiş, harmonik etkileri ve filtrelenmesi ele alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada harmonikler için gerekli analiz yöntemleri işlenmiştir.

Bu konuda bana çalışma olanağı veren ve her türlü yardımı sağlayan sayın tez hocam Prof.Dr. M.Ali YALÇIN'a, ve bölümümüzün hocalarına teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Harmonik Tanımı.....	2
1.2. Harmoniklerin Analizi.....	2
BÖLÜM 2.	
HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ.....	3
2.1. Lineer Olmayan Elemanlar.....	3
2.1.1. Transformatörler.....	4
2.1.2. Döner makineler.....	4
2.1.3. Güç Elektroniği Elemanları.....	5
2.1.4. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC).....	6
2.1.5. Statik var jeneratörleri.....	6
2.1.6. Ark fırınları.....	7
2.1.7. Kesintisiz güç kaynakları.....	7
2.1.8. Gaz deşarjlı aydınlatma.....	8
2.1.9. Elektronik balastlar.....	8
2.1.10. Fotovoltaik sistemler.....	9
2.1.11. Bilgisayarlar.....	9

2.2. Harmonik Kaynağı Olarak Üç Fazlı Kontrolsüz Doğrultucu.....	9
2.3. Harmoniklerin Sisteme Etkileri.....	12
2.3.1. Harmoniklerin sebep olduğu rezonans olayları.....	12
2.3.2. Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkileri.....	13
2.3.3. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkileri.....	14
2.3.4. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi....	15
BÖLÜM 3.	
HARMONİKLİ BÜYÜKLÜKLERİN GİDERİLMESİ.....	16
3.1. Tasarım Aşamasında Alınabilecek Önlemler.....	16
3.1.1. Jeneratörlerde alınabilecek önlemler.	16
3.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler.....	16
3.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler.....	17
3.2. Pasif Filtreler.....	17
3.2.1. Seri filtreler.....	17
3.2.2. Şönt filtreler.....	18
3.3. Aktif Filtreler.....	18
3.4. Harmonikli Akım Enjekte Yöntemi İle Harmoniklerin Giderilmesi.....	19
3.4.1. Tam dalga kontrolsüz doğrultucuda üçüncü harmonik bileşen akımını enjekte ederek harmonik bozulmanın azaltılması (PEJOVIC ve JANDA, 1999).....	19
3.4.2. Bozulma azalmasının analitik olarak incelenmesi (PEJOVIC ve JANDA, 1999).....	24
3.4.3. Enjekte edilecek uygun akım değeri.....	26
3.4.4. Akım enjekte edildikten sonra, üç fazlı doğrultucu giriş akımı harmonik bozulması.....	26
3.5. Genlik Darbe Modülasyonu (PWM) Yöntemi İle Harmonik Giderme.....	27
3.6. Harmonikli Akım Veya Gerilim Barındıran Sistemlere Ait Matematiksel Tanımlamalar.....	29
3.6.1. Distorsiyon gücü (D).....	30

3.6.2. Toplam harmonik distorsiyon (THD).....	30
3.6.3. Tekil harmonik distorsiyonu.....	31
3.6.4. Toplam talep distorsiyonu.....	31
3.6.5. Şekil (form) faktörü.....	31
3.6.6. Tepe (crest) faktörü.....	32
3.7. Harmonik Standartları.....	32
BÖLÜM 4.	
SAYISAL UYGULAMA.....	35
4.1. Örnek Sistem.....	35
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternative Current
CF	: Crest Factor
CCM	: Continuous Current Mode
DC	: Direct Current
DF	: Distortion Factor
DCM	: Discontinuous Current Mode
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
FFT	: Fast Fourier Transform
HVDC	: High Voltage Direct Current
HDF	: Harmonic Distortion Factor
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEE	: Institute of Electrical Engineers (İngiltere)
PWM	: Pulse Width Modulation
PF	: Power Factor
pu	: Per-unit
SHEM	: Selective Harmonic Elimination Method
TCR	: Thyristor Controlled Reactors
UPS	: Uninterruptible Power Supply
D	: Distorsiyon gücü
DFI	: Akım için distorsiyon faktörü
DFV	: Gerilim için distorsiyon faktörü
f_1	: Temel harmonik frekansı
f_p	: Paralel rezonans frekansı
f_s	: Seri rezonans frekansı
I_1	: Temel harmonik akımının etkin değeri

I_n	: n. harmonik akımının etkin değeri
I_m	: Mıknatıslanma akımı
L	: Endüktans
n	: Harmonik mertebesi
P	: Aktif güç
Q	: Reaktif güç
R	: Direnç, empedans
R_r	: Statora indirgenmiş rotor etkin direnci
R_s	: Stator omik etkin direnci
S	: Görünür güç
S_L	: Omik yükün gücü
S_t	: Transformator nominal gücü
V_{L-L}	: Fazlar arası gerilim
X	: Reaktans
X_L	: Enduktif reaktans
X_{L1}	: Bobinin temel frekanstaki reaktansı
X_C	: Kapasitif reaktans
X_{C1}	: Kondansatörün temel frekanstaki reaktansı
X_{cn}	: Kondansatörün n. harmonik için reaktansı
a	: Tetikleme açısı
ω_r	: Rezonans anındaki açısal frekans.
Z_t	: Transformator per unit (birim değer) empedans

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Temel bileşen ve harmonik bileşenleri.....	1
Şekil 2.1. Lineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları.....	3
Şekil 2.2. PC bilgisayarlar için harmonik bozulma.....	9
Şekil 2.3. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait giriş akımı dalga şekilleri.....	10
Şekil 2.4 Transformatörün eşdeğer devresi (n. harmonik için).....	15
Şekil 3.1 Seri filtrenin devreye bağlanması.....	17
Şekil 3.2 Şönt filtrenin devreye bağlanması.....	18
Şekil 3.3 Aktif güç filtresine ait blok şeması.....	18
Şekil 3.4 Üç fazlı yarım dalga doğrultucuda harmonik akım enjeksiyonu.....	20
Şekil 3.5 Çapsal (Diametrical) doğrultucuda harmonik enjeksiyon devresi.....	20
Şekil 3.6 Üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyonu.....	21
Şekil 3.7 Altı fazlı yıldız bağlı trafo üzerinden beslenen doğrultucu.....	21
Şekil 3.8 Üç fazlı doğrultucuda üçüncü harmonik akımının enjekte ait devre....	22
Şekil 3.9 Üç fazlı doğrultucuya harmonikli akım enjekte etmeye ait devre.....	23
Şekil 3.10 Basit invertöre ait prensip şeması.....	28
Şekil 3.11 Darbe genlik modülasyonunun prensip şeması.....	28
Şekil 3.12 Aşırı modülasyonlu PWM (m=1.3).....	29
Şekil 4.1 Örnek ölçüm akım grafiği.....	35
Şekil 4.2 Örnek ölçüm gerilim grafiği.....	36
Şekil 4.3 Örnek ölçüm aktif güç değişim grafiği.....	36
Şekil 4.4 Örnek ölçüm güç faktörü değişim grafiği.....	37
Şekil 4.5 Örnek ölçüm harmonik değişim grafiği.....	38
Şekil 4.6 Harmoniklerin simülasyon yöntemi ile analizi (filtresiz kompanzasyon olması hali).....	39

Şekil 4.7 Harmoniklerin simülasyon yöntemi ile analizi (pasif filtreli kompanzasyon olması hali).....	39
Şekil 4.8 Gerilim harmonik mertebeleri (pasif filtreli kompanzasyon olması hali)..	40
Şekil 4.9 Pasif filtre devre elemanları seçimi (pasif filtreli kompanzasyon olması hali).....	40

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Doğrultucu harmonik mertebeleri ve genlikleri.....	11
Tablo 3.1. Ükelere göre uluslar arası toplam gerilim harmonik standartları.....	33
Tablo 3.2. IEEE tekil ve toplam gerilim harmonik standartları.....	34
Tablo 3.3. IEEE akım harmonik standartları.....	34

ÖZET

Anahtar kelimeler: Harmonikler, güç elektroniği elemanları

Enerji dağıtım sistemlerinde sinüzoidal formdaki gerilim kaynağı, güç elektroniği elemanlarına uygulandığında sistemin vereceği akım cevabı sinüzoidal olmayan dalga formundadır. Elektrik enerji sisteminin ve bu sisteme bağlanan yüklerin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için o sistemdeki dalga şeklinin sinüzoidal olması ve frekansının 50 Hz' lik tek frekansa sahip olması istenir.

Güç elektroniği elemanları, lineer olmayan yükler, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulmalar meydana getirmektedir. Temel şebeke frekansındaki bu bozulmalar, farklı frekanslarda gerilim ve akım genlikleri olarak ortaya çıkmaktadır.

Akım ve gerilim dalgalarında oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı tüketicilere zarar vermekte ya da çalışamaz hale getirmektedir.

DIJITAL FILTER DESIGN FOR ELIMINATION OF HARMONICS AT INDUSTRIAL PLANTS

SUMMARY

Key Words: Harmonics, power electronics equipments

The voltage source, that is sinusoidal wave form at energy distribution system, when is applied to power electronics equipments, response of current which is given by the system, is nonsinusoidal wave form. To operate electric energy system and their loads reliably, the waveform of the system magnitudes should be in the form of sinusoidal with 50 Hz.

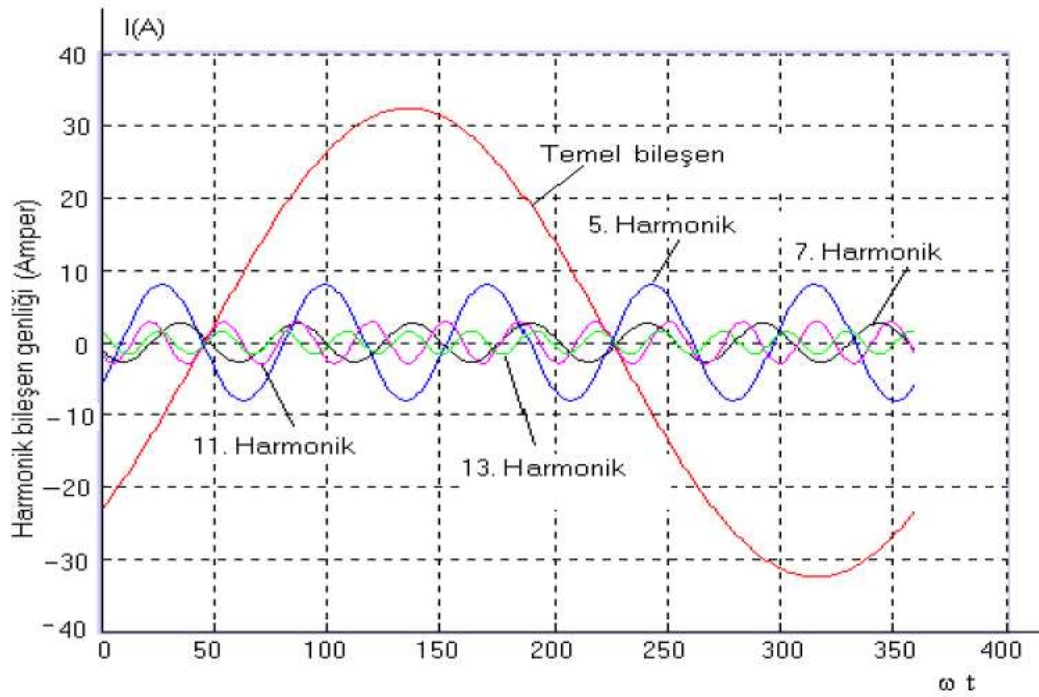
Power electronics equipments, nonlinear loads cause to voltage and current waveform distortion in distribution networks. The distorsion of main network frequency appears voltage and current amplitudes at different frequencies.

Voltage and current waveform distortion due to harmonics can make the electrical system and electrical consumer either damaged or out of order.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

HARMONİKLER

Şekil 1.1.'de yarı periyotta harmonik bileşenler ve temel bileşen gösterilmiştir. Yarı iletkenlerin tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı lineer olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Akım ve gerilimde oluşan bu bozulma elektrik tesisleri ve bu tesislere bağlı güç sistemlerine zarar vermekte ve hatta bazen sistemleri çalışamaz hale getirmektedir.



Şekil 1.1. Temel bileşen ve harmonik bileşenleri

Manyetik devre lineersizliği, demir çekirdekli bobin, transformatör, jeneratör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesidir. Elektrik devre lineersizliği ise, akımı ile gerilimi arasında ilişkisi doğrusal olmayan bir elemanda arka çalışın işletme araçlarında yarı iletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalğanın bazı kısımlarının kırılması sonucunda meydana gelir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidallikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu tür elemanlara örnek olarak şunlar verilebilir. DC çevirici, DC evirici, motor kontrol devreleri, statik VAR jeneratörleri, anahtarlamalı güç kaynakları gibi güç elektroniği elemanlı devre, flüoresan, cıva arka, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, akü ve fotovoltaiik sistemleri ve elektrikli ulaşım sistemleri gibi sistemler sayılabilir.

1.1. Harmonik Tanımı

Harmonikler genel olarak devredeki elemanın özelliğine ve kaynağın durumuna göre ortaya çıkarlar. Eğer devrede lineer olmayan elemanlar veya sinüzoidal olmayan kaynaklar bulunacak olursa veya bunların her ikisinin de olması durumunda meydana gelirler. Bu şekilde çeşitli elemanlar veya olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüzoidal dalga biçimi bozulur. Bu bozuk dalgalar “sinüzoidal olmayan dalga” olarak adlandırılır. Sinüzoidal olmayan dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilir. Güç sistemindeki sinüzoidal dalğanın simetrisinden dolayı 3. 5. 7.11, gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 1.1.’de bir yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir.

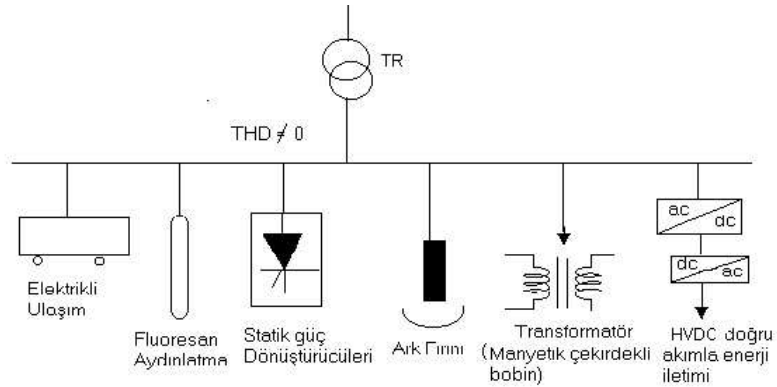
1.2. Harmoniklerin Analizi

Harmoniklerin analizinde, periyodik dalğanın bir doğru bileşeni ile bir temel frekanslı saf sinüs dalgası ve frekansları farklı saf sinüs dalgalarının toplamından oluştuğu gösterilir. Böylece sinüzoidal olmayan dalgaların “harmonik spektrumu” oluşturulur.

BÖLÜM 2

HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ

Tüketiciler elektrik enerjisinin, kalitesinden önemli derecede etkilenirler. Güç kalitesi olarak belirtilen enerjinin belli şartları taşıma gerekliliği, artık vazgeçilmez bir olgudur. Güç kalitesini olumsuz etkileyenlerden biri de harmoniklerdir. Harmoniklere lineer olmayan yükler neden olurlar. Şekil 2.1.'de lineer olmayan yüklerden bazıları görülmektedir.



Şekil 2.1. Lineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları

2.1. Lineer Olmayan Elemanlar

1. Transformatörler
2. Döner makineler
3. Güç elektroniği elemanları
4. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)
5. Statik VAR jeneratörleri
6. Ark fırınları

7. Kesintisiz güç kaynakları
8. Gaz deşarjlı aydınlatma
9. Elektronik balastlar
10. Fotovoltaik sistemler
11. Bilgisayarlar

2.1.1. Transformatörler

Enerji sisteminde nüvesi bulunan bobinlerin, nüvesi doyuma ulaştığında harmoniklere yol açarlar. Bu tür elemanların başında güç sistemindeki en önemli elemanlardan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, nüvenin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün nüvesinin doymasından kaynaklanmaktadır. Nüvenin $B = f(H)$ eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği belli bir bölgeden sonra lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüzoidal gerilim sonucu sinüzoidal akım ve akı oluşmamaktadır.

$V(t) = V_m \sin \omega t$ biçiminde sinüzoidal şebeke geriliminin uygulanması halinde uyarma akısı $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$ şeklinde yine sinüzoidal bir akı üretilecektir. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir.

Harmonik akımlarının şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır:

1. Transformatörün bağlantı grubu,
2. Primerin yıldız bağlı olması durumunda yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması,
3. Transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısı.

2.1.2. Döner makineler

Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; Alan şekli ve ana

devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron jeneratörlerdir.

2.1.3. Güç elektroniği elemanları

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

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

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

1. Doğrultma,
2. Frekans kontrolü,
3. Gerilim kontrolü,
4. Evirme,
5. Diğer uygulamalar.

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

Çeşitli darbe sayılarına sahip doğrultucular bulunmaktadır. 6 ve 12 darbeli doğrultucular en yaygın olanlarıdır. Küçük güçlü uygulamalarda 3 darbeli, daha güçlü uygulamalarda ise 18 ve daha büyük darbeli doğrultucular kullanım alanı bulmaktadır. Darbe sayısının seçimi ekonomik koşullara da bağlıdır.

Frekans ve gerilim kontrolü grubu, senkron ile indüksiyon motorların ve benzeri

yüklerin farklı frekans ve gerilimlerde beslenmesi amacıyla kullanılır. Böylece motorların tüm yük seviyelerinde daha verimli çalışması sağlanır.

Yarı iletken elemanlar, çalışma karakteristiğinin lineer olmayan özellikten kaynaklanan harmonikler üretirler.

2.1.4. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)

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

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

2.1.5. Statik var jeneratörleri

Statik VAr jeneratörleri; alternatif akım kısıyıcısı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Çünkü, geleneksel kompanzasyon düzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneğin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz. Fakat yarı iletken elemanların sağladığı imkanlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanır. Bu iş için kullanılan tristörler, yarı iletken anahtarlama elemanları olduklarından doğal harmonik kaynaklarıdır.

2.1.6. Ark fırınları

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

Ark fırınının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler içerir. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır.

Ark fırınlarının çalışma şartlarındaki bu değişimlerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlarda gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir.

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik jeneratörü gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans (tınlaşım) frekansı düşer.

2.1.7. Kesintisiz güç kaynakları

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

Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin Fourier Serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde

harmonikler oluşturacaklardır.

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

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

2.1.8. Gaz değarjlı aydınlatma

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

2.1.9. Elektronik balastlar

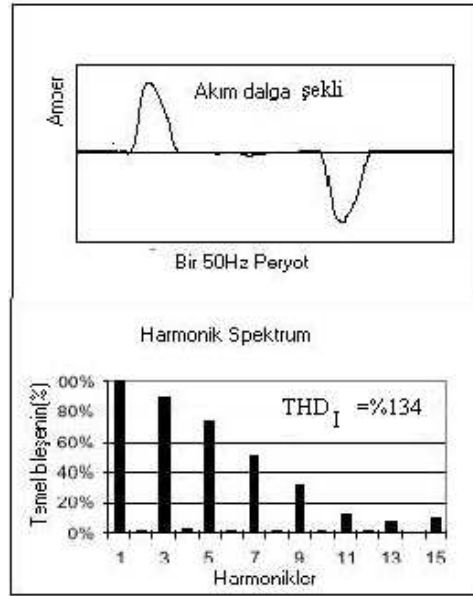
Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok denecek kadar azdır.

2.1.10. Fotovoltaik sistemler

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

2.1.11. Bilgisayarlar

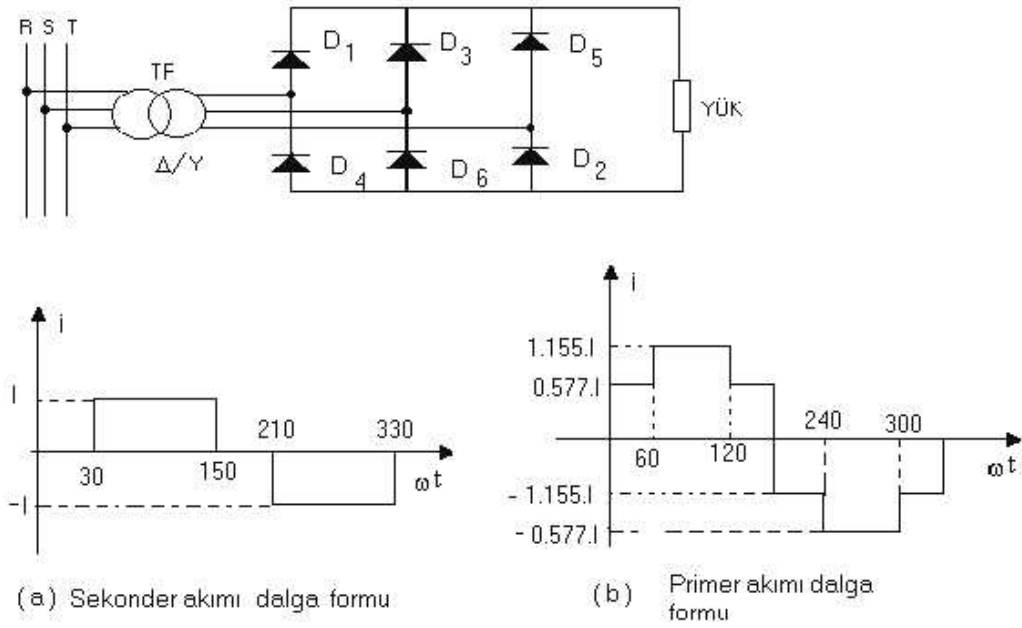
Bilgisayar sistemleri, hem harmonik üreticisidir. Hem de harmonik bileşenlerden son derece etkilenirler.Şekil 2.9'da bir bilgisayarın akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir (Chair, 1996)



Şekil 2.2. PC bilgisayarlar için harmonik bozulma

2.2. Harmonik Kaynağı Olarak Üç Fazlı Kontrolsüz Doğrultucu

Doğrultucular alternatif gerilimi doğru gerilime çeviren cihazlardır. Eğer kullanılan elemanlar kontrol edilmeyen elemanlar ise böyle devreler kontrolsüz doğrultucu devrelerdir.



Şekil 2.3. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait giriş akımı dalga şekilleri

Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun giriş akımına ait dalga formları Şekil 2.3. 'da verilmiştir. Bu doğrultucuya ait giriş akımlarının fourier serisini elde ederek harmonikler görülebilir.

$$I = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilecektir. Şekil 2.3. a' daki dalga formu $f(t)=-f(-t)$ koşulunu sağladığından tek fonksiyondur. Ve aynı zamanda dalga şekli yarı dalga simetrisine sahiptir. Bu koşullardan dolayı doğrultucu akımı için fourier serisi aşağıdaki gibi yazılır ($A_n=0, I_{dc} = 0$).

$$B_n = \frac{4.1}{\pi} \int_{30}^{90} I \sin n\omega t d(\omega t) = \frac{4I}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (2.2)$$

olarak elde edilir. Buradan doğrultucunun sekonder akımının ifadesi

$$I = 1.103 \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) \dots \right] \quad (2.3)$$

şeklinde bulunur. Doğrultucunun primer akımı Şekil 2.3. b'deki dalga formu $f(t) = -f(-t)$ koşulunu sağladığından tek fonksiyondur. Aynı zamanda dalga formu yarı dalga simetrisine sahiptir. Bu koşullardan dolayı doğrultucu akımı için fourier serisi aşağıdaki gibi yazılır.

Doğrultucunun primer akımına ait Fourier açılımı, dalganın tek fonksiyon olması ve yarı dalga simetrisi nedeniyle $A_n = 0$, $I_{dc} = 0$ yazılabilir. Buradan,

$$B_n = \frac{4I}{\pi} \left[\int_0^{30} 0.577.I. \sin(n\omega t) d(\omega t) + \int_{60}^{90} 1.155.I. \sin(n\omega t) d(\omega t) \right] \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Çözümünden,

$$B_n = \frac{4I}{n\pi} 0.577 \left[1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right] \quad (2.5)$$

bulunur. Doğrultucunun primer akımı,

Tablo 2.1. Doğrultucu harmonik mertebeleri ve genlikleri

Harmonik mertebesi	Harmonik bileşenlerin genlikleri
5	0.2
7	0.145
11	0.091
13	0.077
17	0.059
19	0.053
23	0.043
25	0.040

$$I = 1.103. \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \frac{1}{17} \sin(17\omega t) \right] \quad (2.6)$$

şeklinde elde edilir.

2.3. Harmoniklerin Sisteme Etkileri

Harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilerler. Dolayısı ile güç sistemleri bundan olumsuz yönde etkilenir. Harmonikler gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde meydana getirdikleri etkileri genel olarak şöyle sıralanabilir:

1. Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması,
2. Transformatörlerin aşırı ısınması,
3. Dönen makinelerde moment sakinimlerinin ve aşırı ısınmaların oluşumu,
4. Gerilim düşümünün artması,
5. Jeneratör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması,
6. Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi,
7. Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
8. Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilim ve akımlar,
9. Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları,
10. Korumada hatalı çalışma,
11. Dielektrik malzemesinin delinmesi,
12. Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
13. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
14. Güç faktörünün değişimi,

2.3.1. Harmoniklerin sebep olduğu rezonans olayları

Güç sistemlerinde endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artarken, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı denmektedir. Sistem rezonansı, harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi rezonans durumudur. Seri rezonans harmonik akımının dolaşmasına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir. Bilindiği gibi elektrik devrelerinde, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans oluşabilir. Güç sistemindeki güç katsayısının düzeltilmesinde yada filtrelerde kullanılan kondansatörlerden dolayı, paralel

rezonans meydana gelebilmektedir. Paralel rezonans olayı kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı yükselmesine sebep olmakta ve kondansatöre zarar verebilmektedir. Bu durum endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır. Rezonans frekansı şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilerek

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, f_p ; paralel rezonans frekansı; f_1 ; temel frekans; S_k ; kaynağın kısa devre gücüdür.

İkinci rezonans türü olan seri rezonans koşulu;

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, f_1 ; temel frekans; f_s ; seri rezonans frekansını; S_t ; transformatör gücünü; S_c ; kondansatör gücü; S_L ; omik yükü; Z_t ; transformatörün per-unit empedansını göstermektedir. Rezonans halinde kondansatör uçlarındaki gerilim devre geriliminin X_c/R katına çıkar. Bu nedenle, rezonans durumunda sistemde arıza asarlar meydana getirebilir.

Rezonansın oluşacağı harmonik bileşeni,

$$n = \frac{1}{2\pi \cdot f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{c1}}{X_{L1}}} \quad (2.9)$$

ile belirlenir.

2.3.2. Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkileri

Kapasitif reaktans değeri harmonik bileşenleri ile azalma gösterir. n . harmonik için kapasitif reaktans,

$$X_{cn} = \frac{X_{c1}}{n} \quad (2.10)$$

olarak belirlenir. Kondansatöre, harmonik bileşenleri olan bir gerilim uygulandığında, hem akım hem reaktif güç değeri artış gösterecektir. Örneğin 3., 5., 7., harmoniklerin bulunması halinde kondansatörden geçen akımın efektif değeri,

$$I_c = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{C3}^2 + I_{C5}^2 + I_{C7}^2} \quad (2.11)$$

olarak hesaplanır. Kondansatör gücü ,

$$Q_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n^2 \quad (2.12)$$

olacaktır. Burada ω_1 temel harmoniğin açısal frekansıdır. Kondansatör gücü,

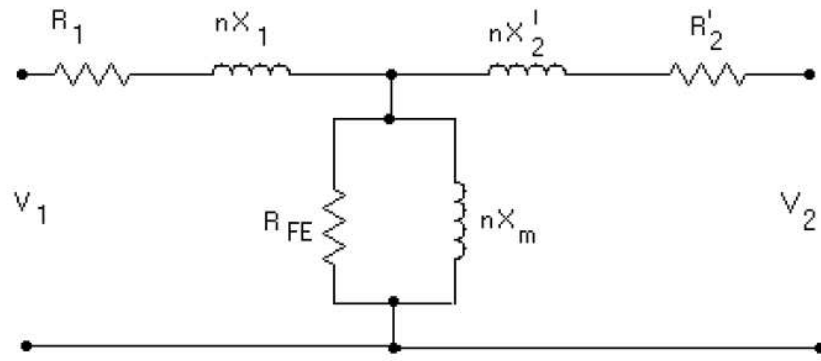
$$Q_c = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \omega_1 \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot V_n^2 \quad (2.13)$$

bağlantısı ile hesaplanır.

Genellikle tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar (Freud, 1988).

2.3.3. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkileri

Akım harmonikleri bakır kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar. Her iki durumda, manyetik çekirdekdeki manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekdeki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişen manyetik alan çelik dilimlerde girdap akımlarını oluşturur. Bu akımlar da ek kayıplara neden olurlar. Kısaca frekans arttikça transformatör kayıplarda artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.



Şekil 2.4 Transformatörün eşdeğer devresi (n. harmonik için)

R_1 primer sargı direncini, X_1 primer sargı kaçak reaktansını, R'_2 primere indirgenmiş sekonder omik direnci, X'_2 primere indirgenmiş sekonder kaçak reaktansını, R_{FE} demir kaybını sembolize eden direnci, X_m mıknatıslanma reaktansını göstermektedir.

Transformatörlerin yük altındaki gerilimleri için, IEEE bir sınır değeri belirlemiştir. Bu standarda göre, THD_I sınırı %5 'tir. THD_V sınırı ise yüksüz durumda %10, anma yükünde %5 tir (Freud, 1988).

2.3.4. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

Harmonik bileşenler içeren bir devrede güç faktörü,

$$PF = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\psi_1}{V_1 \cdot I_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cdot \cos\psi_1 = \mu \cdot \cos\psi_1 \quad (2.14)$$

ile tanımlanır (Arrillaga, vd. 1985). V_1 ve I_1 temel bileşene ait gerilim ve akım değerini göstermektedir. Temel bileşen ya da sinüzoidal durumdaki güç faktörü ($\cos\psi_1$), bir çarpanla (I_1 / I_{ef}) çarpıldığında güç faktörünü verecektir. I_1 / I_{ef} değeri birden küçük olacağı için güç faktörü değeri de $\cos\psi_1$ 'den daha düşük olacaktır.

BÖLÜM 3

HARMONİKLİ BÜYÜKLÜKLERİN GİDERİLMESİ

Harmoniklerin olumsuzlukları öncelikle tasarımda daha sonra da devreye bağlanan elemanlarla giderilmeye çalışılır. Lineer olmayan elemanların bulunduğu devreye bağlanan ve istenen harmonik bileşenlerin giderilmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir. Filtreler aktif ve pasif filtreler olarak iki gruba ayrılır. Pasif filtrelerin amacı ayarlandığı frekans ya da frekanslarda rezonans meydana getirerek, harmonik bileşen akımlarını toprağa ileterek harmonik bileşenlerin giderilmesini sağlar.

3.1. Tasarım Aşamasında Alınabilecek Önlemler

Daha başlangıçta harmonik bileşenleri gidermek amacıyla, bazı önlemler alınabilir. Bu önlemler devre elemanlarının imali veya bunların bağlanması esnasında alınır.

3.1.1. Jeneratörlerde alınabilecek önlemler

Senkron jeneratörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şekli indüklenen elektromotor kuvvetini belirler. Eğer manyetik alan sinüzoidal ise indüklenen elektromotor kuvveti de sinüzoidal olacaktır. Yuvarlak rotorlu senkron makinelerde sinüzoidal olmayan alan eğrisinin sinüs eğrisine yaklaştırmak için kutup oluklarının 2 / 3 ‘u sarılır ya da sarım adımları birbirlerinden farklı olan sarım tipi kullanılır.

3.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler

Doğrultucularda darbe sayısı p ise, harmonik mertebesi $n=k.p\pm 1$ formülü ile bulunur. Bu formülde k=1, 2, 3...gibi tam sayılardır. Darbe sayısının artırılması ile küçük

dereceli harmoniklerin giderilmesi mümkündür. Dönüştürücülerde $n=5, 7, 11, 13$ olduğu için, harmonik akımları $I_5 = I_1 / 5$ ve $I_7 = I_1 / 7$, gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçük olur.

3.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler

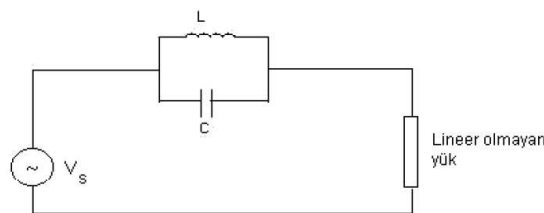
Büyük transformatörlerde manyetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeni ile mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır.

3.2. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, adından da anlaşılacağı üzere endüktans, kapasite ve omik direnç gibi pasif elemanlardan meydana gelir. Kaynak ile alıcı arasına konularak temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri yok eder. Pasif filtrede amaç, gidermek istenen harmonik bileşene ait frekans değerinde L ve C elemanlarının rezonansa gelmesini sağlamaktır. Pasif filtreler devreye seri ve paralel olarak bağlanırlar.

3.2.1. Seri filtreler

Seri filtreler harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanır. Seri filtreler harmonik akışına yüksek bir empedans gösterir. Bu yüzden seri filtrenin ayarlı frekanslarda yüksek empedansa sahiptir. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için sadece o ayarlı frekans bileşenine yüksek empedans gösterir.

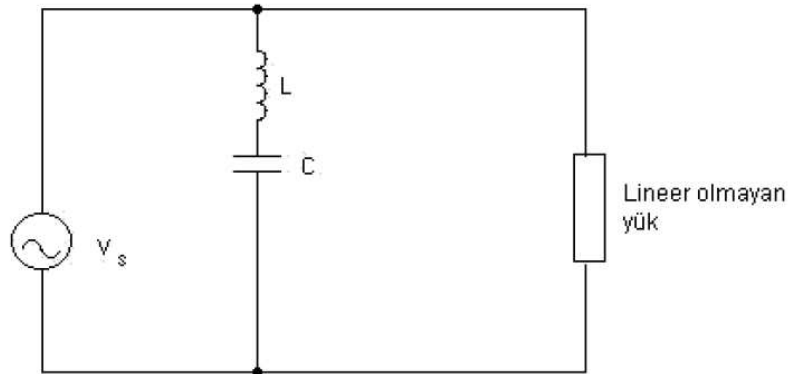


Şekil 3.1 Seri filtrenin devreye bağlanması

Seri filtreler tek fazlı sistemde 3. harmoniğin baskın olduğu uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük dezavantajı yük akımını taşımalarının gerekliliği ile hat gerilimi için yalıtılmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur.

3.2.2. Şönt filtreler

Şönt filtreler harmonik kaynağına paralel bağlanırlar. Giderilmek istenen harmonik frekansında düşük bir empedans elde edilerek istenmeyen harmonik akımlarını toprağa aktarılır. Şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanır. Ayrıca şönt filtreler güç faktörünü düzeltmede de kullanılabilirler. Şönt filtreler seri filtre gibi sadece ayarlı oldukları frekansta etkilidirler.

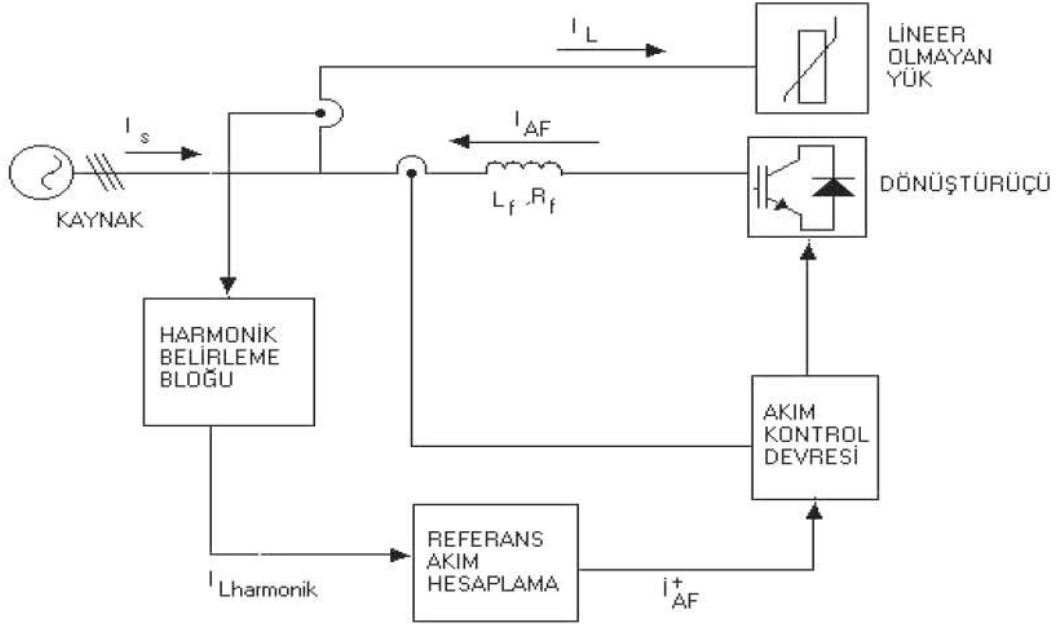


Şekil 3.2 Şönt filtrenin devreye bağlanması

3.3. Aktif Filtreler

Aktif güç filtresinin çalışması, sisteme yükün ürettiği harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akım enjekte edilmesi prensibine dayanır. Güç elektroniği elemanları kullanılarak gerçekleştirilir. Temel olarak aktif güç filtresi, şebekeye bir dijital kontrolörle bağlı standart bir dönüştürücüden oluşur. Akım veya gerilimdeki harmonik bozulmayı tanımlamak için ilave bir kontrol bloğu mevcuttur. Aktif filtreler pasif filtrelerle nazaran kaynak empedansına daha az bağlıdır. Yük değişimlerinde sadece kontrolör yeniden programlanmalıdır. Aktif güç filtresi,

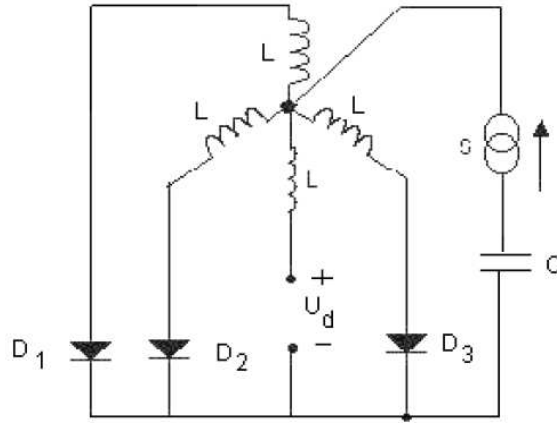
dönüştürücü, akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere üç kısımdan oluşur. Şekil 3.3 'te aktif güç devresinin prensip şeması gösterilmiştir (Gonzales, 1987).



Şekil 3.3 Aktif güç filtresine ait blok şeması

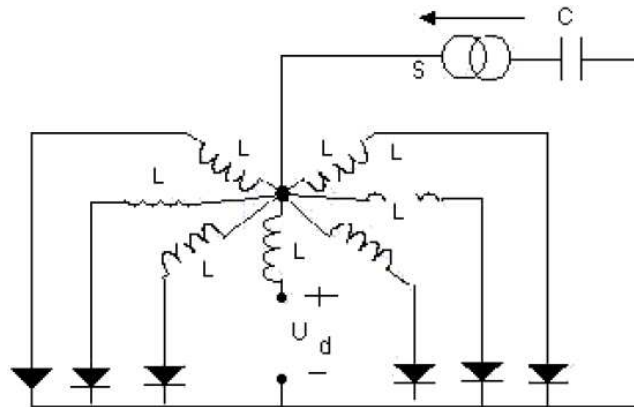
3.4. Harmonikli Akım Enjekte Yöntemi İle Harmoniklerin Giderilmesi

Üçüncü harmonik bileşen akımları enjekte edilerek harmonik bozulma azaltılabilir (Arrillaga, Bradley ve Bodger, 1985). Genelde bu yöntem konverter girişine harmonikli akım enjekte edilerek gerçekleştirilir. Üç ve üçün katı harmonikli akımlar sisteme enjekte edilerek harmonik bozulma düşürülür. Üçüncü harmonik bileşen akımı sisteme enjekte edildiğinde sistemdeki 7. harmonik bileşeni büyük oranda giderilir. Dokuzuncu harmonik akımı enjekte edildiğinde ise yüksek harmoniklerin elimine imkânı vardır (Murray, 1975). Aşağıda çeşitli şekillerde harmonik enjeksiyon yöntemleri verilmiştir.



Şekil 3.4 Üç fazlı yarım dalga doğrultucuda harmonik akım enjeksiyonu

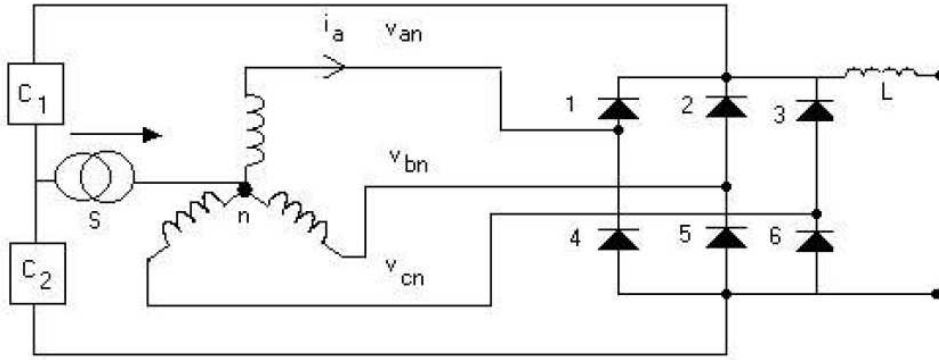
Şekil 3.4' te gösterildiği gibi konverter çıkıştan alınan harmonikli akım, giriş nötr noktasına enjekte edilerek bozulmayı azaltma yoluna gidilmiştir (Baird ve Arrilaga 1980). Burada, C harmonikli akım enjekte devresine ait kondansatörü, S, üzerinden harmonikli akımın enjekte edildiği transformatörü göstermektedir. Bu devrede çıkıştan alınan harmonikli akım kondansatör ve transformatör üzerinden, yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun nötr noktasına enjekte edilir. Bu yolla kontrolsüz yarım dalga doğrultucunun giriş akımı harmonik bozulma azaltılır.



Şekil 3.5 Çapsal (Diametrical) doğrultucuda harmonik enjeksiyon devresi

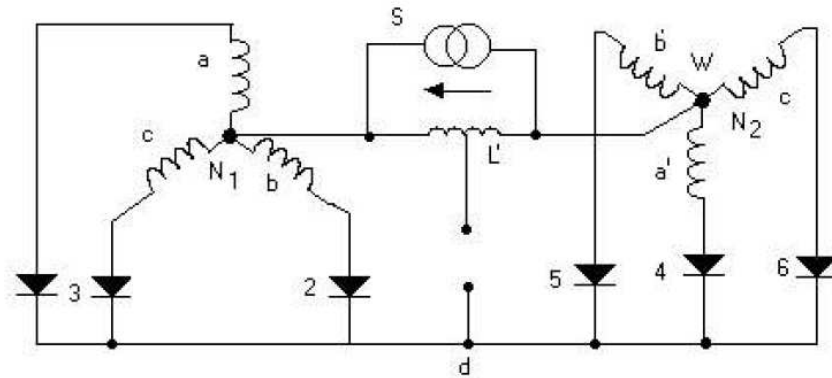
Şekil 3.5' te üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyon yöntemi ile doğrultucu giriş akımı harmonik bozulmanın düşürülmesine ait bağlantı

şeması verilmiştir. Bu doğrultucu tipinde harmonikli akım C kondansatörü ve S transformatörü üzerinden kontrolsüz doğrultucunun nötrüne girişine enjekte edilir. Enjekte devresinin kontrolsüz doğrultucu ile bütünleşmiş bir biçimde çalışması gerekir. Bu devrelerde kullanılan L endüktansı düzeltme reaktörü olarak adlandırılır.



Şekil 3.6 Üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyonu

Şekil 3.6'da üç fazlı tam dalga kontrolsüz bir doğrultucuda harmonik akımını enjekte ederek bozulmanın azaltılmasına ait şema verilmiştir (Baird ve Arrilaga 1980). Bu devrede iki adet akım enjekte devresi vardır. Çıkıştan alınan harmonikli akım enjekte devreleri yardımı ile kontrolsüz doğrultucu nötr noktasına enjekte edilir. Bu yolla kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bozulma azaltılır.



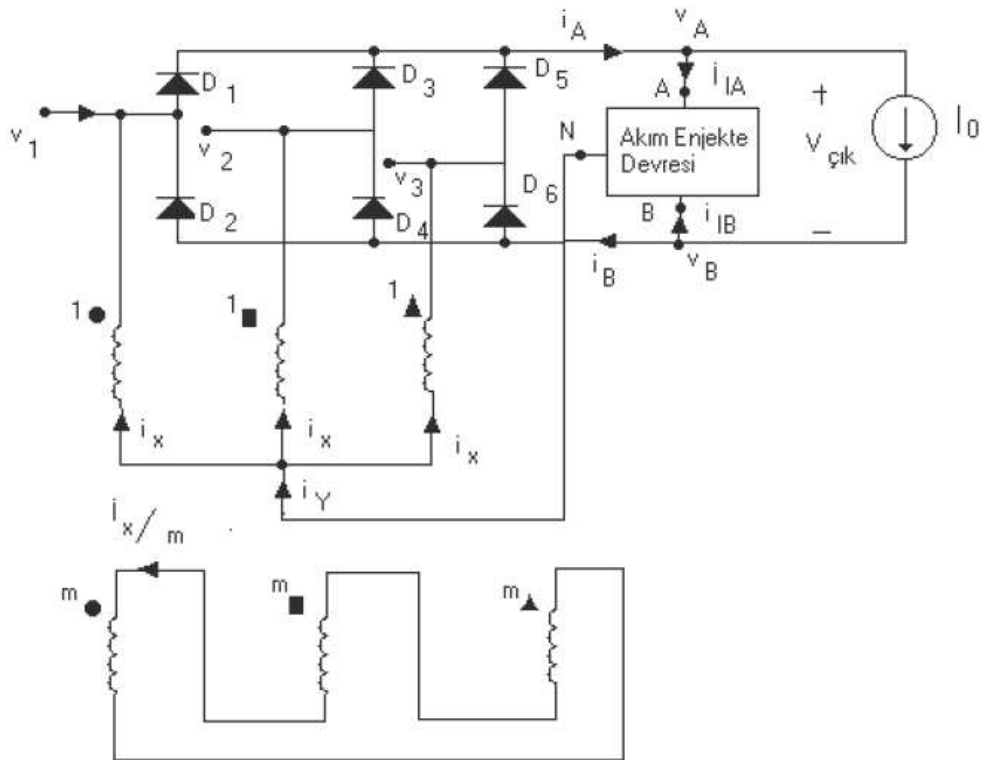
Şekil 3.7 Altı fazlı yıldız bağlı trafo üzerinden beslenen doğrultucu

Sekonderi çift yıldız bağlı altı fazlı kontrolsüz bir doğrultucuda nötr noktalarına harmonik akımı enjekte ederek bozulmanın azaltılmasına ait prensip şeması

verilmiştir. Harmonikli akım endüktansa paralel bağlanmış bir transformatör üzerinden enjekte edilmektedir. Bu devrede transformatör yerine manyetik bir devre de bağlanabilir (Baid ve Arrillaga, 1980).

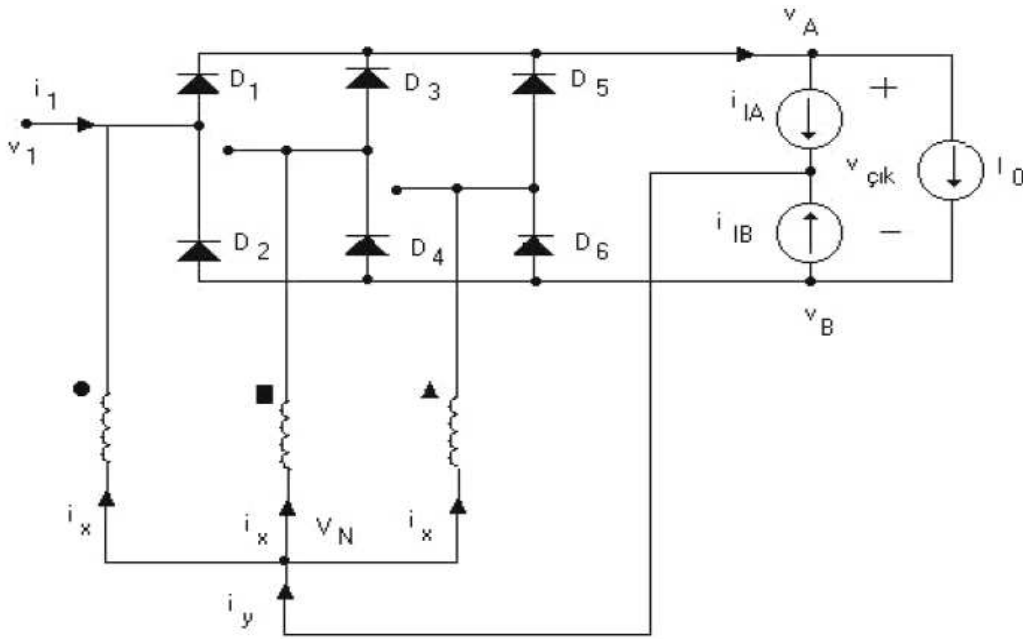
3.4.1. Tam dalga kontrolsüz doğrultucuda üçüncü harmonik bileşen akımını enjekte ederek harmonik bozulmanın azaltılması (Pejovic ve Janda,1999)

Üçüncü harmonik akımının, üç fazlı doğrultucunun girişine enjekte edilmesi ile akıma ait harmonik bozulma değerinde azalmalar olur. Bu yöntemi büyük güçlü doğrultucuların güç faktörünü iyileştirmede, anahtarlamalı sistemlerde ve çıkış geriliminin kontrolünde de kullanma imkânı vardır. Şekil 3.8 'de üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda üçüncü harmonik akımını enjekte etmeye ait devrenin prensip şeması verilmiştir.



Şekil 3.8 Üç fazlı doğrultucuda üçüncü harmonik akımının enjekte ait devre.

Şekil 3.8’ de üç fazlı tam dalga doğrultucu ile harmonikli akım enjekte eden sisteme ait bağlantı şeması verilmiştir. Bu devreler yardımı ile giriş akımının toplam harmonik bozulmayı (THD) iyileştirme imkânı vardır. Harmonikli akım enjekte sistemi, akım enjekte şebekesi ile aygıtlarını kapsamaktadır. Üç fazlı tam dalga doğrultucu çıkışına bağlı olan harmonikli akım şebekesinden alınan i_y akımının doğrultucu girişine enjekte edilmesi ile giriş akımı harmonik bozulma azaltılır. Harmonik akım enjekte şebekelerinden alınan i_y akımı eşit değerde doğrultucu girişine enjekte edilen üç adet i_x akımının toplamından oluşmaktadır. Akım enjekte işlemi, üç fazlı yüksüz sekonderi üçgen bağlı bir transformatör üzerinden uygulanır. Sekonderi ise zigzag bağlı bir oto transformatör veya manyetik bir devre olabilir. Devre basitleştirilecek olunursa şekil 3.9’da bağlantı şeması elde edilir.



Şekil 3.9 Üç fazlı doğrultucuya harmonikli akım enjekte etmeye ait devre

Harmonikli akım enjekte etmekle toplam harmonik bozulmada bir iyileşme sağlanır. Bu devre ile toplam harmonik bozulma değeri % 5.125 düşürülebilmektedir. Harmonikli akımı daha iyi dağıtarak bu değer daha da düşürülebilir. Analizde yüksek harmonikli akımların etkisi dikkate alınmayabilir. Harmonikli akım enjekte şebekesi üçlü harmoniklerden oluşmaktadır.

3.4.2. Bozulma azalmasının analitik olarak incelenmesi (Pejovic ve Janda, 1999)

Giriş akımının bozulmasının azaltılmasında akım enjekte devresi 2 adet bağımsız akım kaynağından oluşur. Akım kaynaklarının akımları $i_A > 0$ ve $i_B > 0$ değerleri için köprü doğrultucu iletim modundadır. Üç fazlı doğrultucunun simetrik dengeli üç fazlı bir gerilim sistemine bağlı olduğunu kabul edelim. Bu durumda gerilim ifadeleri,

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= V_m \sin(\omega_0 t) \\ v_2 &= V_m \sin(\omega_0 t - 120) \\ v_3 &= V_m \sin(\omega_0 t - 240) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır. D_1, D_3, D_5 diyot grubu yüksek gerilime bağlı, D_2, D_4, D_6 diyot grubu da alçak gerilime bağlı diyot gruplarıdır. Doğrultucu giriş akımı fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$i = \begin{cases} -i_x(\omega_0 t) & 0 < \omega_0 t < 30^\circ \\ -i_x(\omega_0 t) & 150^\circ < \omega_0 t < 210^\circ \\ -i_x(\omega_0 t) & 330^\circ < \omega_0 t < 360^\circ \\ i_A(\omega_0 t) - i_x(\omega_0 t) & 30^\circ < \omega_0 t < 150^\circ \\ -i_B(\omega_0 t) - i_x(\omega_0 t) & 210^\circ < \omega_0 t < 330^\circ \end{cases} \quad (3.2)$$

Doğrultucu girişine enjekte edilen faz akımı,

$$i_x = \frac{1}{3} i_Y \quad (3.3)$$

dir. Nötr noktasındaki gerilimin değeri,

$$v_N = \frac{1}{3}(v_1 + v_2 + v_3) = 0 \quad (3.4)$$

Buna karşılık köprü doğrultucu iletimde olduğu zaman, üç fazlı kontrolsüz doğrultucu çıkışı gerilim ifadeleri (v_A ve v_B) fourier serisine açılımı,

$$v_A = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t) \quad (3.5)$$

şeklinde olacaktır. Fourier katsayılarını hesaplırsak,

$$v_A = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{9n^2 - 1} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right)$$

$$v_A = V_{A,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{A,n} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$v_A = V_{A,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{A,n} (\omega_0 t) \quad (3.6)$$

ve

$$v_B = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(-\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{9n^2 - 1} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right)$$

$$v_B = V_{B,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{B,n} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$v_B = V_{B,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{B,n} (\omega_0 t) \quad (3.7)$$

Harmonik bileşenlerinin (n), tek değerleri için genlik ifadesi,

$$V_{A,n} = V_{B,n} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{1}{9n^2 - 1} \cdot V_m \quad (3.8)$$

şeklinde bulunur.

3.4.3. Enjekte edilecek en uygun akım değeri

Aşağıda yapılacak analiz işleminde, i_{IA} ve i_{IB} akım değerleri akım kaynağı tarafından üretilen akımlardır. Bu akım değerleri eşit değerlerde olup, akımı frekansları temel bileşen frekansının 3 katına sahiptirler. Enjekte edilen akımlar, enjekte devreleri tarafından üretilmekte olup, üç fazlı doğrultucunun girişine üç fazlı transformatör üzerinden verilirler.

φ açısı v_A ve v_B gerilimleri tarafından enjekte edilen akımın faz açısıdır. Şekil 3.9' a göre, doğrultucu çıkış akımları i_A ve i_B 'nin değerleri ,

$$i_{IA} = i_{IB} = -kI_0 \sin(3\omega_0 t - \varphi) \quad (3.9)$$

$$i_A = I_0 + i_{IA} \quad (3.10)$$

ve

$$i_B = I_0 - i_{IB} \quad (3.11)$$

dir. Doğrultucunun her fazına enjekte edilen akım,

$$i_x = \frac{1}{3}(i_A - i_B) \quad (3.12)$$

olacaktır. Böylece enjekte edilen akım çıkış akımları cinsinden ifade edilmiş olur .

3.4.4. Akım enjekte edildikten sonra, üç fazlı doğrultucu giriş akımı harmonik bozulması

Doğrultucu giriş akımı toplam harmonik bozulmasını hesaplamak için iki temel büyüklüğe ihtiyaç vardır. Birincisi, harmonikli akım doğrultucu girişine enjekte edildikten sonraki doğrultucu giriş akımı efektif değeri ile temel bileşen akımın efektif değeridir. Doğrultucu giriş akımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$I = \frac{i}{I_0} = \begin{cases} \frac{2}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 0^\circ < \omega_0 t < 30^\circ \\ " & 150^\circ < \omega_0 t < 210^\circ \\ " & 330^\circ < \omega_0 t < 360^\circ \\ 1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 30^\circ < \omega_0 t < 150^\circ \\ -1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 210^\circ < \omega_0 t < 330^\circ \end{cases} \quad (3.13)$$

Bu tanım aralığına ait giriş akımının efektif değeri,

$$I = \frac{1}{3} \sqrt{k^2 + 6} \quad (3.14)$$

Temel dalgaya ait, giriş akımının efektif değeri,

$$I_1 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{3}{2} (k^2 (9 - 8(\cos\varphi)^2) + 16k\cos\varphi + 64)} \quad (3.15)$$

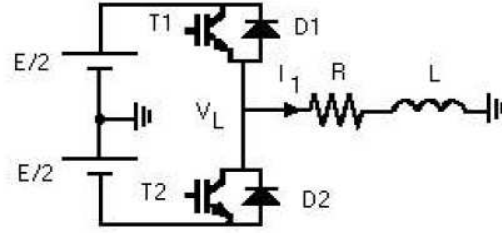
olarak bulunur. Giriş akımına ait toplam harmonik bozulma (THDI) değeri aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\text{THD}(k, \varphi) = \frac{\sqrt{I_{\text{RMS}}^2 - I_{1\text{RMS}}^2}}{I_{1\text{RMS}}} \quad (3.16)$$

k 'nın optimal değeri, toplam harmonik bozulma (THD₁) değerini minimum yapar.

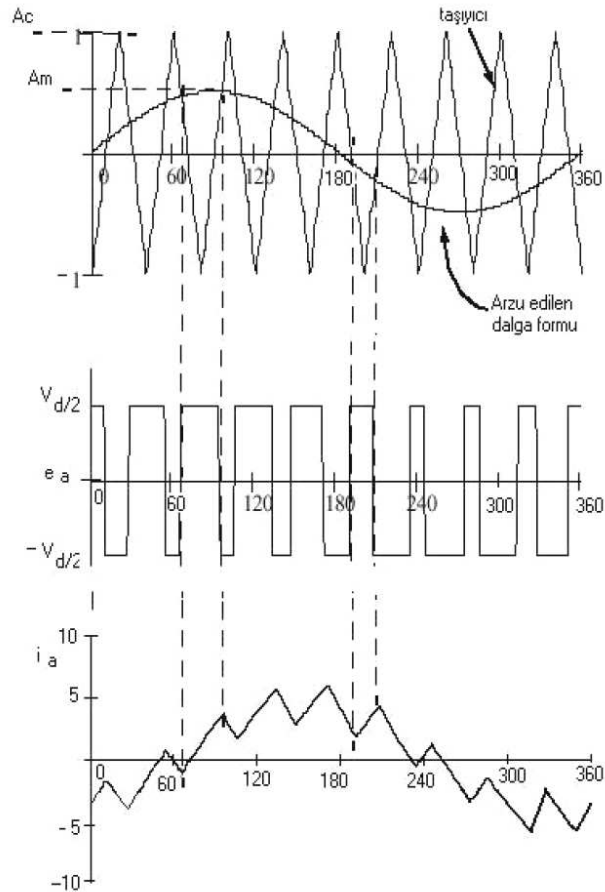
3.5. Genlik Darbe Modülasyonu (PWM) Yöntemi İle Harmonik Giderme

İnverter (DA/AA) dönüştürücülerinin çalışma prensibinde sistemde anahtarlamalara gerek vardır. Basit yaklaşımla doğru akımı alternatif akıma dönüştürmede her periyotta anahtarlamalara gerek vardır. Uygun anahtarlama ile kare dalga elde edilir. Sürekli yapılan anahtarlama sonucunda, elde edilen dalgada birçok harmonikler bulunur (Bimbhra, 1997).



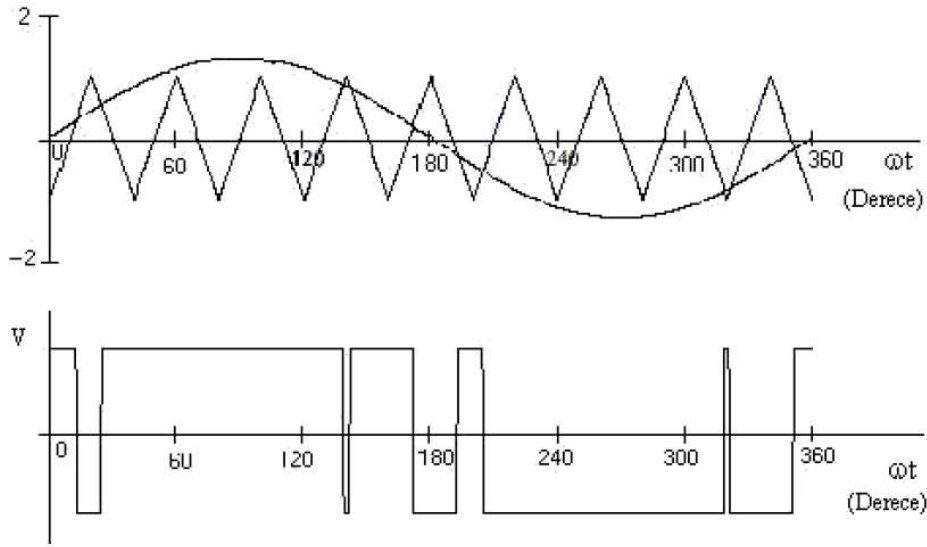
Şekil 3.10 Basit invertöre ait prensip şeması

E doğru gerilim kaynağı, T_1, T_2 gerilim ile kontrol edilen alan etkili transistörlerdir. R ve L yükü sembolize etmektedirler. İnvörtörde ana amaç, çıkış geriliminin değişiminin sinüs dalgası uymasıdır. Uygun tetikleme açıları ile kıyılmış kare dalga, tam kare dalgaya göre daha az harmonik içerir.



Şekil 3.11 Darbe genlik modülasyonunun prensip şeması

Modüle edilecek bir sinüzoidal dalganın genliği A_m ve taşıyıcı üçgen dalganın genliği A_c olsun. Bunların oranı $m = A_m/A_c$ oranına modülasyon endeksi adı verilir. Giriş akımının genliği bununla kontrol edilir. Modülasyon endeksini büyük tutarsak, aşırı modülasyonlu bir durum ortaya çıkar. Çıkış eğrisinin dalga formu sinüs eğrisi dalga formuna yaklaşır. Bu nedenle Şekil 3.12’ de gösterildiği gibi çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerin filtrelenmesini sağlar.



Şekil 3.12 Aşırı modülasyonlu PWM ($m=1.3$)

3.6. Harmonikli Akım Veya Gerilim Barındıran Sistemlere Ait Matematiksel Tanımlamalar

Harmonikli akım veya gerilim barındıran elektrik sistemlerinde, sinüzoidal akım ve gerilim barındıran sistemlerden farklı olarak bir takım farklı matematiksel tanımlamalar yapılması gerekmektedir. Bunların en önemlileri,

1. Distorsiyon Gücü (D),
2. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)'dir.

Bunlar en çok kullanılan tanımlamalardır. Bunlar dışında çok kullanılmayan fakat mevcut olan tanımlamalar ise,

1. Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD),
2. Toplam Talep Distorsiyonu (TDD),
3. Şekil (Form) Faktörü (f k),
4. Tepe (Crest) Faktörü,
5. Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

3.6.1. Distorsiyon gücü (D)

Akım ve gerilimi sinüsoidal biçimde olan lineer bir devrede güçler arasında,

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.17)$$

şeklini alır. Ancak harmonikli akım veya gerilim içeren sistemlerde güç ifadeleri arasında,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.18)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Buradaki D bozulma faktörünü ifade eder ve

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (3.19)$$

şeklinde bulunabilir.

3.6.2. Toplam harmonik distorsiyonu (THD)

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD), akım ve gerilim için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Gerilim için,

$$THD_v = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.20)$$

şeklindedir.

Akım için ise;

$$\text{THD}_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir.

Akım ve gerilim için tanımlanan THD değerleri genel olarak yüzde cinsinden ifade edilirler. (3.20) ve (3.21) denklemlerinden elde edilen sonuçlar 100 ile çarpılarak sistemin THD değerleri yüzde cinsinden ifade edilir. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüzoidal dalga için THD değeri sıfırdır.

3.6.3. Tekil harmonik distorsiyonu

Harmonik mertebesi n olan gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonu,

$$\text{HD}_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.22)$$

$$\text{HD}_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.23)$$

şeklinde tanımlanır.

3.6.4. Toplam talep distorsiyonu

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak,

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.24)$$

şeklinde tanımlanır.

3.6.5. Şekil (form) faktörü

Şekil faktörü, sinüzoidal olmayan bir dalga için,

$$k_f = \frac{\text{Efektif Değer}}{\text{Ortalama Değer}} \quad (3.25)$$

olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüzoidal bir dalganın bozulma ölçütünü veren bir ifadedir.

3.6.6. Tepe (crest) faktörü

Sinüzoidal olmayan akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Tepe (Crest) Faktörü,

$$\text{Tepe faktörü} = \frac{\text{Tepe değer}}{\text{Tepe bileşen efektif değeri}} \quad (3.26)$$

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

3.7. Harmonik Standartları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerinin miktarını sınırlamak maksadıyla kullanılan iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan birincisi; IEC (International Electrotechnic Commission) tarafından da tercih edilen herhangi bir lineer olmayan yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem; ise IEEE (Institute Of Electrical And Electronics Engineers) tarafından benimsenen, birden fazla lineer olmayan yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

IEC tarafından öngörülen sınırlama mantığında, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlamalar için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça çelişmektedir. IEEE tarafından öngörülen sınır ölçütleri hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görülmektedir.

Çeşitli ülkeler tarafından çeşitli gerilimler için harmoniklerin sınır değerleri THD (Toplam Harmonik Distorsiyonu) olarak Tablo 3.1'de verilmiştir.

IEEE' nin gerilim için harmonik standartları Tablo 3.2'de, akım için harmonik standartları Tablo 3.3'de verilmiştir. Bu tablolarda,

I_{kd} : Sistemin kısa devre akımı,

I_L : Yüke ait maksimum talep akımı,

TTD : Toplam talep bozulmasıdır.

Tablo 3.1. Ükelere göre uluslar arası toplam gerilim harmonik standartları

ÜLKE	GERİLİM (kV)		THDv (%)
A.B.D.	Genel	2,4 - 69	5
		115<	1,5
	Özel	2,4 - 69	8
		115<	1,5
ALMANYA	Tüm Gerilimler (15. Harmoniğe Kadar)		10
AVUSTURALYA	Dağıtım	33<	5
	İletim	22 - 33 - 66	3
		110<	1,5
FİNLANDİYA	1		5
	20		4
	30 - 45		3
	110		1,5
FRANSA	Tüm Gerilimler		1,6
İNGİLTERE	0,415		5
	6,6 - 11		4
	33 - 66		3
	132		1,5
İSVEÇ	0,43 - 0,25		4
	3,3 - 2,4		3
	84<		1

Tablo 3.2. IEEE tekil ve toplam gerilim harmonik standartları

Bara Gerilimi (kV)	Tekil Harmonik Büyükülüğü (%)	Toplam Harmonik Distorsiyonu (%)
$V < 69$	3	5
$69 < V < 161$	1,5	2,5
$V > 161$	1	1,5

Ülkemiz açısından harmonik standart değerlere bakıldığında bu konuda sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş TS 9882 nolu “Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar” adlı standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektriksiz donanımlar; pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir aletler, ışık kısıcılar ile radyo ve televizyon alıcılarıdır. TS 9882 standardı,

ev ve benzeri yerlerdeki bu elektrik donanımının besleme sisteminde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metotlarına aittir.

Tablo 3.3. IEEE akım harmonik standartları

V < 69 kV						
İ _{kd} / IL	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 < h	TTD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 - 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 - 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 - 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20
69 < V < 161 kV						
< 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 - 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 - 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 - 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
V > 161 kV						
< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,5	0,22	4

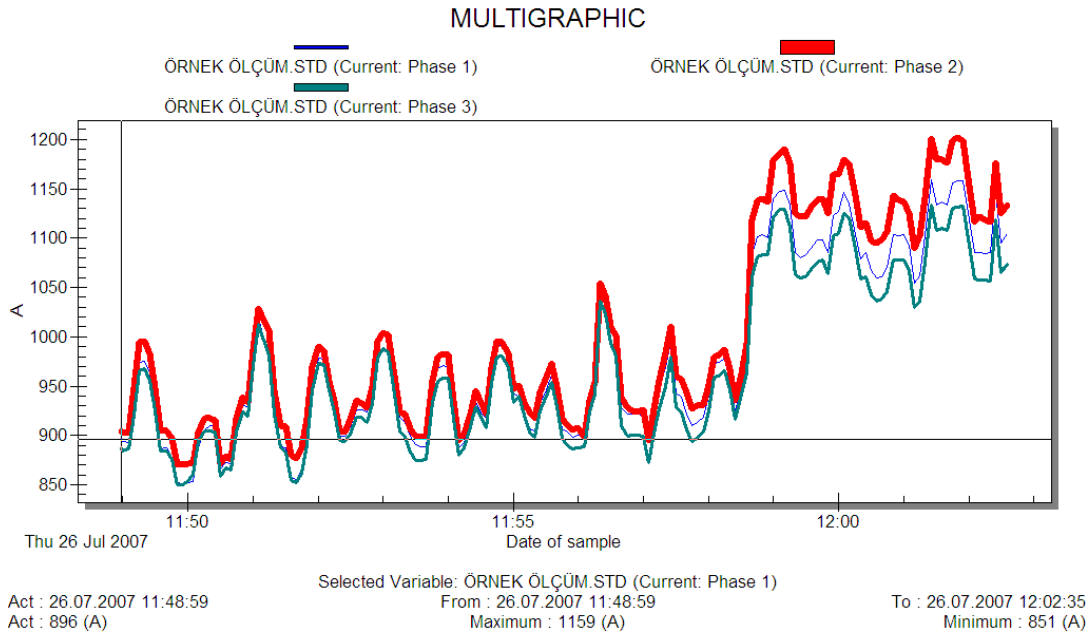
BÖLÜM 4

SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde, örnek olarak alınan bir elektrik enerji sistemi üzerine, pasif filtre, kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlanarak sistemin bu filtreye karşı cevabı incelenmiştir. Bu inceleme; sistemin akımı, gerilimi, akıma ve gerilime ait THD değerleri, çekilen toplam aktif güç değerleri kullanılarak harmonik analizi ve simülasyon yapılmıştır.

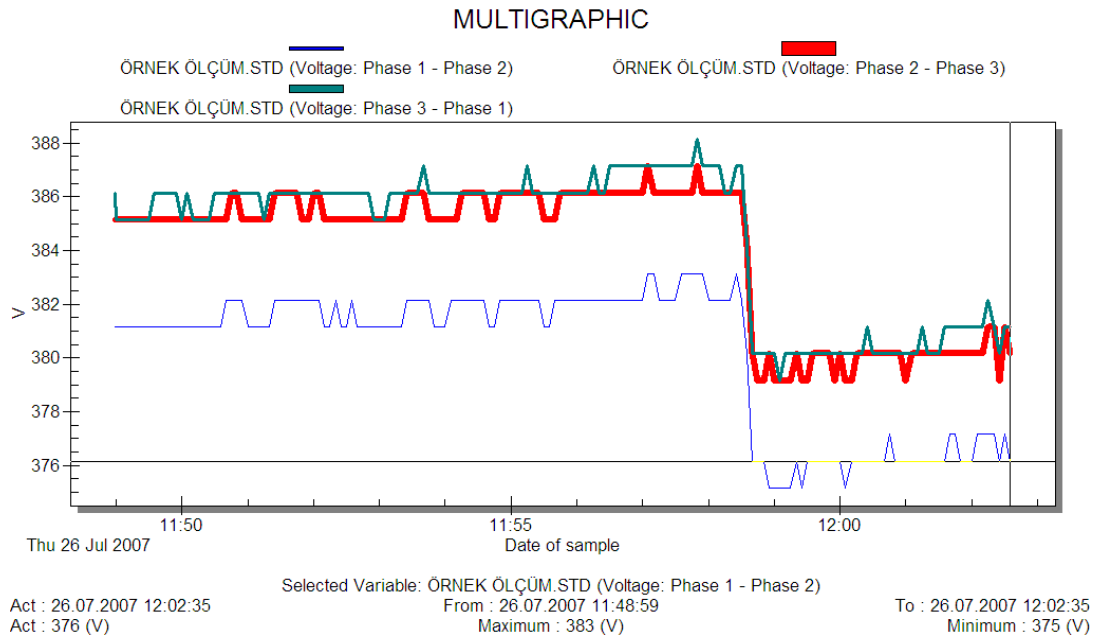
4.1. Örnek Sistem

Yapılan ölçüm verilerine göre Şekil 4.1' de görüldüğü üzere filtresiz kompanzasyon devrede iken 950 A akım çekilmekte, filtresiz kompanzasyon devredışı bırakıldığında akım 1150 A değerlerine ulaşmaktadır.



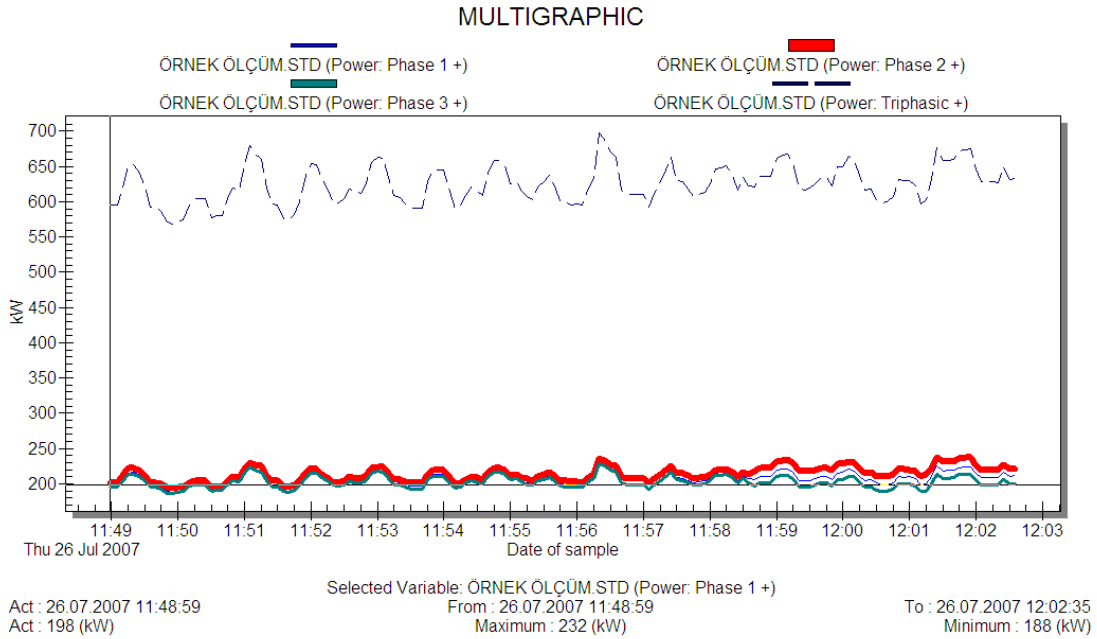
Şekil 4.1 Örnek ölçüm akım grafiği

Gerilim Şekil 4.2’de görüldüğü gibi nominal 385 V değerindedir.



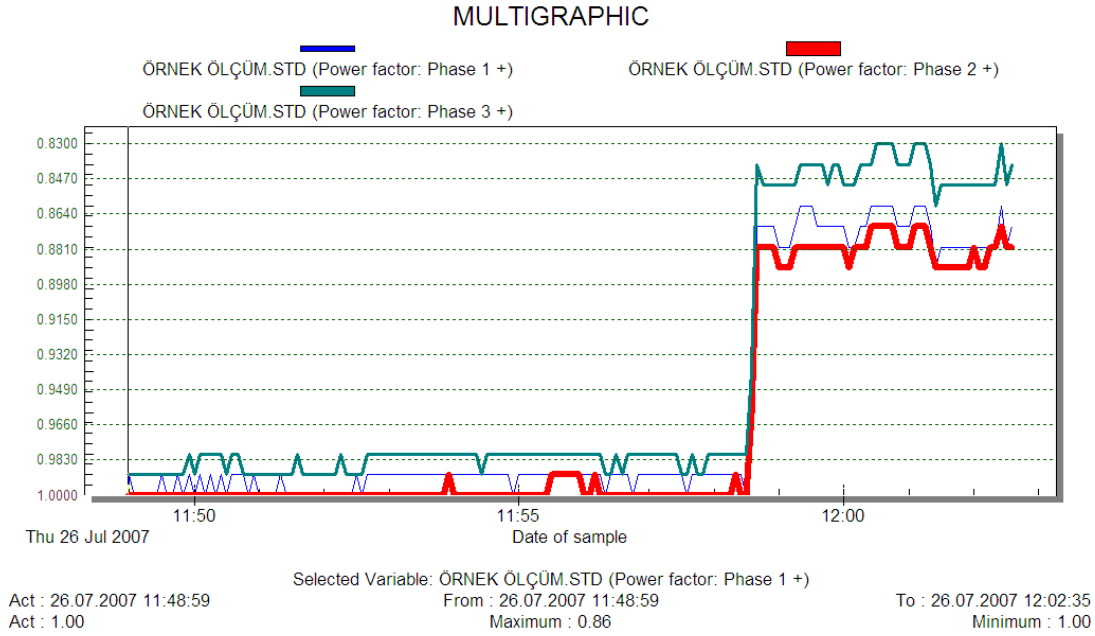
Şekil 4.2 Örnek ölçüm gerilim grafiği

Tüketilen aktif güç toplamı Şekil 4.3’teki gibi 650 kW seviyelerindedir.



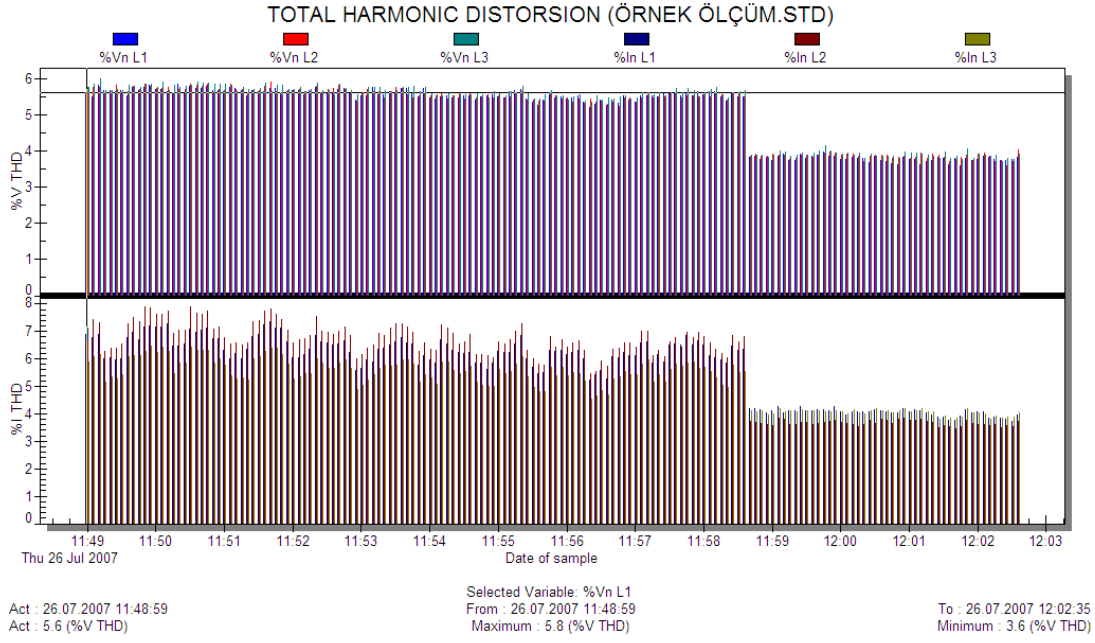
Şekil 4.3 Örnek ölçüm aktif güç değişim grafiği

Tesisin 400 kVA $\cos\phi=0.90$ olan 6 darbeli sürücüleri ile 300 kW $\cos\phi=0.80$ olan AC motor ve yükleri bulunmaktadır. Tesis genel güç faktörü ise Şekil 4.4'te görüldüğü üzere 0.86 endüktif olmaktadır.



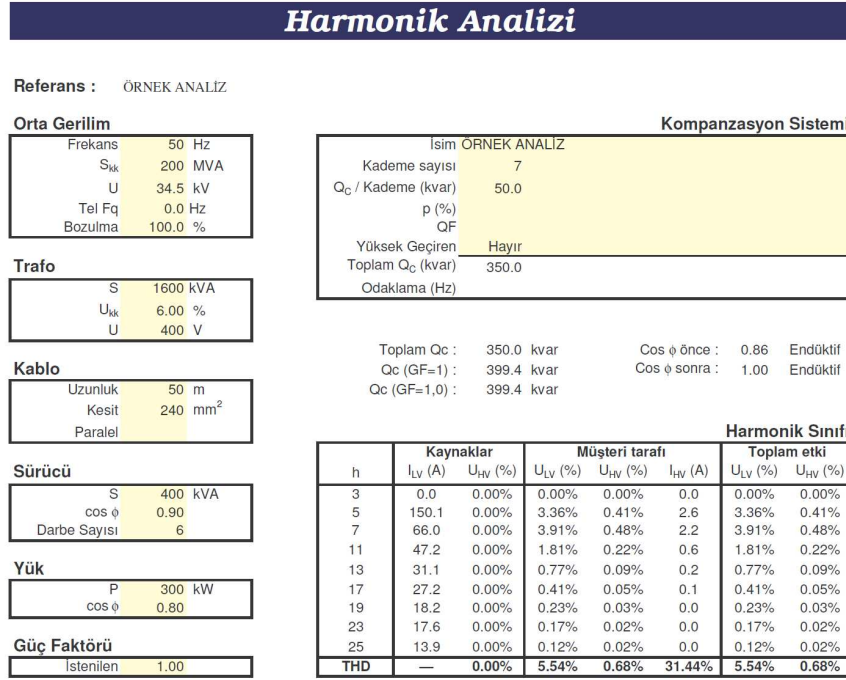
Şekil 4.4 Örnek ölçüm güç faktörü değişim grafiği

Bu değerlere göre Şekil 4.5'da harmonik seviyeleri, 6 darbeli sürücüleri olması sebebi ile filtresiz kompanzasyon devrede iken THDV= % 5.9, THDI = % 7.2 olmaktadır. Ölçülen harmonik seviyeleri uluslar arası standartlara (IEC) göre yüksek değerlerdedir. Şekil 4.5'da görüldüğü üzere filtresiz kompanzasyon devredışı bırakıldığında harmonik seviyeleri THDV= % 3.6, THDI = % 4.2 değerlerine düşmektedir. Harmonik seviyeleri, filtresiz kompanzasyon devrede iken baz alındığında yüksek çıkmakta, bu nedenle filtreli kompanzasyon yapılması gereklidir.



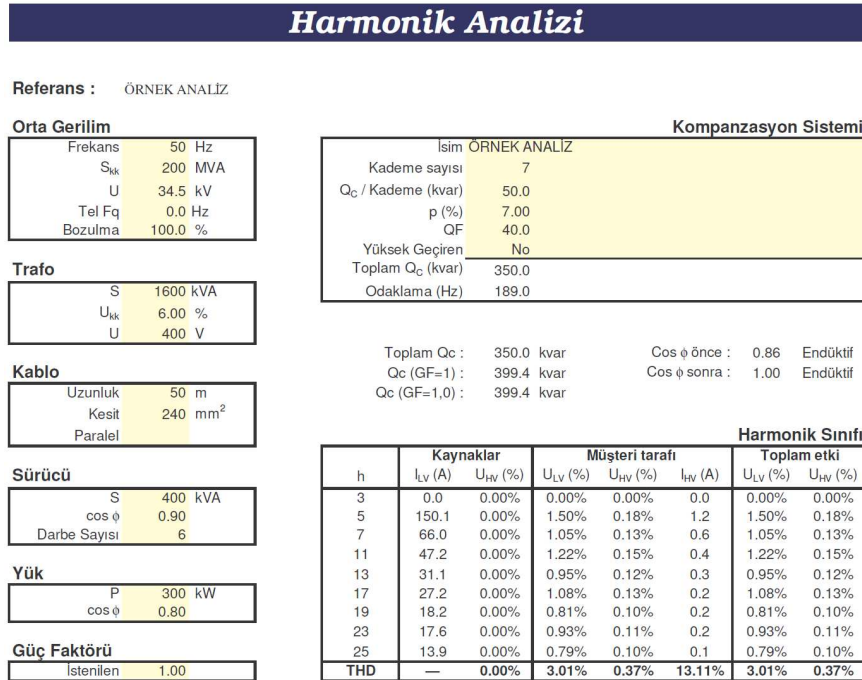
Şekil 4.5 Örnek ölçüm harmonik değişim grafiği

Şekil 4.6' de simülasyon ile bu değerler girildiğinde ölçüm değerlerine yakın harmonik seviyeleri ortaya çıkmaktadır. Yapılan ölçüm değerlerinde ve harmonik analizinde baskın olarak 5. ve 7. harmonikler ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple filtreleme yapılabilmesi için 5. harmonik (250 Hz) ve 7. harmonik (350 Hz) değerlerine yakın odaklama frekansı yapılmak zorundadır. Genel olarak 5. harmonik için yapılacak en uygun odaklama frekansı 189 Hz odaklama frekansıdır.

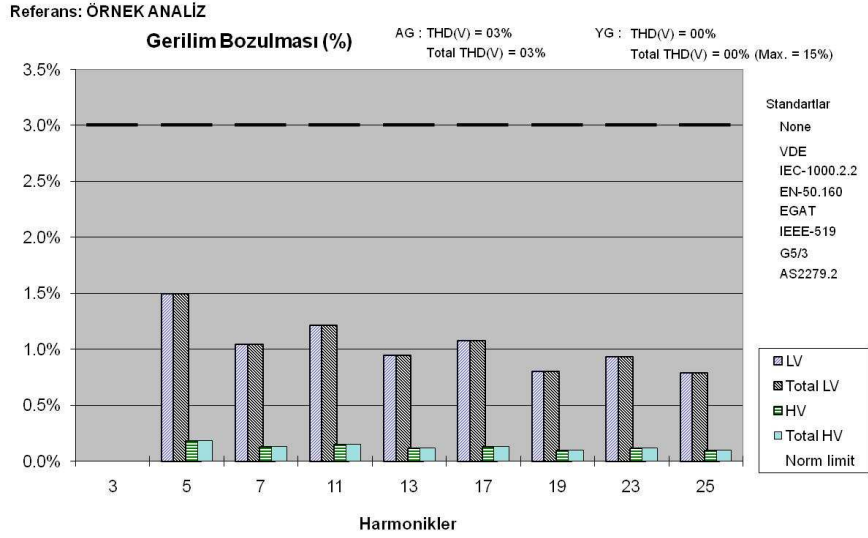


Şekil 4.6 Harmoniklerin simülasyon yöntemi ile analizi (filtresiz kompanzasyon olması hali)

Şekil 4.7' de yapılan tam odaklı olmayan pasif filtre ile harmonik değerleri sınır değerlerin (IEC standartlarına göre) altına düşürülmüştür.



Şekil 4.7 Harmoniklerin simülasyon yöntemi ile analizi (pasif filtreli kompanzasyon olması hali)



Şekil 4.8 Gerilim harmonik mertebeleri (pasif filtreli kompanzasyon olması hali)

Tam odaklı olmayan pasif filtrenin yapılabilmesi için kondansatör ve harmonik filtre reaktörün sırası ile kapasite ve endüktansları Şekil 4.8’da hesaplanmıştır. 50 kVAr kondansatör kademesi için $L=0.766$ mH endüktans değerine sahip reaktör ile, $C=925$ μ F kapasiteli kondansatör seri bağlanarak, tesise paralel entegre edilmelidir.

Referans : ÖRNEK ANALİZ

Ünite Adı			
189 Hz odaklı filtre			
Characteristics			
Tip	Tam odaklanmamış		
Nr kademeler	7		
Q_C / kademe (kvar)	50.0		
Toplam Q_C (kvar)	350.0		
ρ (%)	7.00		
Q-Faktör	40.0		
I_n (A)	72.2		
Odaklama (Hz)	189.0		
Devre elemanları (1 kademe için)			
L (mH)	0.7667		
R_l (Ω)	none		
C (μ F)	925.1		
Kondansatör akımları [A] (1 kademe için, %10 aşırı yük ile birlikte)			
I1	79	110%	
I3	0	0%	
I5	7	9%	
I7	2	3%	
I11	1	2%	
I13	1	1%	
I17	1	1%	
I19	0	1%	
I23	0	1%	
I25	0	0%	
RMS	80	110%	
Doyma akımı	110	153%	
Kondansatör gerilimi [V] (aşırı yüklenme olmaksızın)			
RMS	430.2		
Tepe / $\sqrt{2}$	441.3		

Şekil 4.9 Pasif filtre devre elemanları seçimi (pasif filtreli kompanzasyon olması hali)

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Lineer olmayan yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüzoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda lineer olmayan yük göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıp ve THD değerlerinin yüksek değerlere varması kaçınılmazdır. Lineer olmayan yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik bozulmanın giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir.

Elektrik enerjisine olan talep miktarının sürekli artması, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ve bunu gerçekleştirmek için bazı kriterlerin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Bu kriterlerin en önemlilerinden biri de sistemde dolaşan harmonik bileşenlerdir. Enerji tesislerindeki harmonikler konusunda bize bir ölçüt veren toplam harmonik bozulmanın azaltılması ve eliminasyonu bu çalışmada incelenmiştir.

Lineer olmayan elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler.

Enerji tesisinin güvenilir ve kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamak için, tasarım ve işletme aşamasında lineer olmayan elemanların veya sinüzoidal olmayan kaynakların meydana getirdiği harmonik büyüklüklerinin hesaplanarak veya ölçülerek ortaya konması gerekir.

Lineer olmayan yüklerin sebep olduğu harmonik güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşenler için ayrı,

ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklardan enjekte edilen harmoniklerin olması durumunda, bunlar şebekeyi herhangi bir bileşeni yada bileşenler için rezonanslar oluşturacak şekilde etkiler.

Yüksek dereceli harmonikler, tüm sistemi etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır.

Elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulma sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanılmalarının artması ile bu kirlilik oranı daha çok artmaktadır. Güç elektroniği elemanları ve çeşitli lineer olmayan elemanların her geçen gün artış göstermesi, enerji sisteminde dolaşan sinüzoidal olmayan büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, akım ya da gerilim için harmonik bozulma da artmaktadır. Böylece çeşitli harmonik problemlerinin analizi için, harmonik seviyesinin hesaplanması ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir. Böylelikle daha kaliteli, daha güvenli ve daha ekonomik bir enerjinin elde edilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] KOCATEPE, C. UZUNOĞLU, M. KARAKAŞ, A. ARIKAN, O. “Elektrik Tesislerinde Harmonikler ”, Kasım 2003
- [2] <http://www.hzeeland.nl/~pfondse/homepage.htm>; FONDSE P.J. “ Fourier Analyse ”, Mayıs 2006
- [3] IEEE Std 518-1982 (Reaff 1992), IEEE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Noise Inputs to Controllers From External Sources (ANSI).
- [4] ARRILLAGA, J., BRADLEY, D.A., and Bodger, P.S., Power System Harmonics. New York: John Wiley & Sons, Wiley Interscience, 1985.
- [5] BAGGOT, A. J., “The Effects of Waveshape Distortion on the Measurement of Energy by Tariff Meters,” International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, England, Apr. 22-24,1974, pp. 261-267.
- [6] BALL, W. C. and Poarch, C. K., “Telephone Influence Factor and Its Measurement,”NEE Transactions on Communications and Electronics, vol. 79, Jan. 1961, pp. 659-664.
- [7] CHRISTENSEN, E. F., et al., “Analysis of Rectifier Circuits,” AIEE Transactions, vol. 63, 1944, pp. 1048-1058.
- [8] CONCORDIA, C., “Selection of Buffer Reactors and Synchronous Condensers on Power Systems
- [9] Supplying Arc-Furnace Loads,” AIEE Transactions, vol. 76, pt. 11, July 1957, pp. 123-135.
- [10] CUMMINGS, P. G., “Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors,” IEEE nansactions on Industry Applications, Nov./Dec. 1986,r- pp. 1121-1126.
- [11] FAUCETT, M. A. and KEENER, C. A., “Effect of Harmonics on Watthour Meter Accuracy,”Electrical World, Oct. 27, 1945, pp. 82-84.
- [12] FRANK, H. and Landstron,Capacitors,” ASEA Journal, vol. 44, 1971, pp. 180-184.B., “Power Factor Correction with Thyristor-Controlled

- [13] GRAHAM, A. D. and Schonholder, E.T. "Line Harmonics of Converters With DC Motor Loads," IEEE Transactions on Industry Applications, Jan./Feb. 1983, pp. 84.
- [14] "Inductive Coordination Aspects of Rectifier Installations," Committee Report, NEE Transactions, vol. 65, 1946, pp. 417-436.
- [15] Power Vision v1.7c CIRCUTOR S.A., OCAK 2002
- [16] ABB NETQ Harmonic Analysis, 2005

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek lisans öğrencisi Halis Emre ÇALIŞKANER, 1984 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini 100.Yıl Ali Rıza Efendi İlköğretim Okulu'nda birincilikle tamamladıktan sonra lise öğrenimini 2001 yılında Maltepe Süper Lisesi'nde devam ederek dereceyle bitirdi. 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünü kazanarak, 2005 yılında bu bölümden mezun oldu. Mezuniyetinden sonra EMEDA Mühendislik 'te araştırma-geliştirme mühendisi olarak işe başladı. 2006 yılında SAN-EL Mühendislik' e geçerek proje ve satış mühendisi olarak işe başladı ve halen burada çalışmaktadır.