

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AKTİF HARMONİK FİLTRE
UYGULAMASI İLE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİNİN DÜZENLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ETHEM ORUCU

DENİZLİ, OCAK - 2020

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AKTİF HARMONİK FİLTRE
UYGULAMASI İLE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİNİN DÜZENLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ETHEM ORUCU

DENİZLİ, OCAK - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

ETHEM ORUCU tarafından hazırlanan “**ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AKTİF HARMONİK FİLTRE UYGULAMASI İLE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİNİN DÜZENLENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 02.01.2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK



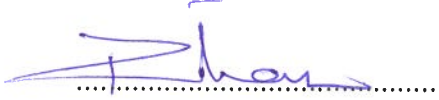
.....

Üye
Doç. Dr. Engin ÇETİN



.....

Üye
Dr. Öğretim Üyesi Remzi İNAN



.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~29/01/2020~~ tarih ve ~~05/24~~.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



.....

Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



ETHEM ORUCU

ÖZET

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AKTİF HARMONİK FİLTRE UYGULAMASI İLE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİNİN ARTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ETHEM ORUCU

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, OCAK - 2020

Bu tez çalışmasının amacı; elektrik şebekesinde doğrusal olmayan karakteristikteki sistem bileşenlerinin meydana getirdiği enerji kalitesizliği problemi olan harmoniklerin, aktif harmonik filtreler ile söndürülerek güç sistemi kalitesinin artırılıp, elektrik enerjisinin daha güvenli ve verimli kullanılmasını sağlamaktır. Bu bağlamda; enerji yoğun bir endüstriyel tesisin enerji güç kalitesi, enerji analizörü ile analiz edilmiştir. Sonrasında işletmedeki enerji kalite problemlerini gidermek için, bir Aktif Harmonik Filtre çözümü önerilmiştir. Web tabanlı PQF-Size yazılımı ile ABB PQFI-M45 Aktif Harmonik Filtre sisteminin benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasının sonuçlarına göre; ilgili işletmenin harmonik problemlerinin ortadan kaldırıldığı sonucuna varılmıştır. Böylece, işletmenin enerji kalitesinde iyileştirme gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Harmonikler, güç kalitesi, aktif harmonik filtre, ABB PQF-Size yazılımı.

ABSTRACT

INCREASING THE ELECTRICAL POWER QUALITY IN INDUSTRIAL FACILITIES BY ACTIVE HARMONIC FILTER APPLICATION

**MSC THESIS
ETHEM ORUCU**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, JANUARY 2020

The aim of this thesis is to provide the usage of electricity in much more safe and efficient way by using active harmonic filters which reduce the harmful effects of harmonic distortions by usage of the system equipment with nonlinear characteristics. In this respect; in a facility which has a big energy consumption density, analysis of the energy quality has been done. After that; to eliminate the energy quality problems in that facility, an Active Harmonic Filter solution was suggested. With web-based PQF-Size software, ABB PQFI-M45 Active Harmonic Filter system was simulated. According to the simulation results, it was concluded that harmonic problems in the relevant factory were eliminated. Thus, an improvement in the energy quality of the facility was observed.

KEYWORDS: Harmonics, power quality, active harmonic filter, ABB PQF-Size software.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	1
1. GİRİŞ	2
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Literatür Özeti	3
1.3. Hipotez	6
2. GÜÇ KALİTESİ KAVRAMLARI VE HARMONİKLER	7
2.1. Nonsinusoidal Dalga F36ormları.....	8
2.1.1 Fourier Analizi	8
2.1.1.1 Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT)	9
2.1.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)	10
2.1.2 Nonsinusoidal Dalga Formlarında Simetri Kavramları	10
2.1.2.1 Çift Simetri.....	11
2.1.2.2 Tek Simetri.....	11
2.1.2.3 Yarım-Dalga Simetrisi.....	12
2.1.3 Toplam Harmonik Distorsiyon (THD).....	12
2.1.4 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)	13
2.2. Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Elemanlar ve Harmonik Kaynakları	13
2.2.1 Harmonik Kaynakları	16
2.2.1.1 Dönüştürücüler	17
2.2.1.2 Transformatörler.....	18
2.2.1.3 Generatörler	20
2.2.1.4 Ark Ocakları.....	20
2.2.1.5 Statik VAR Kompanzasyon Sistemleri	21
2.2.1.6 Fotovoltaik Sistemler.....	22
2.3. Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri	22
2.3.1 Generatör ve İndüksiyon Motorları Üzerindeki Etkileri	23
2.3.2 Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	24
2.3.3 Enerji İletim Sistemleri ve İletkenler Üzerindeki Etkileri.....	25
2.3.4 Koruma Şalterleri ve Devre Kesiciler Üzerindeki Etkileri.....	25
2.3.5 Röleler ve Ölçüm Cihazları Üzerinde Etkileri.....	25
2.3.6 Elektronik Elemanlar ve Kartlar Üzerindeki Etkileri.....	26
2.3.7 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri	26
2.3.8 Rezonans Etkisi.....	27
2.3.9 Harmonik Standartları	28
3. HARMONİKLERİN FİLTRELER İLE ELİMİNASYONU	29
3.1. Pasif Filtreler	29
3.1.1 Seri Pasif Filtreler	29
3.1.2 Paralel Pasif Filtreler	30

3.2.	Aktif Filtreler.....	31
4.	AKTİF HARMONİK FİLTRELER.....	33
4.1.	Seri Aktif Filtre.....	35
4.2.	Paralel Aktif Filtre	36
4.2.1	Paralel Aktif Filtrelerin Matematiksel Modellemesi.....	37
4.3.	Filtre Tasarımı	38
5.	HARMONİK ÖLÇÜMÜ VE AKTİF FİLTRE SİMÜLASYONU	40
5.1.	Tesis Analizi.....	40
5.2.	Harmonik Ölçümleri ve Analizi	43
5.2.1	Harmonik Ölçümleri	43
5.2.1.1	Boyahane Fideri	44
5.3.	Tesisin PQF-Size ile Benzetimi.....	58
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	62
7.	KAYNAKLAR	64
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Temel sinusoidal dalga formu (elektrikstok.com).....	7
Şekil 2.2: Zaman ve frekans domeninde Fourier Dönüşümü (Ekrem 2019).....	9
Şekil 2.3: Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) sinyali.....	10
Şekil 2.4: Çift simetri dalga formu.....	11
Şekil 2.5: Tek simetri dalga formu.....	11
Şekil 2.6: Yarım-Dalga simetrisi.....	12
Şekil 2.7: Lineer eleman akım/gerilim dalga formu	14
Şekil 2.8: Doğrusal olmayan eleman akım/gerilim dalga formu	14
Şekil 2.9: Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlinear yük.....	15
Şekil 2.10: Nonsinüsoidal şebekeye bağlı lineer yük.....	16
Şekil 2.11: 6 darbeleri konverter devre şeması	18
Şekil 2.12: Doyum noktasındaki transformatörün akım dalga formu (Ahmed ve diğ. 2013).....	19
Şekil 2.13: Tristör kollu reaktör devre şeması	21
Şekil 3.1: Seri pasif filtre temel prensip şeması.....	30
Şekil 3.2: Paralel pasif filtre temel prensip şeması	31
Şekil 3.3: Aktif filtre çalışma prensibi	32
Şekil 4.1: Bağlantı şekillerine göre aktif harmonik filtre devre şemaları (Rüstemli ve diğ. 2013).....	34
Şekil 4.2: Seri aktif filtre (Aktif Güç Filtresi) devre bağlantı şeması (Akmaz 2012)	35
Şekil 4.3: Paralel aktif filtre (Aktif Güç Filtresi) devre bağlantı şeması (Akmaz 2012)	36
Şekil 5.1: Küçüker Tekstil OG tek hat şeması	41
Şekil 5.2: Harmonik analizi için kullanılan Güç Kalite Analizörü	43
Şekil 5.3: Boyahane ana dağıtım panosu, kompanzasyon panosu ve fider barası	44
Şekil 5.4: Boyahane fideri harmonik ölçümü anlık görüntü (akım harmoniği).....	45
Şekil 5.5: Boyahane fideri harmonik ölçümü anlık görüntü (gerilim harmoniği)	45
Şekil 5.6: Boyahane fideri frekans grafiği.....	46
Şekil 5.7: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-nötr)	46
Şekil 5.8: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-faz).....	47
Şekil 5.9: Boyahane fideri akım grafiği.....	48
Şekil 5.10: Boyahane fideri akım ve gerilim harmonik grafiği	49
Şekil 5.11: Boyahane fideri gerilim harmonik bileşenleri.....	51
Şekil 5.12: Boyahane fideri gerilim harmonik bileşenleri bar grafiği.....	52
Şekil 5.13: Boyahane fideri frekans grafiği_2	53
Şekil 5.14: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-nötr)_2.....	53
Şekil 5.15: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-faz)_2	54
Şekil 5.16: Boyahane fider akım grafiği_2.....	55
Şekil 5.17: Boyahane fideri akım-gerilim harmonik grafiği_2.....	55
Şekil 5.18: Boyahane fideri gerilim harmonik bar grafiği_2.....	56
Şekil 5.19: Paralel Aktif Harmonik Filtre'nin bağlanacağı tesisin yük karakteristiği şematiği.....	58
Şekil 5.20: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre	59
Şekil 5.21: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda akım dalga formu	60
Şekil 5.22: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda gerilim dalga formu.....	60

Şekil 5.23: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda akım harmonikleri....61
Şekil 5.24: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda gerilim harmonikleri 61

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Kaynak ve yüke göre harmonik bileşenler	15
Tablo 2.2: IEC 61000-2-4 Endüstriyel santraller için THDv limitleri.....	28
Tablo 2.3: IEEE Gerilim harmonik limitleri	28
Tablo 4.1: Aktif filtre ile pasif filtre karşılaştırma tablosu.....	34
Tablo 5.1: Kojenerasyon tesisi transformatörleri	42
Tablo 5.2: İşletme transformatörleri	42
Tablo 5.3: Boyahane fideri gerilim ölçüm parametreleri	47
Tablo 5.4: Boyahane fideri gerilim ölçüm parametreleri (faz-faz).....	47
Tablo 5.5: Boyahane fideri akım ölçüm parametreleri	49
Tablo 5.6: Boyahane fideri akım ve gerilim harmonik büyüklükleri	50
Tablo 5.7: Boyahane fideri gerilim harmoniği kademeleri ve büyüklükleri	51
Tablo 5.8: Boyahane fideri gerilim verileri (faz-nötr)_2	54
Tablo 5.9: Boyahane fideri gerilim verileri (faz-faz)_2.....	54
Tablo 5.10: Boyahane fideri akım verileri_2.....	55
Tablo 5.11: Boyahane fideri akım-gerilim harmonik verileri_2	56
Tablo 5.12: Boyahane fideri gerilim harmonik kademeleri_2	57
Tablo 5.13: Akım ve gerilim harmoniği karşılaştırması	58

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	:	Alternatif Akım
AGF	:	Aktif Güç Filtresi
AG	:	Alçak Gerilim
DA	:	Doğru Akım
DFT	:	Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
EPDK	:	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
FFT	:	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
GTO	:	Gate Turn Off Tristor (Kapıdan Kesmeli Tristör)
HVDC	:	High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım)
IEC	:	International Electrotechnic Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	:	Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Edilmiş Kapılı ve İki Kutuplu Transistör)
KVA	:	Kilo Volt Amper (Görünür Güç)
LVNQ	:	Low Voltage Network Quality (Alçak Gerilim Şebeke Kalitesi)
MOSFET	:	Metal Oxide Semi-Conductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarı-iletkenli Alan Etkili Transistör)
OG	:	Orta Gerilim
PFQI	:	Power Quality Filter (Güç Kalite Filtresi)
PCC	:	Point of Common Coupling (Ortak Bağlantı Noktası)
RMS	:	Root Mean Square (Karelerinin Ortalamasının Karekökü)
THD	:	Toplam Harmonik Distorsiyonu
TTD	:	Toplam Talep Distorsiyonu
TZAAR	:	Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi
UPS	:	Uninterruptable Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)
VFD	:	Variable Frequency Driver (Değişken Frekanslı Sürücü)

SEMBOL LİSTESİ

U	:	Generatör Gerilimi [V]
λ	:	Güç Faktörü
cosϕ	:	Güç Katsayısı
P_h	:	Histeresis Kaybı [W]
Hz	:	Hertz
F(w)	:	Periyodik Dalganın Fourier Açılım Fonksiyonu
f(w)	:	Ters Fourier Dönüşüm Fonksiyonu
F(k$\Delta\Omega$)	:	Ayrık Fourier Dönüşüm Fonksiyonu
THD_v	:	Toplam Gerilim Harmonik Bozulumu
THD_i	:	Toplam Akım Harmonik Bozulumu
I	:	Akım
I_L	:	Yük Akımı
I_L	:	Yük Akımı
V	:	Gerilim
p(t)	:	Anlık Güç Fonksiyonu
$p_{ak}(t)$:	Şebekeden Çekilen Aktif Güç Fonksiyonu
$i_s(t)$:	Şebekeden Çekilen Akım Fonksiyonu
$i_{boz}(t)$:	Bozulmuş Akım Fonksiyonu

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında; elektrik şebekesinde nonlineer karakteristikte olan devre elemanlarının meydana getirdiği bir enerji kalitesizliği problemi olan harmoniklerin analiz edilerek tanımlanması ve Aktif Harmonik Filtre ile enerji kalitesinde gerçekleşen iyileşmeler gözlemlenip raporlanmıştır.

Yüksek lisans öğrenimim sırasında tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçiminde, yürütülmesi ve sunuma hazırlanması sırasında, değerli bilimsel görüş ve önerilerinden faydalandığım sayın Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu çalışmam boyunca her konuda fedakârlık gösteren, maddi manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisindeki hızlı değişim ve artan endüstriyel ihtiyaçlarla birlikte günden güne artmakta olan enerji talebini karşılayabilmek üzere, tüketiciye sunulan enerji arzının kalitesi oldukça önemlidir. Literatürde “Güç Kalitesi” olarak geçen bu kavram; enterkonnekte şebekenin ihtiyaçları doğrultusunda, belirli standartlar dahilinde takip ve kontrol edilmesi gereken teknik bir meseledir. Kaliteli enerji; elektrik enerjisinin gerilim ve akım değeri, dalga formları ve faz simetrisinin kabul edilebilir limitlerde olması ile mümkündür.

Elektrik Piyasası'nın serbestleştirilmesi, piyasa katılımcılarının kurulum yapacakları güç santrallerindeki üretim çeşitliliği ve bu kurulumların rekabet ortamında ekonomik kaygılarla birlikte enerji üretim kalitesinin de çeşitliliğine sebep olması, tüketim noktalarında yarı-iletken teknolojisinin yoğunlaşması, ağır sanayide darbeli yüklerin artması gibi etkilerden dolayı güç kalitesi stratejik bir konu haline gelmiştir.

Endüstride kabul edilmiş bir gerçek olan “Ölçülemeyen ve izlenemeyen parametreler denetlenemez ve kontrol edilemez” özdeyişi, elektrik enerji kalitesi için de geçerliliğini kanıtlamıştır. Enerji sistemlerinde kaliteyi ölçme, izleme ve denetleme mekanizmasının oluşturulup hayata geçirilmesi; enerji kalitesinin kontrol altına alınmasıyla birlikte, tasarruf ve verimlilik çalışmalarının yapılması hususunda da gelişmelere ve yeniliklere kapı aralayabilecek bir aksiyon olabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında; öncelikle Güç Kalite Analizörü ile bir endüstriyel tesiste enerji kalitesi ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler ışığında, endüstriyel tesisin enerji kalite profili çıkarılmış ve raporlaması yapılmıştır. Bu raporlamalar sonrası, iç şebekedeki harmonik bozulunun derecesi belirlenip, bozucu etkiye sahip yükler yorumlanmış ve bozunum derecesine göre, web tabanlı bir yazılım ile (PQF-Size) Aktif Harmonik Filtre sistem benzetimi yapılmıştır. Aktif harmonik filtre sistemi benzetim çalışması sonrası, endüstriyel tesisin gerilim, akım ve frekans dalga formlarındaki iyileştirmeler raporlanmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada; elektrik şebekesindeki doğrusal olmayan karakteristikli sistem bileşenlerinin neden olduğu bir enerji kalitesizliği konusu olan harmoniklerin güç şebekesinde meydana getirdiği problemlerin tespiti ve bu problemlerin çözümünde uygulanabilecek yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu yöntemler arasında da en verimli sistemler olan Aktif Harmonik Filtre'ler üzerinde benzetim çalışması, analiz ve raporlama yapılmıştır.

Çalışmada, bir endüstriyel tesiste karşılaşılan ve işletmenin sistem bileşenleri üzerinde olumsuz etki oluşturan harmonikler üzerinde yoğunlaşmıştır. İşletmenin harmonik yoğun bölgesi, ana dağıtım panoları üzerindeki analizörlerle tespit edilerek, ilgili fiderde Güç Kalite Analizörü ile detaylı ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilerle, bu fiderin akım ve gerilim harmonik kademeleri ve yük karakteristiği hakkında analiz ve raporlamalar yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, harmonik bozunumun yüksek olduğu fiderin ihtiyacına göre belirlenen Aktif Harmonik Filtre'nin web tabanlı bir yazılım olan PQF-Size ile benzetim çalışması yapıp, gerilim ve akım harmoniklerinin ne derece önlenebileceği tespit edilip analizi yapılmıştır.

Raporlamalar neticesinde, işletmenin enerji kalitesinin artırıldığı gözlemlenmiş ve endüstriyel tesislerde harmoniklerin önlenmesi ve giderilmesi konularında teknik öneriler sunulmuştur.

1.2. Literatür Özeti

Elektrik güç sisteminin operasyonunda en önemli unsurlar elektrik enerjisinin kaliteli, güvenli ve ekonomik üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimidir. Şebekedeki akım, gerilim, güç dengesizlikleri, güç faktörü (λ), frekans, güç katsayısı ($\cos\phi$), harmonikler gibi parametreler ve bunların ölçüm hassasiyetlerinin tespiti, uygulamalara bağlı olarak bazı değişiklikler gösterebilmekle birlikte ilgili EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu) yönetmeliklerine ve TS EN 50160 standardına göre kayıt altına alınmalıdır (Ünlüsoy 2019).

Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde üretim, iletim ve dağıtım sistemleri için belirlenen Sistem Frekansı nominal değeri 50 Hertz (Hz)'dir. Güç sistemine bağlı kullanıcıların kaliteli, güvenli ve ekonomik elektrik enerjisi talebinin karşılanabilmesi için bu nominal 50 Hz. temel frekansının sabit tutulması, güç faktöründe düzenleme yapılması, gerilim ve akım dalga formunun düzgün sinüsodal formda tutulması gerekmektedir (Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği 2001).

Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji ile sistemdeki yükler çeşitlilik kazanmıştır. Son yıllarda oldukça hızlı gelişen yarıiletken teknolojisinin de etkisiyle sistemdeki akım ve gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerde artış görülmüştür. Güç sistemindeki bu doğrusal olmayan yükler, sistemde harmonik akım ve gerilimlerin oluşmasına neden olurlar (Efe 2006).

Harmonik etkiye sebep olan yükler örnek olarak; yarıiletken güç elektroniği devre elemanları, doymuş manyetik devreler, doğrultucu sistemler, transformatörler, kaynak makineleri, ark fırınları, darbeli yükler, UPS ler (kesintisiz güç kaynakları) olarak verilebilir. Doğrusal olmayan bu yükler çok yüksek güçlerde olmasa bile, gerilim dalga formunu bozucu etkiye sahiptir. Özellikle süreç kontrollerinde yoğun olarak kullanılan yarıiletken teknolojisine sahip frekans kontrol üniteleri, rezonans frekansına ulaşmış kompanzasyon sistemlerinde oluşan ani aşırı akım ve gerilimler endüstriyel tesislerde sık karşılaşılan harmonik kaynaklarıdır.

Güç faktörü ve harmonik kompanzasyonu için endüstriyel tesislerde kullanılan en yaygın teknik direnç, endüktans ve kapasitanstan oluşan pasif harmonik filtre uygulamalarıdır (Özdemir ve diğ.). Pasif harmonik filtreler, özel rezonans frekanslarında üretimleri yapılabilmeyle birlikte genellikle piyasada 3. ve 5. harmoniği sönmek üzere 133 Hz, 189 Hz. ve 210 Hz. rezonans frekanslarında üretilip tüketicilere sunulur. Özellikle bu rezonans frekanslarında üretim yapılmasının sebebi, enterkonnekte şebekemizin yük karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.

Enterkonnekte şebeke, aralarında 120 derece faz farkı bulunan 3 fazlı bir sistem olduğu için, 3. harmonik frekansındaki akımlar aynı fazda bulunmaktadır. 120 derece faz farkı bulunan bu akımların vektörel toplamı, birbirini kompanze ederken aynı fazda olan akımlar birbirinin üzerine eklenerek 3 kat fazla akıma sebep olmaktadır.

Endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan VFD (değişken frekans sürücüleri) lerin büyük çoğunluğu 6 darbeli doğrultma devrelerinden oluştuğu için 5. ve 7. harmonik kademeleri sinüsoidal dalganın bozunumunda baskın olmaktadır. 5. harmonik ise sistemde kullanıcı açısından en zararlı harmoniktir. 5. harmoniğin matematiksel gösterimi olan Fourier Serisi'ndeki açılımında negatif işaretli olduğu görülür. Bu da dönüş yönünün faz sırasının tersine olduğunu gösterir. 7. harmonik ise aralarında faz farkı olan ve aynı dönüş yönüne sahip en kuvvetli harmoniktir (3electrotech).

5 ve 7. harmonikler, türbin-generatör sistemlerinde ve elektrik motorlarında mekanik salınımlara neden olurlar. Bu mekanik salınımlar, harmonik akımı ve temel frekans arasındaki etkileşimden meydana gelen manyetik alanlar üzerinde oluşan rezonans frekansının sebep olduğu salınım torklarından meydana gelmektedir (IEEE 1993).

Farklı yük karakteristiğindeki işletme koşullarında 3, 5 ve 7. harmoniklerin dışında da harmonikler meydana gelebilir. Çıkış gerilimindeki dalgalanmanın azaltılması amacıyla 12 darbeli doğrultucular da tercih edilebiliyor. 12 darbeli doğrultucularda, aralarında 30° faz farkı olan iki adet üç fazlı gerilim kaynağı ve 12 adet tristör mevcuttur (Girgin ve diğ.).

Piyasada yaygın olarak kullanılan pasif filtrelerin müdahale aralığı dışındaki harmonikler bu sistemlerin dezavantajlarındandır. Doğrusal olmayan yüklerin pasif olarak filtrelenmesindeki önemli dezavantajlar nedeniyle, güç faktörü ve harmonik kompanzasyonu için Aktif Güç Filtre (AGF) sistemleri geliştirilmiştir (Özdemir ve diğ.).

Aktif filtre, güç elektroniği elamanlarını kullanarak, çok kısa örnekleme zaman aralıklarında tespit ettiği harmoniklerin aynı genlikte tam ters işaretlisini üreterek sisteme aktararak harmonik eliminasyonu ve gerilim regülasyonu sağlar. Aktif güç filtresi bu özelliğiyle her tür yük karakteristiğine uyum sağlayıp gerekli regülasyonu yapabilir. Geleneksel kompanzasyon sistemlerindeki pasif filtrasyon sistemlerindeki rezonans tehlikesi aktif filtre sistemlerinin uygulandığı sistemlerde yoktur. Aynı zamanda sisteme farklı doğrusal olmayan yüklerin eklenmesi ile filtre devresinde değişiklik yapılma gereksiniminin olmaması da aktif filtre uygulamalarının ekonomik ve sürdürülebilir uygulamalar olduğunu göstermektedir (Tuğ ve Yavuz).

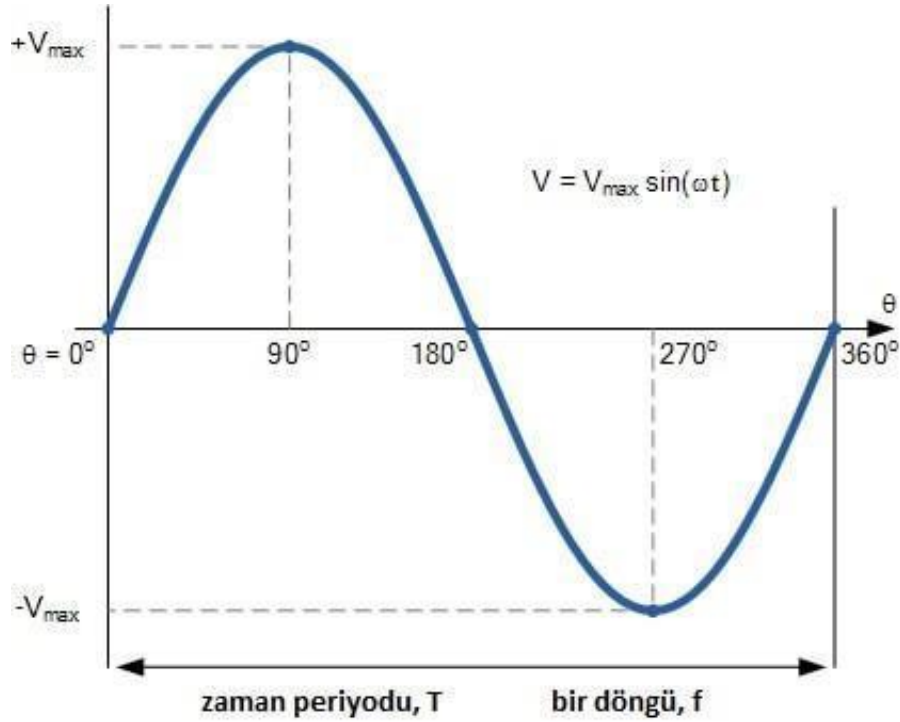
1.3. Hipotez

Elektrik Şebeke sistemlerinde enerjinin; üretim santrallerinden iletim hatlarına transferi, iletim hatlarından dağıtım bölgelerine indirgenmesi ve aktarımı, dağıtım bölgelerinden son tüketim noktasına kadar verimli Şekilde tedariki sağlanıp, son tüketim noktasında da ekonomik ve kaliteli tüketimi, enerji maliyetlerinin birçok parametreye bağlı olarak deđiŐkenlik gösterdiği günümüz Őartlarında oldukça önem arz etmektedir.

Bu çalışmada; elektrik enerjisindeki harmonik bozunumlar hakkında bilgi verilmiŐ olup, bir endüstriyel tesisin harmonik bozunumu analizi edilerek, web tabanlı bir yazılım ile aktif harmonik filtre benzetimi yapılmış ve enerji kalitesinde yapılabilecek iyileştirmeler raporlanmıştır.

2. GÜÇ KALİTESİ KAVRAMLARI VE HARMONİKLER

Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga formu temel frekanslı (50 Hz.) sinüsoidal bir alternasyona (değişim) sahip olmalıdır. Bu forma sahip değişim için, şebeke sinüsoidal bir kaynakla beslenmeli ve yüklerin doğrusal karakteristikte olması gerekmektedir.



Şekil 2.1: Temel sinüsoidal dalga formu (elektrikstok.com)

1960'lara kadar elektriksel yüklerin çoğu lineer yüklerden oluşmaktaydı. Diğer bir deyişle; cihazların çektiği elektrik akımı mükemmel sinüsoidal dalgaya çok yakındı. Bu cihazlar; indüksiyon motorları, bölgesel aydınlatma sistemleri ve çoğunlukla ev aletlerinden oluşmaktaydı. Modern elektroniğin gelişimiyle birlikte, nonlineer karakteristikteki cihazlar ve uygulamalarla birlikte şebeke elektriğinin saf sinüs dalgası nonsinüsoidal forma dönüşmeye başlamıştır. Değişken hız sürücüler, UPS sistemleri, yarıiletken anahtarlama elemanları, elektrik sistemlerindeki başlıca harmonik

kaynaklarıdır. Aynı zamanda uygun koruma sağlanmadığında, bu harmonik bozunumlar elektrik sistemindeki diğer ekipmanlarda ve hatta şebekede olumsuz etkilere sebep olmaktadır (Power Quality and Harmonics 2019).

2.1. Nonsinusoidal Dalga Formları

Generatör veya yük kaynaklı, akım ve gerilim dalga formunun saf sinüsoidal formunun bozulmuş haline nonsinüsoidal dalga formu denir. Harmoniklerin sağlıklı yorumlanabilmesi için nonsinüsoidal dalga formlarının ve sebeplerinin iyi bilinmesi gerekliliği literatürde kabul edilmiş bir gerçektir.

Bozulan bu dalga formlarına, Fourier Analizi olarak bilinen matematiksel analiz yöntemi uygulanarak dalgalar yorumlanabilir.

2.1.1 Fourier Analizi

18. ve 19. yüzyıllarda yaşamış olan Fransız fizikçisi ve matematikçisi Jean Baptiste Joseph Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birden çok sinüsoidal dalgaların toplamından meydana geldiğini, başka bir deyişle; sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları değişik (temel dalga frekansı 50 Hz' in tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini hesaplayarak göstermiştir (Sucu 2003).

Fourier Serisi'nin elde edilme işlemi, dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanabilir. Periyodik dalga fonksiyonları Fourier Serisi'ne açıldıklarında, birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir.

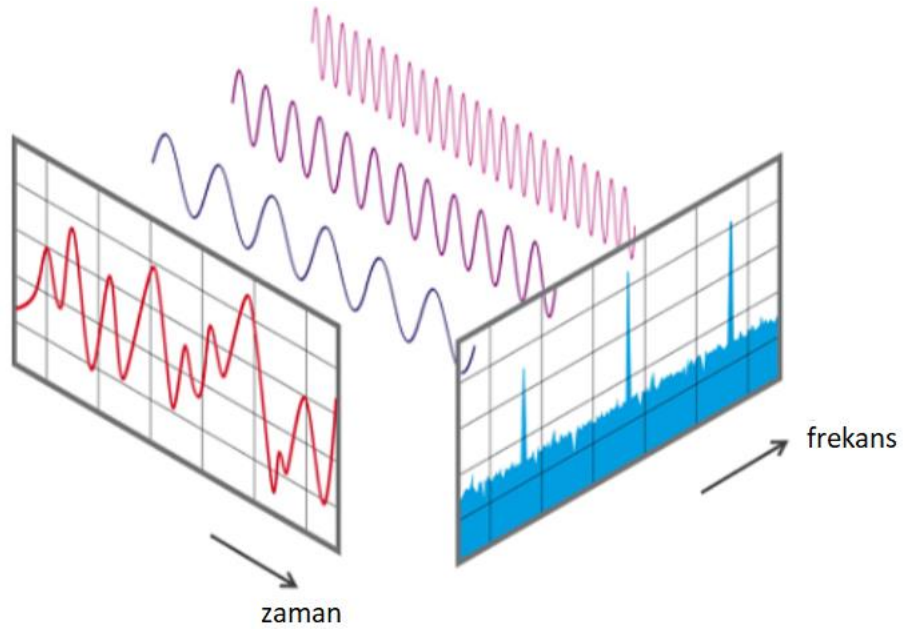
Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü,

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

biçiminde tanımlanır ve $F(w)$ 'nin ters Fourier dönüşümü,

$$f(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{-jwt} dt \quad (2.2)$$

Bu denklemler, Fourier Dönüşüm Çifti olarak adlandırılır ve bu dönüşüm analizinin avantajı hem zaman hem de frekans domeninde fonksiyonu ve dalga şeklini inceleme fırsatı sunmasıdır. Zaman domeninde verilen bir fonksiyon (2.1.1) eşitliği ile frekans domenine, frekans domeninde verilen bir fonksiyon ise (2.1.2) eşitliği ile zaman domenine dönüştürülür.



Şekil 2.2: Zaman ve frekans domeninde Fourier Dönüşümü (Ekrem 2019)

2.1.1.1 Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT)

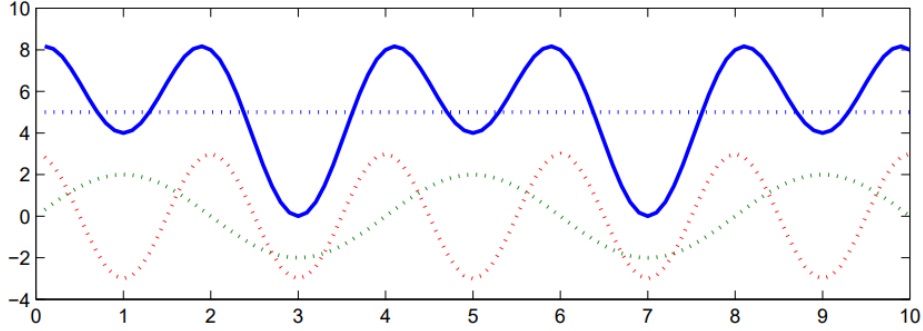
Sayısal değerlendirmeye en uygun Fourier dönüşümüdür. Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda sürekli elde edilebildiği için, DFT harmonik ölçümlerinde sıklıkla kullanılır. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerinin zaman domeni serisi olarak gösterilir.

Ayrık Fourier Dönüşüm çifti formülleri aşağıdaki gibidir:

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.3)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.4)$$

$$f(t) = \underbrace{5}_{\text{dc}} + \underbrace{2 \cos(2\pi t - 90^\circ)}_{1\text{Hz}} + \underbrace{3 \cos 4\pi t}_{2\text{Hz}} \quad (2.5)$$



Şekil 2.3: Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) sinyali

2.1.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Hızlı Fourier Dönüşümü, $W = e^{-2j\pi/N}$ tanımı yapılarak elde edilen $[W^{kn}]$ matrisindeki elemanların benzerliğinden yararlanılmaktadır. Bu dönüşümde, örneklerin sayıları ikinin tam katı olmalıdır. Yani dalganın periyodu ikinin tam katı olduğu zaman kullanılabilir. İşlem sayısı $(N \cdot \log_2(N))$ mertebesinde olmaktadır.

2.1.2 Nonsinüsoidal Dalga Formlarında Simetri Kavramları

Birçok dalga formu simetri gösterebilir. Nonsinüsoidal dalgaların simetrisine göre de Fourier serileri farklılıklar gösterebilir. Aşağıdaki simetriler analizlerde matematiksel hesaplamalara yardımcı olabilecek başlıca tiplerdir (Lucas 2001):

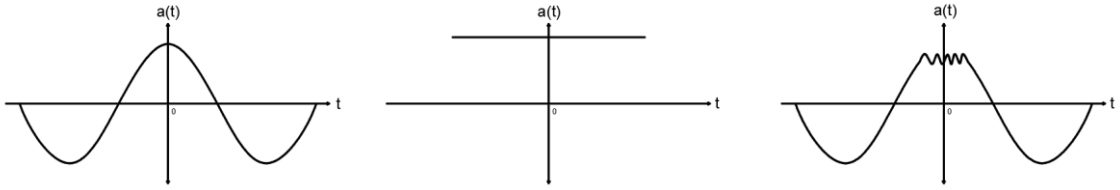
- Çift Simetri
- Tek Simetri
- Yarım-Dalga Simetrisi

2.1.2.1 Çift Simetri

Çift simetri fonksiyonu, $f(wt) = f(-wt)$ şartını sağlayarak, koordinat düzlemindeki y eksenine göre simetriktir. Şekil 2.4'te de görülebileceği üzere, bu fonksiyonların Fourier açılımında sinüslü terimler yoktur, sadece cosinüslü terimler vardır.

$$F(wt) = A_0 + B_1 \cdot \cos wt + B_2 \cdot \cos 2wt + \dots + B_n \cdot \cos nwt \quad (2.6)$$

Bazı fonksiyonlarda sabit terim de bulunabilir.

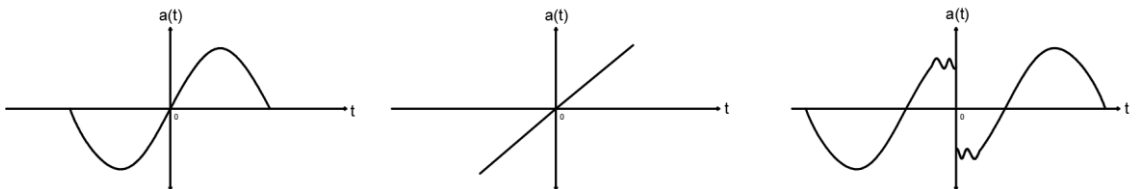


Şekil 2.4: Çift simetri dalga formu

2.1.2.2 Tek Simetri

Tek simetri fonksiyonu, $f(wt) = -f(-wt)$ şartını sağlar. Fonksiyonun grafiği önce düşey, sonra yatay eksen etrafında döndürüldüğünde Şekil 2.5 te de görülebileceği üzere eğriler üst üste geliyorsa tek fonksiyon simetrisidir. Fourier açılımında kosinüslü terimler yoktur, sadece sinüslü terimler vardır.

$$f(wt) = A_1 \cdot \sin wt + A_2 \cdot \sin 2wt + \dots + A_n \cdot \sin nwt \quad (2.7)$$



Şekil 2.5: Tek simetri dalga formu

2.1.2.3 Yarım-Dalga Simetrisi

Dalga'nın yarısı, önceki veya sonraki dalga'nın negatif yönündeki yarısına eşitse Yarım-Dalga simetrik fonksiyondur. Ancak dalga $t=0$ zamanından başlamak zorunda değildir. Fonksiyon eşitlik denklemi $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$ şeklindedir (Şekil (2.6)).

Eğer yarım dalga tek fonksiyon simetrisi ise Fourier açılımı:

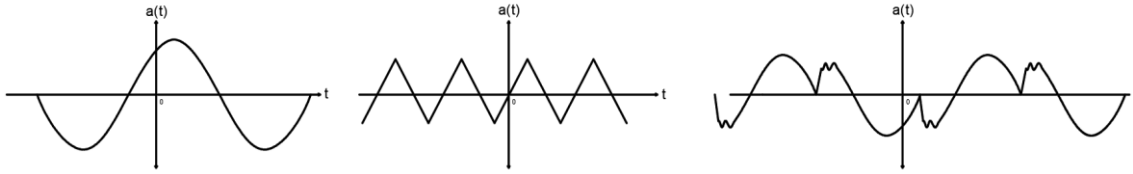
$$f(\omega t) = A_1 \cdot \sin \omega t + A_3 \cdot \sin 3\omega t + A_5 \cdot \sin 5\omega t + \dots \quad (2.8)$$

şeklinde olur.

Eğer yarım dalga çift fonksiyon simetrisi ise Fourier açılımı:

$$f(\omega t) = B_1 \cdot \cos \omega t + B_3 \cdot \cos 3\omega t + B_5 \cdot \cos 5\omega t + \dots \quad (2.9)$$

şeklinde olur.



Şekil 2.6: Yarım-Dalga simetrisi

2.1.3 Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)

Toplam Harmonik Distorsiyon (bozunum), temel frekans dışındaki tüm harmonik değerlerinin toplamının, temel frekansa bölünmesi ile bulunur. Diğer bir deyişle; THD harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzdesel ifade edilir (Öztura 2015).

THD akım ve gerilim dalga formları için aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.11)$$

Sadece temel frekanstan (50 Hz) oluşan tam bir sünüş dalga şekli için THD sıfırdır.

2.1.4 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Harmonik dalga formları en çok ortak bağlantı noktalarında (PCC) karşımıza çıkar. Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak formülize edilir:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.12)$$

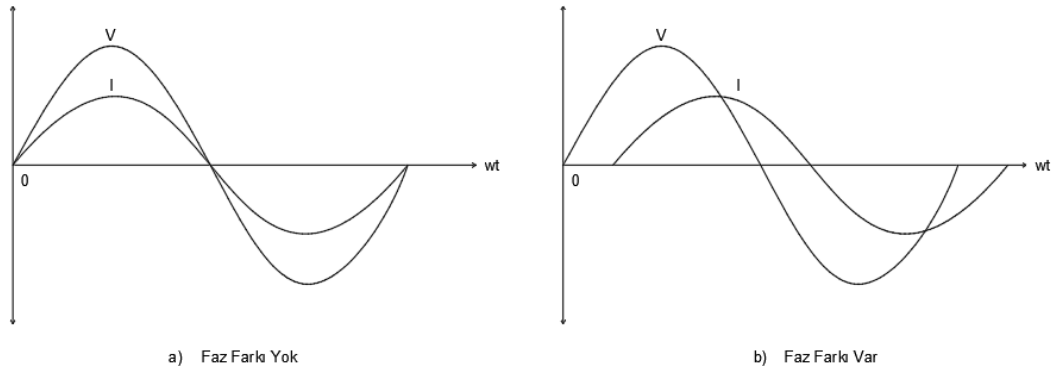
I_L yük tarafından, ortak bağlantı noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır.

2.2. Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Elemanlar ve Harmonik Kaynakları

Akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan sistem bileşenine “Nonlinear (doğrusal olmayan) Eleman” denir. Bu elemanlardan meydana gelen elektriksel devrelere de doğrusal olmayan devre denir. Bir doğrusal olmayan devredeki elemanların hepsi doğrusal olmayan eleman olabileceği gibi, sadece bir elemanı doğrusal olan devreler de doğrusal olmayan devre olarak tanımlanır. Doğrusal olmayan elemanlar bir sinüsoidal elektrik sistemine entegre edildiğinde harmonik akım ve gerilime neden olurlar.

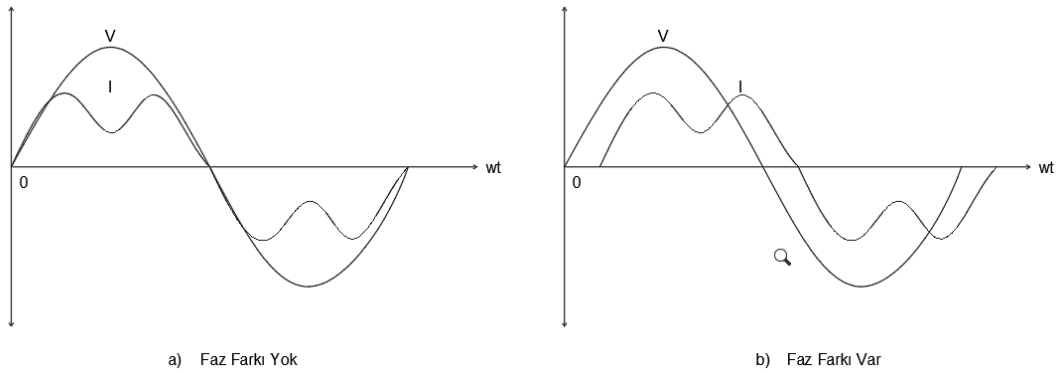
Ohm Kanunu'nun gereği olan akım ile gerilim oranının doğrusallığı (lineer), doğrusal olmayan elemanlarda değişkendir. Çünkü her gerilim değerindeki değişim, akım değerinde aynı oranda değişim meydana getirmez. Bu bağlamda; doğrusal olmayan elemanlar, uç karakteristiği ohm kanununu sağlamayan elemanlar olarak da adlandırılabilir.

Doğrusal dalga karakteristiğine sahip devre elemanlarında, aralarında faz farkı olsa da olmasa da uygulanan gerilim ile akım arasındaki oran sabit şekilde devam edecektir (Şekil 2.7)



Şekil 2.7: Lineer eleman akım/gerilim dalga formu

Doğrusal olmayan elemanlarda ise, faz farkı olsa da olmasa da gerilim ile akım arasındaki oran değişkendir.



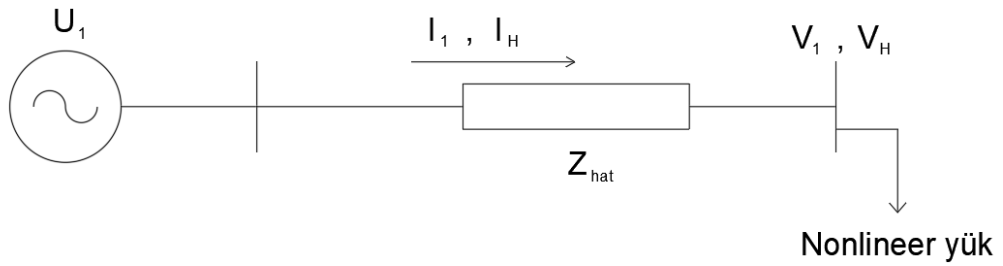
Şekil 2.8: Doğrusal olmayan eleman akım/gerilim dalga formu

Aşağıdaki tabloda, kaynak ve yük türüne göre gerilim ve akım dalga formlarının harmoniklerden etkilenme durumları analiz edilmiştir.

Tablo 2.1: Kaynak ve yüke göre harmonik bileşenler

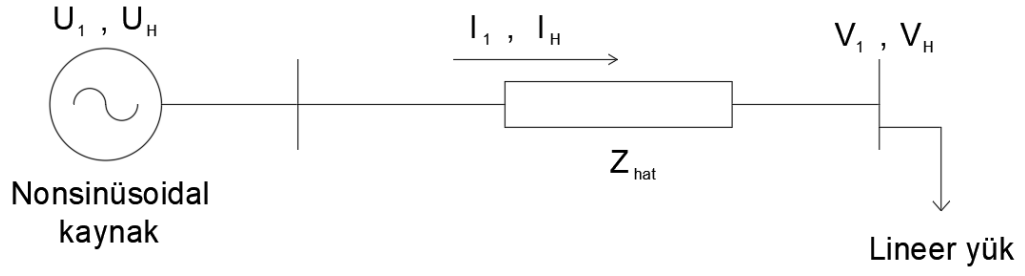
İşletme Türü		Harmonik Bileşen		
Kaynak	Yük	Gerilim	Akım	Açıklama
Sinüsoidal	Lineer	Yok	Yok	Harmonik bileşenler yok
Sinüsoidal	Nonlineer	Yok	Var	Yük nedeniyle akımda harmonik var.
Nonsinüsoidal	Lineer	Var	Var	Akımda, gerilim ile aynı harmonik bileşenler bulunur.
Nonsinüsoidal	Nonlineer	Var	Var	Gerilim ve akımda aynı ve farklı bileşenler bulunabilir.

Besleme kaynağının sinüsoidal olduğu bir şebeke yük olarak nonlinear bir devre elemanı bağlı olması sonucu yük harmonik akımlar çekecektir. Bu harmonik akımlar, yük tarafında harmonik gerilimleri de meydana getirecektir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9: Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlinear yük

Gerilim kaynağının nonsinüsoidal olup, devreye bağlanan elemanların lineer olduğu sistemlerde de harmonikler karşımıza çıkar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Nonsinüsoidal şebekeye bağlı lineer yük

2.2.1 Harmonik Kaynakları

Harmonik bileşenler, harmonik kaynağı olarak tanımlanan, gerilim-akım dalga karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından meydana gelmektedir. Harmonikleri meydana getiren bu elemanlara örnek olarak aşağıdaki kaynaklar verilebilir:

- Yarıiletken anahtarlama elemanlarının kullanıldığı cihazlar
- Konvertörler
- Frekans dönüştürücüleri
- Generatörler (üreteçler)
- İndüksiyon motorları
- Transformatörlerdeki doyma durumu
- HVDC (Doğru akım yüksek gerilim hatları)
- Elektronik balast ve gaz deşarjlı aydınlatma sistemleri
- Fotovoltaik sistemler
- Kaynak makineleri
- Kesintisiz güç kaynakları (UPS)
- Redresörler
- Statik VAR kompanzastörleri
- Ani devreye girip çıkabilen sistemler (ark fırınları vb.)
- Elektrikli ulaşım sistemleri (DA)

Bir güç sisteminin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve harmonik benzetiminin gerçekleştirilebilmesi için sistemdeki harmonik kaynakları nitelik bakımından üç ana grupta incelenebilir (Kocatepe ve diğ. 2003):

- 1) Sistem içine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar
- 2) Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlinear yükler
- 3) Büyük güçlü statik konvertörler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri

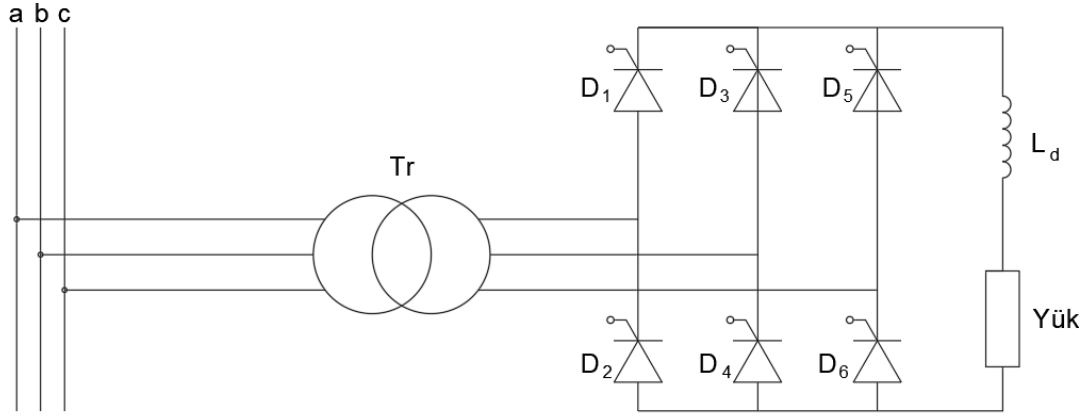
Endüstriyel tesislerdeki önemli harmonik kaynaklarından bazılarını açıklamak gerekirse:

2.2.1.1 Dönüştürücüler

Elektrik enerji sistemlerinde en önemli harmonik kaynaklarından biri monofaze ve trifaze dönüştürücüler. Dönüştürücülerin kullanım alanı oldukça geniştir. HVDC iletim sistemlerinde, fotovoltaik sistemlerde, akü-redresör sistemlerinde, endüstriyel tesislerde asenkron indüksiyon motor kontrol proseslerinde, elektrikli ulaşım sistemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Enerji sistemlerinde yaygın olarak 3 fazlı/trifaze dönüştürücüler kullanılmaktadır. Üç fazlı dönüştürücüler, cihazın içindeki transformatörünün primer tarafından şebekeden çekilen AA akımının dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır. 3 fazlı dönüştürücülerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemeleri avantajlarıdır.

Genel olarak üç fazlı dönüştürücülerin ürettikleri harmonik bileşenler $n = k.p \pm 1$ denklemi ile ifade edilir. Bu denklemde k tam sayıları, p ise dönüştürücü, konvertör, eviricinin darbe sayısını belirtir. Darbe sayısı arttıkça tehlikeli olan düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir.

Dönüştürücülerde darbe sayısı $p = 6,12,18,24$ veya 36 olabilir. Endüstriyel tesislerde en yaygın olarak kullanılanı 6 darbeleri doğrultma devreleridir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: 6 darbeli konverter devre şeması

2.2.1.2 Transformatörler

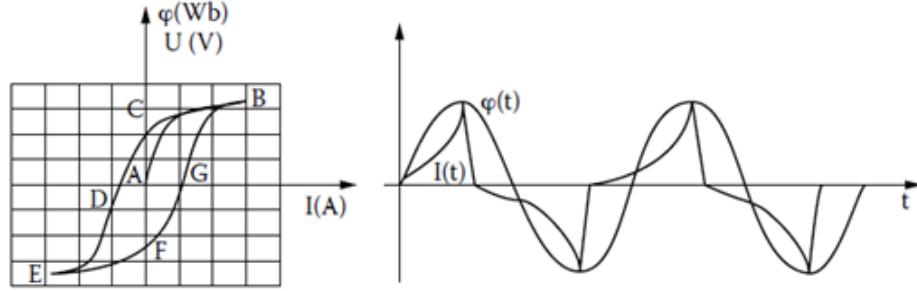
Elektrik enerji sistemlerindeki en kritik devre elemanlarından birisi olan transformatörler bazı durumlarda harmoniklere sebep olurlar. Transformatörlerin endükleme özelliğinden meydana gelen harmonik bileşenler transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının topraklanıp topraklanmaması (işletme topraklaması) durumlarına göre değişmektedir.

Transformatörlerin çalıştığı yük durumuna göre manyetik alanlarının da değişmesi nedeniyle harmonik genliklerinde de değişme olabilmektedir.

Transformatörler harmonik akımlarından kaynaklanan ek kayıpların ve sıcaklık artışlarının kompanze edilebilmesi için çok büyük boyutlarda imal edilmesi gerekir. Bu da tabii ki ciddi bir maliyet demektir (Schneider Electric/Merlin Gerin).

Yükü az veya boşta çalışan bir transformatör mıknatıslanma akımından dolayı nonsinüsoidal akım çeker ve harmonik üretir. Transformatör yüklendiğinde ise uyarma gerilimi sistemdeki gerilim düşümünden dolayı düşük olacağı için transformatörün endüvisinden kaynaklı harmonikler azalacaktır.

Doymuş bir transformatör altındaki bozulmuş, harmonikli akım dalga formunu gösteren grafik aşağıdaki şekilde gibidir (Şekil 11). Bu harmonik kademeleri 3 ve 3 ün katları olan tek harmoniklerdir (Ahmed ve diğ. 2013).



Şekil 2.12: Doyum noktasındaki transformatörün akım dalga formu (Ahmed ve diğ. 2013)

Transformatörlerde, az uyarma ile oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler baskın olurlar. Akım şiddeti bakımından en dikkat edilmesi gereken harmonik 150 Hz deki 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün katları olan harmoniklerin aralarında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğu için hepsi aynı fazdadır. Bu sebeple aynı fazda ola akımlar birbirinin üzerine eklenerek 3 kat fazla akıma sebep olurlar.

Transformatörlerdeki harmonikler transformatör imalatı aşamasında alınacak bazı önlemler ile engellenebilir (Zile). Bunlar:

- Hatlardaki üçlü harmonik akım ve gerilimleri transformatörün yıldız veya üçgen bağlantıları kullanılarak önlenir.
- Transformatör sargılarının biri üçgen bağlandığında, üçlü harmonik gerilimler engellenebilir.
- Eğer primer veya sekonderin üçgen bağlanması mümkün değilse, bu durumda transformatör için üçüncü ek sargı tasarlanması gerekir. Üçüncül sargı üçgen olarak bağlanır.

2.2.1.3 Generatörler

Rotasyonlu elektrik makineleri, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Generatörler de yapıları ve çalışma prensipleri itibarıyla harmonik üretirler. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği, çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından meydana gelmektedir.

Endüklenen elektromotor kuvveti, alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir. Yani; 1., 3., 5., 7., 9., vb gibi tek harmonik bileşenleri vardır. Harmonik mertebesi arttıkça genlikleri azalır, frekans artar (Şahin 2003).

Eğer generatör/alternatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sarımlarda 3 ve 3 ün katları mertebelerinde bir sirkülasyon akımı dolaşır. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara sebep olur.

Generatörlerdeki harmonik kayıplarının önlenmesi ve minimize edilmesi için, sarımların yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması gerekmektedir. Generatörlerin sebep olduğu üç ve üçün katı harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmasıyla bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür.

2.2.1.4 Ark Ocakları

Ark ocakları, elektrik arkının gerilim-akım karakteristiğinin nonlineer olması sebebiyle bir harmonik üreticidir. Harmonikler en üst düzeye, ergitme safhasında ulaşırlar. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne, çalışma safhasına, ocağın malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişebilmektedir.

Ark fırınları metalin kısa devre edilerek eritilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Ergiyen metalin empedansı devamlı olarak değiştiği için çekilen akım kararsız yapıdadır

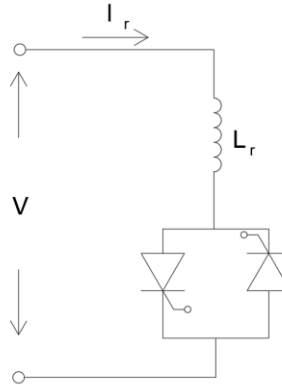
ve her bir periyot değişen harmonik spektrumuna sahiptir. Bu nedenle ark fırınlarının harmonik dalga analizinin elde edilmesi zordur (Şerbetçi 2019).

Doğru akım ark ocaklarında oluşan harmonik mertebelerinin giderilmesinde daha yüksek darbe sayısına sahip doğrultucuların tasarımı ve transformatör üzerinden fazlarının kaydırılması şebekedeki harmoniklerin azalmasını sağlayacaktır (Duman ve diğ.).

2.2.1.5 Statik VAR Kompanzasyon Sistemleri

Reaktif güç kontrolü amacıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik Var kompanzatörleri, içerdikleri yarıiletken teknolojiye nonlineer anahtarlama devre elemanları sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğe sahiptir.

Bir tristör kontrollü reaktörün devre elemanları Şekil 2.13'te de görüldüğü gibi ters paralel bağlı iki tristör ile buna seri bağlı reaktörden oluşur. Ters bağlı paralel tristörler simetrik tetiklenir. Tristörler, zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder.



Şekil 2.13: Tristör kollu reaktör devre şeması

Yüklenme dengeli olduğunda tristör kontrollü reaktör tek dereceli harmonikleri üretir. Reaktörde üçgen bağlantı yapılırsa üçüncü harmonik ve katları şebekeye verilmez

ve bağlantı içinde elimine edilir. Sistemin rezonansa girmemesi için süreksizliğe sebep olabilecek çalışma noktalarında anahtarlama yapılmamasına dikkat edilmelidir.

2.2.1.6 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan DA-AA dönüştürücüler ana harmonik kaynaklarıdır. Fotovoltaik sistemlerde yapılan analizler incelendiğinde, harmonik bozulmaların invertör sayısı arttıkça kesin bir şekilde ve harmonik üreten kaynağa yani invertöre ve hattın uzak ucuna yaklaştıkça daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca invertör sayısı arttıkça, sistemin çekebileceğinden daha fazla akım şebekeye verilmekte ve böylece güç akışı tersine dönmekte ve alçak gerilim kısmından yüksek gerilim kısmına doğru bir akım akmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerde harmonikleri minimize etmek için invertörler hat başına yakın tesis edilmeli. Devreye bağlanan invertör sayısı arttıkça, özellikle hat sonlarında gerilim normal seviyesinin üstüne çıkmakta ve bu durumun, invertör sayısı daha da artırıldığı zaman problemlere (yalıtım zorlaması gibi) yol açacağı gözlenebilir. Bu yüzden fotovoltaik tesislerin trafoya yakın monte edilmesi gerekir (Çelebi ve Çolak 2019).

2.3. Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik bileşenler, sadece yüklerin dalga formlarında olumsuz ve bozucu etkilerde bulunmakta kalmaz, aynı zamanda güç ve şebeke sistemine ve üzerinde bağlı olan diğer elemanlar üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirmektedir.

Güç sistemindeki harmoniklerin etkileri; stres ve yüksek kan basıncının canlı organizması üzerinde oluşturduğu etkilere benzetilebilir. Harmonik varlığıyla oluşan problemlerin şiddeti, bozulan dalga formunun genliğine ve cihazların hassasiyetine bağlıdır (Akmaz 2012).

Harmoniklerin güç sistemlerinde yol açtığı problemler:

- Şebeke gerilimi ve generatörlerin dalga formunun bozulması
- Gerilim düşümünün artması
- Güç sistemi elemanlarında ve yüklerde meydana gelen ek kayıplara bağlı olarak üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin veriminin düşmesi
- Kompanzasyon sistemlerinde rezonans sebebiyle aşırı yüklenmelerden kaynaklı hasarların oluşması
- Toprak kısa devre akımlarının artması
- İndüksiyon motorlarında ısınmaların artması
- Aydınlatma sistemlerinde flickerlar
- Kablo yalıtım malzemelerinin zorlanması ve delinmesi
- Ölçüm sistemlerinde hataların meydana gelmesi
- Kesici ve koruma sistemlerinde kontrolsüz açmalar (manyetik açma, röle hataları).

Harmoniklerin güç sisteminde meydana getirdiği bu olumsuz etkilerden en kritik olanlarından bahsedilecek.

2.3.1 Generatör ve İndüksiyon Motorları Üzerindeki Etkileri

Şebekedeki harmoniklerin generatör ve indüksiyon motorları üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkiler; harmonik frekanslarına bağlı olmak üzere demir ve bakır kayıplarının artması, gürültülü çalışma, rotorda harmonik akımlarının dolaşması olarak belirtilebilir. Bu rotor harmonik akımları, rotor sıcaklığını ve salınımı artırıp tork ve momentin düşmesine sebep olacaktır (Csanyi 2017).

Harmonikler sebebiyle indüksiyon motorlarının sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla monofaze motorlar etkilenmektedir. Harmonik bozunumlar, motor performansını %5-10 arasında azaltabilmektedir.

Generatörlerde, rotordaki harmonik akımlar rotor ısınmasına bağlı olarak, statordaki 5. ve 7. harmonikler rotorda birleşerek 6. harmonik bileşeni üretirler. 11. ve 13. harmonikler rotorda birleşerek 12. harmonik bileşenini oluştururlar.

2.3.2 Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Harmonik üreticisi de olan transformatörler de akım ve gerilim harmoniklerinden olumsuz etkilenirler. Akım harmonikleri sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıpları oluşur. Gerilim harmonikleri sonucunda ise; demir kayıpları meydana gelir. Generatör ve indüksiyon motorlarındaki etkiye benzer olarak, harmonikler transformatörler üzerinde de gürültü artışına sebep olurlar.

Transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekansın artmasıyla kayıplar artmaktadır. Dolayısıyla, yüksek mertebeli harmonik bileşenler düşük mertebeli olanlardan daha etkili olabilmektedir. Transformatörün manyetik akısı değişkendir, demir çekirdekte her periyotta iki kez yön değiştirerek histeresis çevrimini tamamlar. Histeresis kaybı P_h frekans ile orantılıdır. Frekansları yüksek olan harmonik gerilimler, histeresis kayıplarının artmasına neden olur.

Harmonik bileşenler transformatör endüktansı ile transformatörlerin alt yükleri arasında rezonans oluşturabilir. Aynı zamanda demir kayıplarına sebep olan, transformatörün demir çekirdeğinde periyodik akı değişimleri nedeniyle oluşan fuko akımları da frekansın artması ile artar.

Son zamanlarda 'k' faktörlü transformatör tipleri harmoniklere ve etkilerine karşı koymada başarılı sonuçlar elde etmiştir. K-faktör dereceli transformatörlerin büyük avantajı, harmonik yükler dikkate alınarak imal edilmeleri ve kayıpları düşük değerde tutacak olmalarıdır. Örneğin sarımda çok telli iletkenler kullanılarak girdap akım kayıpları ve düşük kayıplı çelik saclar kullanılarak manyetik kayıplar azaltılır. Bu bağlamda mevcut transformatörlere yeni yükler ilave edilirken mutlaka harmonik ölçümü yapılmalı ve K-faktörü hesaplanarak yeni durum incelenmelidir (Şekerci ve Uzunkuyu).

2.3.3 Enerji İletim Sistemleri ve İletkenler Üzerindeki Etkileri

Harmonikler iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma ve verim kaybına neden olur. İlki, deri etkisi olarak bilinen “skin-effect”tir. Harmonik frekansının artması ile orantılı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artmasıyla meydana gelen etkiye deri etkisi denir.

İkinci olarak, üç ve üçün katları olan harmonik bileşenlerden kaynaklanan nötr hattındaki akımlardır. Temel frekansta (50 Hz) dengeli 3-fazlı akımların yıldız noktasındaki vektörel toplamı sıfır olduğu için nötr iletkeninde akım görülmez. 3 fazlı sistemlerde faz farkı 120 derece olduğu için, harmonik mertebesi “n” için fazlar arasında n.120 derecelik faz farkı olduğundan üç ve üçün katı harmoniklerin herbiri 360 derecelik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olurlar (Yıldız 2006).

2.3.4 Koruma Şalterleri ve Devre Kesiciler Üzerindeki Etkileri

Akım harmonikleri, güç sistemlerinde ilave ısınma ve rezonans olayları sonucu termik ve manyetik devre kesiciler üzerinde istenmeyen açmalara sebep olabilmektedir. Bu da enerjinin kaliteli üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimini olumsuz etkiler.

Ayrıca, harmonikler anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinde, 50 Hz. frekansına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmektedir. Bu da akım kesme işleminde planlanan durumun dışına çıkılmasına sebep olmaktadır.

2.3.5 Röleler ve Ölçüm Cihazları Üzerinde Etkileri

OG ve AG sistemlerinin korunmasında oldukça önemli devre elemanları olan, akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler; sistemde harmonikli akım ve gerilimlerin bulunması durumunda performans açısından olumsuz etkilenebilmektedir.

Elektromekanik TZAAR (ters zamanlı aşırı akım rölesi) üzerinde yapılan bir pratikte, TZAAR’ın bozulmuş dalga şekilleri için davranışı deneysel çalışma ile analiz

edilmiştir. Deneyde, elektromekanik TZAAR olarak, indüksiyon disk yapısında bir röle kullanılmıştır. Değişik harmonik spektrumlara sahip, sinüsoidal olmayan yük akımları TZAAR'a uygulanmış ve bu yük akımları data toplama kartı ve harmonik analiz programı ile bilgisayar ortamında işlenmiştir. Deney sonuçlarına göre; TZAAR'ın çalışma akımı ve çalışma zamanının, sinüsoidal olmayan akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD) ile orantılı olarak arttığı görülmüştür (Dalcı ve diğ. 2005).

Harmonikler indüksiyon diskli eski tip sayaçlar, voltmetre ve ampermetre gibi ölçüm aletlerini de olumsuz etkileyip ölçüm sonuçlarında hatalara yol açabilmektedir.

2.3.6 Elektronik Elemanlar ve Kartlar Üzerindeki Etkileri

Harmonik bozunum, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir. Harmonik nedeniyle bir noktadaki fazlararası gerilim, diğer noktalardaki fazlararası gerilimden daha büyük olabilir. Bu durumlar elektronik kontrol sistemlerinin komutasyon hatalarıyla yanlış işletimlerine yol açar. Yarıiletken teknolojisi olan tristörlerden kaynaklanan harmonik, yine tristörlü kontrol devrelerinde ateşleme anlarının değişmesine sebep olabilir.

2.3.7 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Enerji sisteminde önemi rolü olan kondansatörleri de harmonik bileşenlerden etkilenirler. Harmoniklerin meydana getirdikleri olumsuzluklar, öncelikle kondansatörler üzerinde görülür.

Kondansatörler harmonik üreten devre elemanları olmamakla birlikte, sistemde bulunan harmonik seviyelerinin etkin biçimde artmasına neden olabilirler. Harmonikler, kondansatörlerde hem aşırı gerilim hem de aşırı akımlara ve bunların neticesinde aşırı reaktif yüklenmeye neden olurlar.

Harmonik bileşenlerin olduğu bir sistemde, kondansatörlerin gerilimleri optimum parametrelerin üzerine çıkabilir. Aşırı gerilim, gerilim harmonik bileşenleri (V_n)

nedeniyle oluşmaktadır. Enerji sistemlerinde simetriden dolayı tek dereceli harmonikler bulunur ve gerilimin efektif değeri:

$$V = \sqrt{[V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots]} \quad (2.10)$$

eşitliği ile belirlenir. Eşitlikte görüldüğü gibi, nonsinüsoidal durumda temel gerilim bileşenine gerilimin harmonik bileşenleri dahil olmaktadır. Yüksek değerli harmonik bileşenli bir gerilim, kondansatörlerin dielektrik malzemelerinde zorlanmalara ve arızalara sebep olabilmektedir. TS 804 standardına göre, kondansatör geçici olarak nominal geriliminin 1,1 katına dayanabilmelidir.

Kondansatör üzerindeki harmonikli gerilim, yine distorsiyonlu bir akım meydana getirecektir. Akım dalga bozunumu, gerilim dalga bozunumundan daha yüksek olacaktır. Tek dereceli harmonik bileşenler için kondansatör akımı:

$$I = w.C \sqrt{[V_1^2 + 9.V_3^2 + 25.V_5^2 + \dots]} \quad (2.11)$$

olacaktır.

2.3.8 Rezonans Etkisi

Elektrik enerji sistemlerinde, endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın eşitliği sonucu rezonans meydana gelir. Rezonans durumunda sistemde aşırı akım ve aşırı gerilim gibi problemler ortaya çıkıp enerji akışının kesilmesine yol açabilmektedir. Elektrik devrelerinde “Seri Rezonans” ve “Paralel Rezonans” şeklinde iki tür rezonans oluşur.

Endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artmasına rağmen, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılıdır. Sistem rezonansı, harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı akım ve gerilim harmonikleri ortaya çıkar. Bu da sistemdeki koruma elemanlarının (kesici, şalter vb.) açmasına neden olur. Sistem endüktif ve kapasitif reaktansının rezonans frekansı genellikle 3., 5. ve 7. harmonik civarlarında meydana gelir.

2.3.9 Harmonik Standartları

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin daha da artacağı düşünüldüğünde, nonlineer yükler içeren tesislerin tasarım ve kurulum aşamalarında düşük harmonik üreten ekipmanlardan oluşmasına dikkat edilmelidir. Transformatörlerde şebeke tarafındaki sargıların üçgen olmasına dikkat edilmeli ve işletmede proses kontrolünde kullanılan konvertörlerin düşük genlikli harmonik bileşen üreten yüksek darbe sayılı olanlarının tercih edilmelidir.

IEC (International Electrotechnical Commission) kapsamında da harmonikler ile ilgili standartlar belirlenmiştir (Tablo 2.2).

IEEE (Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisleri) tarafından getirilen sınırlamalar hem akım hem de gerilim harmoniklerini kapsamıyla etkin olmaktadır (Tablo 2.3).

Tablo 2.2: IEC 61000-2-4 Endüstriyel santraller için THDv limitleri

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥29	K	(k=0,2+12,5/n)			

Tablo 2.3: IEEE Gerilim harmonik limitleri

Bara Gerilimi(Vn)	Tekil Harmonik Büyüklüğü(%)	THDvn(%)
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1	1,5

3. HARMONİKLERİN FİLTRELER İLE ELİMİNASYONU

Elektrik sistemlerinde; harmonik bileşenlere karşı sisteme entegre edilen ve hedef harmonik akım-gerilim bileşenlerini elimine eden devrelere “harmonik filtresi” denir. Harmonik filtreler, sistemdeki en yoğun harmonik mertebeler için tasarlanır. Harmonik filtreler, geleneksel kompanzasyon sistemlerine entegre edilip, tüketiciye teknik ve ekonomik kolaylıklar sağlayabilen düzeltici sistemlerdir.

Harmonik filtreler işlevleri bakımından; bileşenlerinin omik direnç (R), endüktans (L) ve kondansatör (C) gibi pasif devre elemanlarından oluşan Pasif Filtreler, filtrelerin IGBT kontrollü ve ters yönlü dalga formu prensibiyle çalışan Aktif Filtreler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

3.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, 50 Hz. temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri ortadan kaldırmak üzere tasarlanmış, omik direnç, endüktans ve kapasitans (RLC) pasif devre elemanlarından oluşan bir tasarımdır. Pasif filtrede tasarım yapılırken, ortadan kaldırılmak istenen harmonik bileşenin frekansında sistemi rezonansa getirecek endüktans ve kapasitans değerlerini belirlenir. Ancak her harmonik frekans için, rezonansa getirecek ayrı bir filtre tasarlanması gerekecektir.

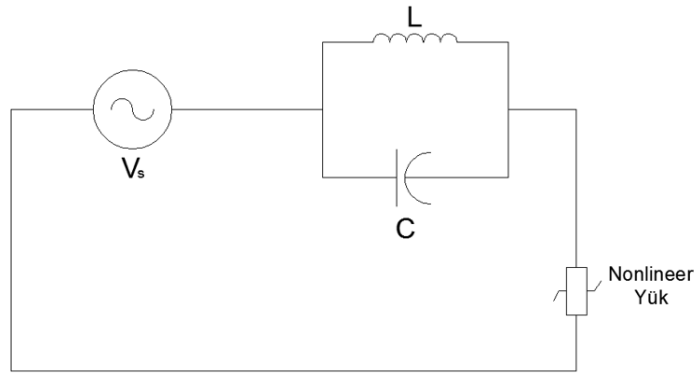
Pasif filtreler kendi içlerinde bağlantı şekillerine göre Seri ve Paralel olmak üzere iki ana grupta incelenir.

3.1.1 Seri Pasif Filtreler

Hedef, spesifik bir harmonik bileşenin güç sistemini kirletmesini engellemek olduğunda seri pasif filtreler tercih edilir. Seri pasif filtreler, harmoniğe sebep olan kaynak ile şebeke arasına seri olarak bağlanır.

Seri pasif filtreler, harmonik akışına karşı yüksek empedans, temel frekansa da (50 Hz) düşük empedans gösterirler. Ancak spesifik bir frekans bileşenine göre tasarlandığı için sadece o frekansa yüksek empedans gösterirler.

Seri filtre tasarımları genellikle monofaze sistemlerde 3. harmoniği elimine etmek için yapılır. Bu filtrelerde rezonans durumu gerçekleşmez. Ancak, devrede seri olarak buldukları için yük akımı da filtrenin üzerinden geçeceğinden dolayı filtre tasarımını dayanım noktasında belli limitler dahilinde tutar. Yük akımını taşımaya ve hat gerilimine dayanabilecek şekilde yapılmalıdır.



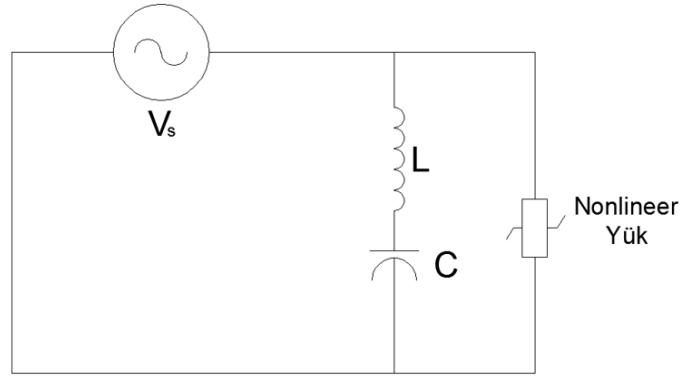
Şekil 3.1: Seri pasif filtre temel prensip şeması

3.1.2 Paralel Pasif Filtreler

Harmonik bileşen akımlarının, düşük empedanslı bir paralel (şönt) ile topraklanması prensibi ile tasarlanmış pasif filtrelerdir. Seri pasif filtrelerin yüksek maliyetli oluşu ve paralel filtrelerin 50 Hz. temel frekansta reaktif güç ihtiyacını karşılayabilmesi paralel filtrelerin tercih edilmesini kolaylaştırmıştır. Endüstriyel tesislerin kompanzasyon sistemlerinde paralel pasif filtreler karşımıza çıkar.

Paralel filtreler, şebeke ile harmoniğe sebep olan kaynak arasına paralel bağlanır. Seri pasif filtrelere göre daha kolay tasarlanıp sisteme entegre edilebilir. Aynı zamanda temel frekansta reaktif güç üretebilir. Bu avantajlarıyla, endüstriyel tesislerde seri pasif filtrelere göre daha çok tercih edilirler.

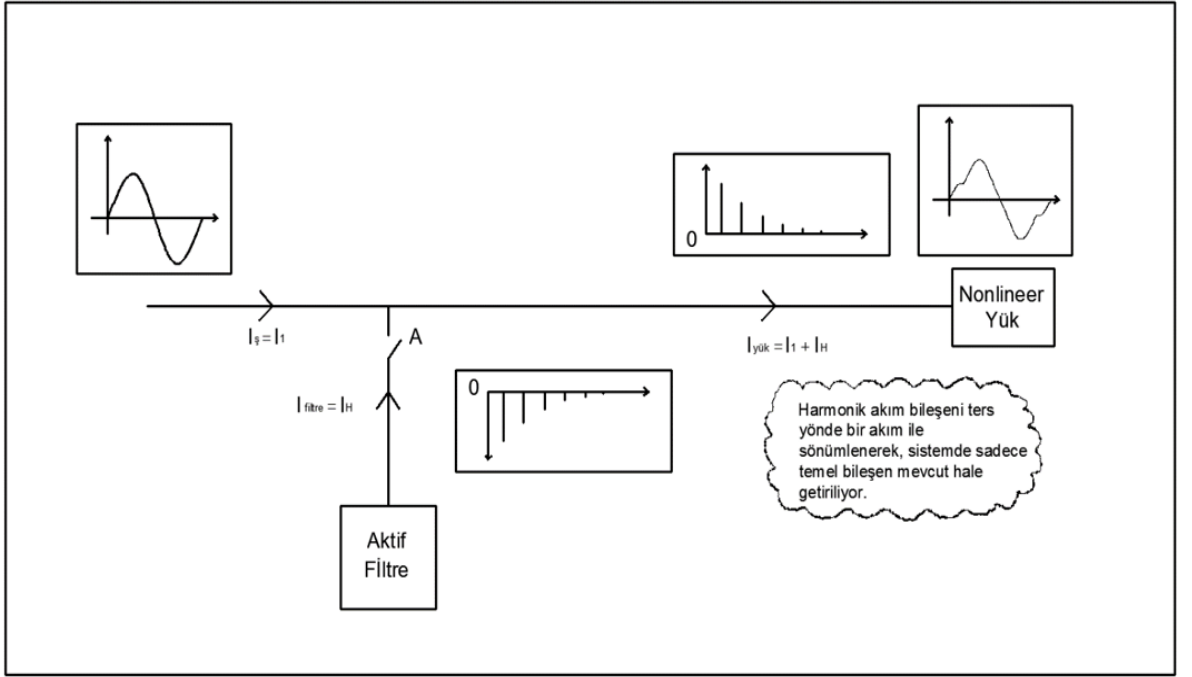
Paralel pasif filtreler de seri pasif filtreler gibi sadece tasarlanmış frekansta etkilidir. En büyük dezavantajı ise, güç sisteminde rezonansa girebilmeleridir. Filtredeki R, L, C bileşenleri, şebekenin empedans değeri ile birbirlerini etkileyerek rezonansı gerçekleştirebilirler. Bu yüzden, uygulanacak şebeke sisteminin kritik rezonans frekansının doğru hesaplanması gerekmektedir. Mevcut rezonans frekansına göre tasarlanmış bir paralel pasif filtre sisteminin, o güç sistemine sonradan dahil olmuş yeni güçleri etkisiyle değişebilen rezonans frekansına uyması beklenemez. Bu durumda yeni filtre tasarımı yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.2: Paralel pasif filtre temel prensip şeması

3.2. Aktif Filtreler

Aktif filtrelerin çalışma prensibi, nonlineer yükün şebekeden çekeceği temel dalga formu 50 Hz dışındaki harmonik akımı, ters yönlü bir akım ile sönmülemektir.



Şekil 3.3: Aktif filtre çalışma prensibi

Pasif filtrelerin; mevcut şebeke sistemine göre dizayn edilmesi ve ilave yüklerde ilk tasarımın geçersiz kalması ve sisteme montajlarının zor olması gibi dezavantajlarının karşılığında aktif filtrelerde montaj kolaylığı ve birden fazla frekans üzerinde adreslenebilir olması bu sistemleri teknik ve finansal açıdan öne geçiren en önemli özelliklerdir.

Aktif filtreler ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir.

4. AKTİF HARMONİK FİLTRELER

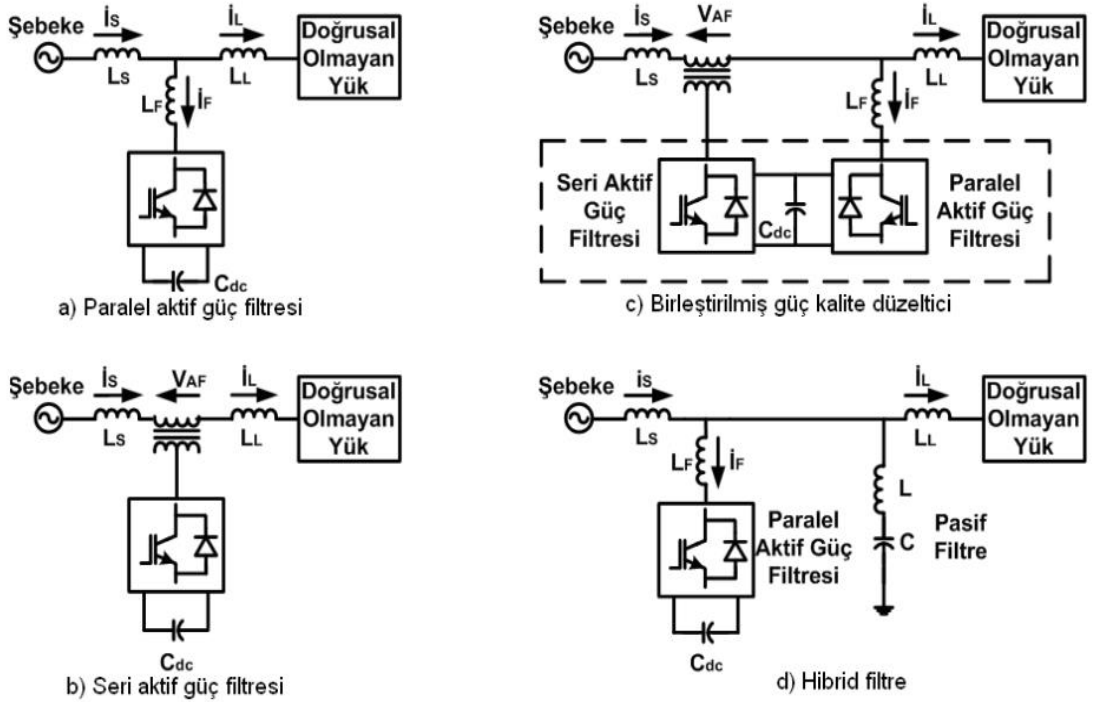
Güç kalitesizliği yaşanan elektrik güç şebekelerinde, finansal kayıplar, çevreye olumsuz etkiler, güvenilirlik, sistem verimi problemleri ortaya çıkar. Güç kalitesizliğinin endüstriyel tesislerdeki temel kaynaklarından olan harmonik bozunum ciddi maddi kayıplara yol açtığı gibi sistem verimini de olumsuz etkileyerek işletmelerde önemli kayıplara neden olabilmektedir.

Elektrik güç şebekesinde akım ve gerilim dalga formlarında meydana gelen ve şebeke devre elemanlarını olumsuz etkileyen harmonik distorsiyonları en etkin şekilde elimine etmek Aktif Harmonik Filtre sistemleri tarafından mümkün olmaktadır. Son yıllarda hızla ilerleme kateden güç elektroniği teknolojisiyle birlikte, 1980'lerin başından itibaren aktif filtre sistemleri endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlamıştır.

Aktif filtre sistemlerinin en önemli ve işlev gören kısımları, akım üretici ve kontrol sistemidir. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor- Metal oksit yarı-iletkenli alan etki transistörü) ve GTO (kapıdan kesmeli tristör) gibi kontrol elemanları ile yönetilen aktif filtre sistemleri son yıllarda endüstriyel tesislerde tercih edilen harmonik önleyici sistemlerdendir. IGBT (izole edilmiş kapılı iki kutuplu transistör) kontrol sistemleri ve gelişmiş sensör teknolojisi de aktif filtre teknolojisine ciddi katkıda bulunmuştur. Solid state (katı halli) manyetik elemanların daha kolay ulaşılabilir olması ve ekonomik oluşu aktif filtre sistemlerini de ulaşılabilir yapmıştır (Singh ve Al-Haddad 1999).

Tablo 4.1: Aktif filtre ile pasif filtre karşılaştırma tablosu

Parametre	Pasif Harmonik Filtre	Aktif Harmonik Filtre
Filtrenin etkin olduğu frekans	Bir veya iki frekansa ayarlanabilir	Birden fazla frekansı sönmüleyebilir
Yük değişimine adaptasyon	Yeni filtre tasarımı gerekir	Uyum sağlar
Empedans etkisi	Rezonans oluşabilir	Etkilenmez
Temel frekans değişmesi (50 Hz)	Filtre tasarımı sabit olduğu için verimi azalır	Etkilenmez
Akım yükselmeleri	Arıza oluşabilir	Aşırı yüklenme oluşmaz



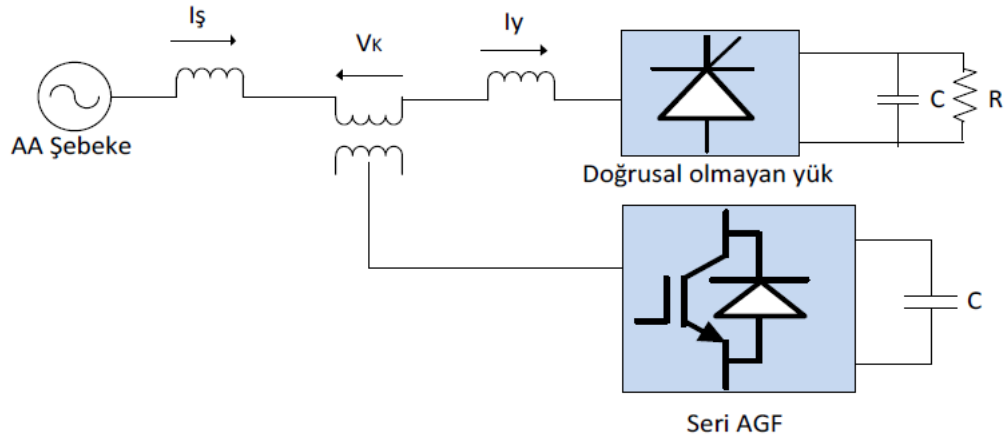
Şekil 4.1: Bağlantı şekillerine göre aktif harmonik filtre devre şemaları (Rüstemli ve diğ. 2013)

4.1. Seri Aktif Filtre

Harmonik bileşenlerini elimine etmek üzere tasarlanan seri aktif filtreler, Şekil (4.1) deki gibi sisteme bir transformatör ile seri bağlanır. Bu bağlantı şekli ile seri aktif filtre gerilim kaynağı olarak davranır.

Seri aktif filtrelerin çalışma prensibi, gerilimin anlık eklenip çıkarılması ile yük tarafında saf sinüsoidal gerilim dalgasının sağlanmasına dayanır.

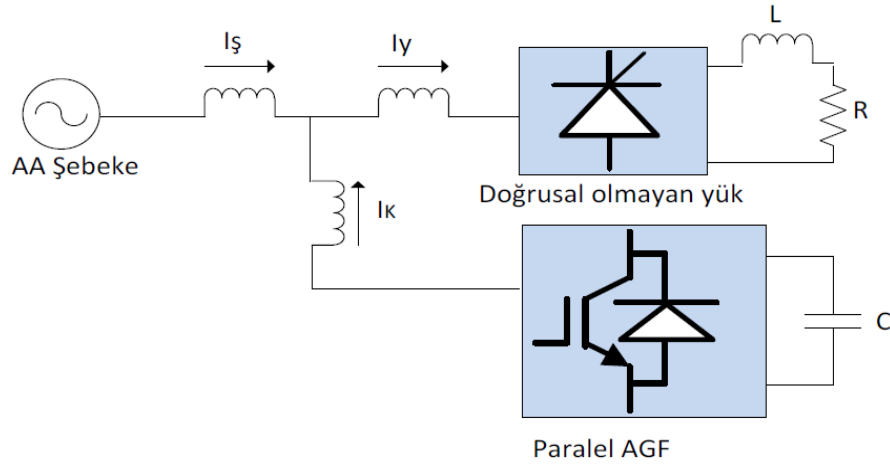
Seri aktif filtreler; gerilim harmonik bileşenlerinin eliminasyonu, gerilim değerinin regülasyonu, gerilim düşmesinin engellenmesi için kullanılır. Bu işlemler, yük tarafında sinüsoidal bir dalga formu sağlar ve bu da gerilim toleransı düşük hassas cihazlar için oldukça önemlidir. Bu filtreler; seri pasif filtrelerde olduğu gibi, yük akımlarını üzerinden geçireceği için çok dikkatli tasarlanmalıdır. Yük akımına göre yüksek kapasitede tasarlanmalıdır. Toplam harmonik akım distorsiyonu yüksek olan sistemlerde, seri aktif filtrenin tasarım kapasitesi daha da artar. Buna bağlı olarak, endüstriyel tesislerde bu filtreler çok tercih edilmemektedir. Şekil 4.2’ de seri aktif filtrenin devre bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Seri aktif filtre (Aktif Güç Filtresi) devre bağlantı şeması (Akmaz 2012)

4.2. Paralel Aktif Filtre

Endüstriyel tesislerde harmonik akım eliminasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı regülasyonu ve nötr barasındaki akımın kompanzasyonu gibi akım tipi harmoniklerin ve akım harmoniklerinden kaynaklı gerilim harmonik distorsiyonlarının engellenmesi işlemlerinde en etkin çözümdür. Şekil 4.3'te paralel aktif harmonik filtre devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Paralel aktif filtre (Aktif Güç Filtresi) devre bağlantı şeması (Akmaz 2012)

Paralel aktif filtre sistemleri, endüstriyel tesislerde halihazırda var olan pasif harmonik filtre sistemleri ile birlikte çalışabilir. Ancak pasif harmonik filtre sisteminin, şebeke sisteminin kritik rezonans frekansı dikkate alınarak dizayn edilmiş olması gerekmektedir.

Paralel aktif filtre sistemlerinde, harmonik bileşenleri tespit etmek için hızlı reaktif güç metodu olarak da bilinen FFT metodu en yaygın yöntemlerdendir. FFT metodu anlık çalışır ve ölçülen akımı tam sinüsoidal dalga formuna tamamlayabilecek bir akım üreten hesaplama devresinden oluşur. Bu hesaplama için, kaynak gerilimi ve yük üzerinden geçen akım referans alınır. Hesaplama referansları için az sayıda bileşene ihtiyaç duyulması ve distorsiyona sebep olan tüm frekanslardaki harmonikleri kompanze

edebilmesi FFT metodunun avantajlarıdır. Analiz metodlarının ve yarıiletken kontrol sistem teknolojilerinin gelişmesiyle verimleri ve akım harmoniği eliminasyon başarısı artan paralel aktif filtrelerin endüstriyel tesislerde kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

4.2.1 Paralel Aktif Filtrelerin Matematiksel Modellemesi

Elektrik şebekesi tam sinüsoidal yapıda olduğunda şebeke gerilimi ideal formdadır:

$$v_s(t) = V_m \cdot \cos wt \quad (4.1)$$

Şebekede nonlinear bir yük olduğunda, yük endüktif ise akım dalga formu gerilimin arkasındadır ve sistemde sonsuz harmonik bileşen meydana gelir:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \cos(nwt - \emptyset_n) = I_{nm} \cos(nwt - \emptyset_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(nwt - \emptyset_n) \quad (4.2)$$

Şebekeden alınan anlık gücün formülü:

$$p(t) = v_s(t) \cdot i(t) \quad (4.3)$$

Şebekeden aktif güç, bu güce fazörel dik olan reaktif güç ve sonsuz sayıda harmonik güç bileşeni çekilir. Şebekeden çekilen gerçek/reel akımın hesaplanması için, aktif güç şebeke gerilimine bölünür. Toplam akım değerinden, gerçek/reel akım değeri çıkarılarak harmonik ve reaktif akım bileşenlerinin değerleri bulunur. Bu harmonik bileşenli ve reaktif bileşenli akımlar paralel aktif filtre tarafından regüle edilerek ideal sinüsoidal akımın çekilmesini sağlar.

Şebekeden çekilen aktif güç ve aktif güç için çekilmesi gereken akımın gerçek bileşeni:

$$p_{ak}(t) = V_m I_{1m} \cos^2 wt \cdot \cos \emptyset_1 \quad (4.4)$$

Bu formülasyondan şebekeden çekilen akımın gerçek/reel bileşeni de bulunabilir:

$$i_s(t) = \frac{p_{ak}(t)}{v_s(t)} = I_{1m} \cos wt. \cos \theta_1 \quad (4.5)$$

Yük akımından gerçek/reel bileşen çıkarıldığında, reaktif akım bileşeni ve akım harmonik bileşenlerinden oluşan distorsiyonlu bozulmuş akım ortaya çıkmaktadır:

$$i_{boz}(t) = i(t) - i_s(t) \quad (4.6)$$

$$i_{boz}(t) = I_{1m} \sin wt. \sin \theta_1 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(nwt - \theta_n) \quad (4.7)$$

4.3. Filtre Tasarımı

Aktif harmonik filtrenin performansı, sistemin dizayn ve karakteristiğine göre değişmektedir. Bu nedenle, filtre sistemleri her endüstriyel tesis için ayrı tasarım gerektirir.

Filtre tasarımı yapılırken akım kaynağı, filtre admitansı ve sistem admitansının ayrıntılı değerlendirilmesi gerekir. Aktif harmonik filtre dizaynı için aşağıdaki parametreler ve seçimler önemlidir (Karuppanan 2012):

- Harmonik bileşen üreten yük kaynağının meydana getirdiği harmonik akım dalga spektrumu,
- Gerekli reaktif gücün doğru hesaplanması,
- Şebekedeki harmonik distorsiyonun tolerans oranı, izin verilen THD
- Dış kaynaklı harmonik seviyesi
- Tasarlanacak aktif harmonik filtrenin çalışma parametreleri (frekans, gerilim, akım, sıcaklık, nem, vb.)
- Kontrol ünitesi ve cihaz seçimi
- Sistemin kritik rezonans frekansı
- Mevcut sistemde pasif filtrasyonun olup olmadığının bilinmesi

- Filtre sisteminin, harmonik bileşen üreten yüklere en yakın lokasyona kurulması

Bir endüstriyel tesisin harmonik probleminin standartlar dahiline indirgenmesi ve bu limitler arasında tutulabilmesi için öncelikle bu tesisin harmonik haritasının belirlenmesi gerekir. Bu haritalandırma, mümkünse tesisin ilk kurulumunda tek hat şemalarının hazırlanma sürecinde başlamalı. Nonlinear yükler kaynağa en yakın noktada tasarlanmalı. Bu tasarımın maksadı; harmonik akım bileşenlerinin vektörel toplamlarının cebirsel toplamında düşük olacağı için, açısız farklarından yararlanıp THDi'yi (toplam akım harmonik distorsiyonu) azaltmaktır.

Harmonik üreten bölümler ayrı bir transformatör altında toplanırsa, bu transformatörün ana barasında konumlandırılacak bir paralel aktif harmonik filtre sistemi ile hassas yükler korunabilir.

5. HARMONİK ÖLÇÜMÜ VE AKTİF FİLTRE SİMÜLASYONU

Bu bölümde, Denizli tekstil sektöründeki bir endüstriyel tesiste (Küçüker Tekstil San.Tic.A.Ş.) yapılan Güç Kalitesi/harmonik analizi ve aktif filtre simülasyonu değerlendirilmiştir. İşletmenin harmonik distorsiyonu yoğun bölgeleri tespit edilerek, iç şebekenin sinüsoidal akım ve dalga formunu bozucu etkiye sahip bölümler ve makineler tespit edilmiştir.

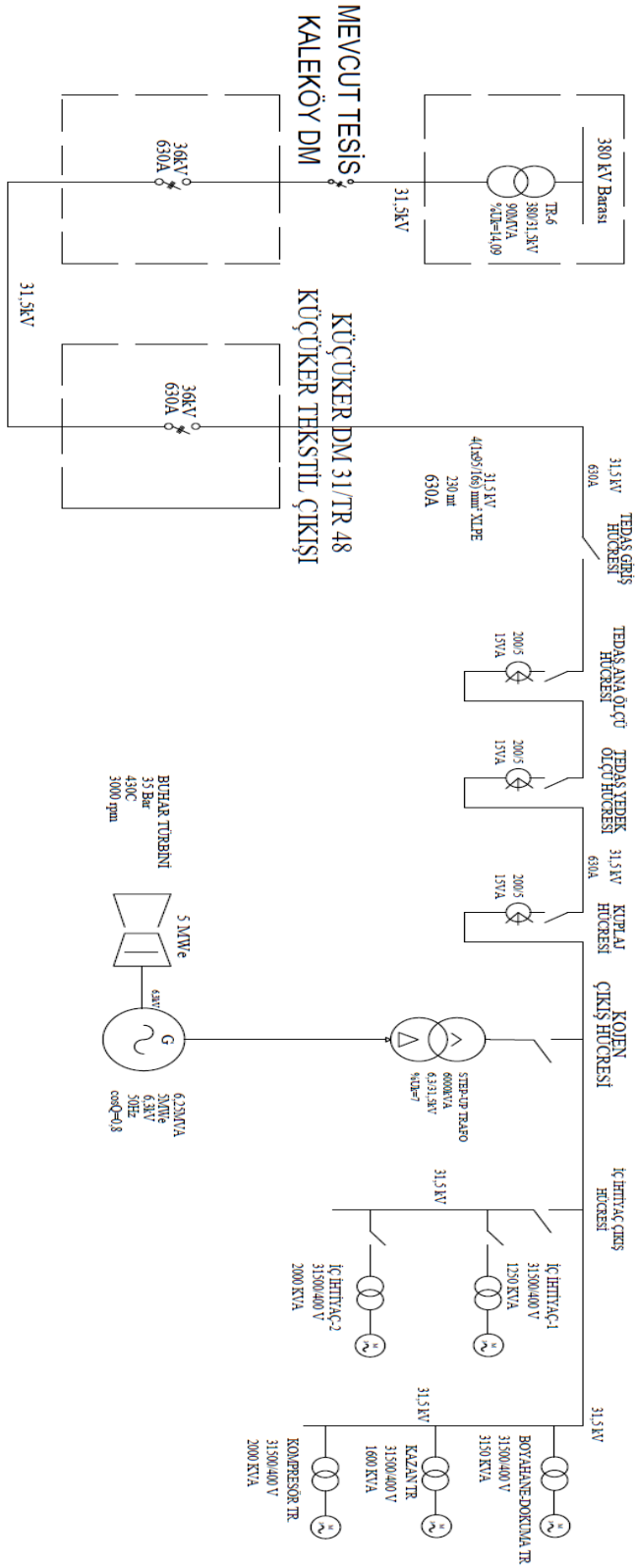
5.1. Tesis Analizi

Bu bölümde, işletmenin kurulu gücü ve güç yoğunluğu hakkında ön bilgi vermek amacıyla güç kalitesi ölçümlerinden önce tesisin ana hatlarını ve yük dağılımını gösteren tek hat şeması ve tablolar gösterilmiştir. Ana dağıtım baralarının belirtildiği OG (orta gerilim) tek hat şeması Şekil 5.1’te gösterilmiştir.

Tesisin yük karakteristiğine değinmeden önce tek hat şemasını yorumlamak gerekirse:

Tesis, Denizli Organize Sanayi TEİAŞ TM-4 trafo merkezindeki yüksek gerilim barasının 1 nolu fiderinden beslenen Kaleköy DM’ye bağlı olan Küçüker K.Ö.K. (Kesici ölçü kabini)’ten 31.5 kV kademesinde enerjilendirilmektedir. Küçüker K.Ö.K.’teki Küçüker fiderinden çıkan hat, enerji üretim tesisi olan Kojenerasyon Enerji Santrali’ndeki giriş kabinine bağlıdır. Çift yönlü ölçüm sayaç noktası, kuplaj hücresi, iç ihtiyaç ve fabrikadaki alt yük transformatörlerini besleyen çıkış hücreleri de Kojenerasyon tesisinde bulunmaktadır.

TEİAŞ DENİZLİ DM31/TR48 380kV TRAFİFO MERKEZİ - TM-4
DENİZLİ 2.1 (ORGANİZE - 1) FİDERİ



Şekil 5.1: Küçükler Tekstil OG tek hat şeması

Tesis, bünyesinde bulundurduğu Kojenerasyon Termik Santrali'nde 6,25 mVA/5mWe kurulu gücünde, 6,3 kV çıkışlı, yüksek basınçlı kızgın buhar tahrikli bir senkron generatör bulundurmaktadır. Bu generatör, ulusal enterkonnekte şebekeye bir kuplaj hücresi ile senkron olmaktadır. Bu generatörün OG gerilimi ile eşlenmesi step-up (yükseltgen) transformatör ile gerçekleşmektedir. Step-up transformatörü ile kojenerasyon tesisinin iç ihtiyaç yükleri olan akışkan yataklı kazan ve buhar türbin sistemlerinin bağlı olduğu transformatörlerin etiketi bilgileri aşağıdaki Tablo 5.1'deki gibidir:

Tablo 5.1: Kojenerasyon tesisi transformatörleri

Parametreler	Kojen Step-Up TR	Türbin İç İhtiyaç TR	Kazan İç İhtiyaç TR
Güç	6 mVA	1.250 kVA	2.000 kVA
Alçak Gerilim	6,3 kV	0,4 kV	0,4 kV
Yüksek Gerilim	31,5 kV	31,5 kV	31,5 kV
Bağlantı Şekli	YNd	DYn	DYn
Kısa Devre Gerilimi(%Uk)	7%	6,54%	6,50%

Kojenerasyon tesisinin altındaki yükler bu şekilde belirtilmiş oldu. İşletmedeki dokuma, boyahane, kazan dairesi, bobin boya vb. yükleri besleyen diğer step-down (alçaltıcı) transformatörler ise Tablo 5.2' de gösterilmiştir.

Tablo 5.2: İşletme transformatörleri

Parametreler	Boyahane-Dokuma TR	Kompresör TR	Kazan-Bobin Boya TR
Güç	3.150 kVA	2.000 kVA	1.600 kVA
Alçak Gerilim	0,4 kV	0,4 kV	0,4 kV
Yüksek Geirlim	31,5 kV	31,5 kV	31,5 kV
Bağlantı Şekli	DYn	DYn	DYn
Kısa Devre Gerilimi (%Uk)	%6,4	%6,3	%6,2

5.2. Harmonik Ölçümleri ve Analizi

İşletme genelinde yük yoğunluğu ve harmonik distorsiyon yoğunluğunun tespit edilmesinde OG ve AG ana dağıtım panolarındaki Entes MPR63 Şebeke Analizörleri'nden faydalanıldı. Harmonik yoğunluğunun tespit edildiği AG panolarında ise daha deyatlı bir analiz yapabilmek için, standartları ve analizleri resmî kurumlar tarafından kabul edilen Chauvin Arnoux C.A 8333 Güç & Kalite Analizörü kullanılmıştır. Gerilim, akım dalga formlarını canlı olarak gösteren ve ayarlanabilir örnekleme zaman aralığında kayıt yapabilen bu cihazla işletme iç şebekesinde farklı örnekleme zaman aralıkları ve sürelerde 9 adet ölçüm yapılmıştır. Bu çalışmada, harmonik bileşenlerin en yoğun olduğu Boyahane fideri üzerinden devam edilecektir.



Şekil 5.2: Harmonik analizi için kullanılan Güç Kalite Analizörü

5.2.1 Harmonik Ölçümleri

İşletme genelinde yapılan ölçümlerde genelden özele doğru bir yol haritası çizildiğinde, öncelikle ana dağıtım noktaları olan büyük yüklerden başlayarak makine bazlı ölçümler yapılmıştır.

5.2.1.1 Boyahane Fideri

Ana dağıtım panolarındaki analizörlerdeki verilerin ışığında; tesiste yük yoğunluğunun en fazla 3.150 KVA transformatörün Boyahane ve Dokuma AG fiderleri olduğu tespit edilmiştir. Güç kalitesi analizörü ile 3 faz + nötr bara ölçümüne ilk bu noktadan başlanılmıştır.



Şekil 5.3: Boyahane ana dağıtım panosu, kompanzasyon panosu ve fider barası

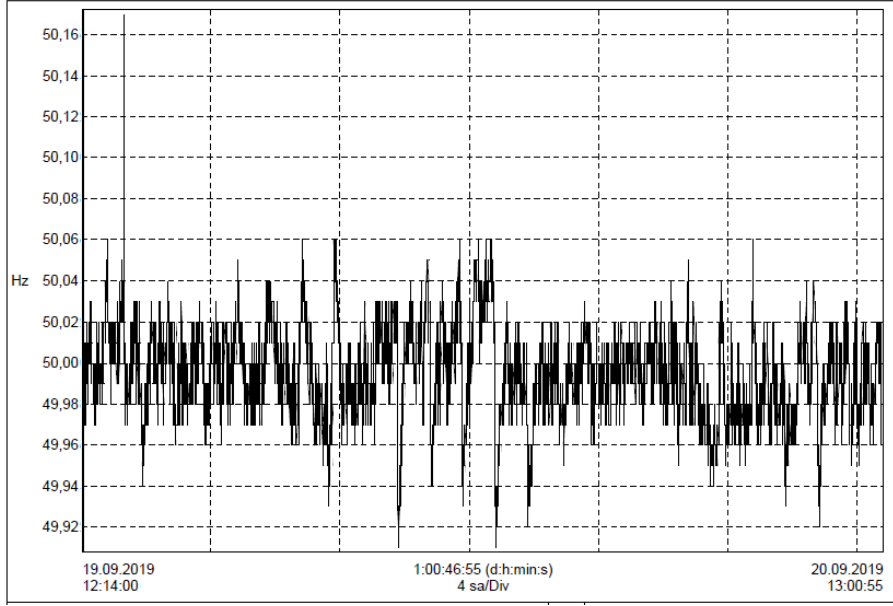
Boyahane fiderinde cos-fi regülasyonu; aktif veya pasif harmonik filtrasyonu olmayan, yüke paralel bir kompanzasyon sistemi sayesinde gerçekleştirilmektedir. Ölçümler kompanzasyon sistemi aktif halde iken yapılmıştır. Sadece son 45 dk kompanzasyon sistemi kapatılmıştır.



Şekil 5.4: Boyahane fideri harmonik ölçümü anlık görüntü (akım harmoniği)

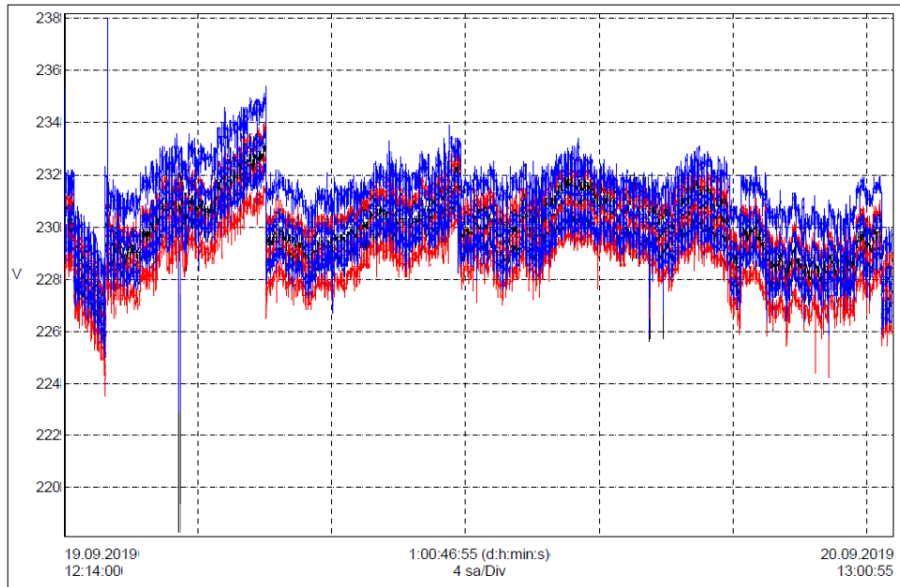


Şekil 5.5: Boyahane fideri harmonik ölçümü anlık görüntü (gerilim harmoniği)



Şekil 5.6: Boyahane fideri frekans grafiği

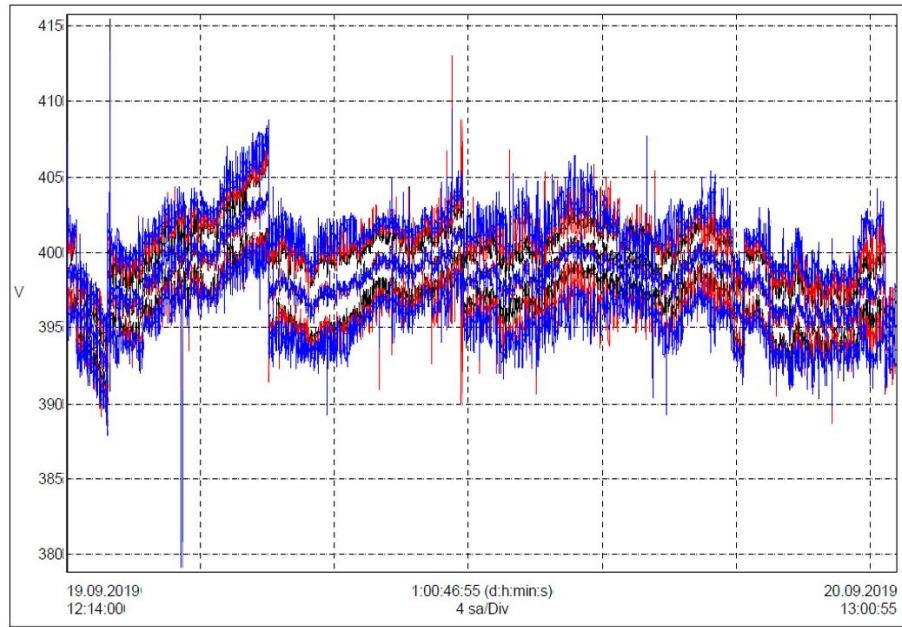
Şekil 5.6'da Boyahane fideri yük altında iken frekans domenindeki değişimler görülmektedir. Ölçüm süresi 24 saat 47 dk dır. Ölçüm süresi boyunca, frekans minimum 49,91 Hz, maksimum 50,17 Hz. olarak kaydedilmiştir. Bu değerler optimum ölçüm aralıklarındadır.



Şekil 5.7: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-nötr)

Tablo 5.3: Boyahane fideri gerilim ölçüm parametreleri

Parametre	Tarih	Zaman	Ortalama	Min.	Maks.	Birimler	Süre	Birimler
V1 rms	19.09.2019	12:14:00	229,9	218,3	236,8	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)
V2 rms	19.09.2019	12:14:00	229,6	223,5	237,2	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)
V3 rms	19.09.2019	12:14:00	230,3	222,9	238,0	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)



Şekil 5.8: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-faz)

Tablo 5.4: Boyahane fideri gerilim ölçüm parametreleri (faz-faz)

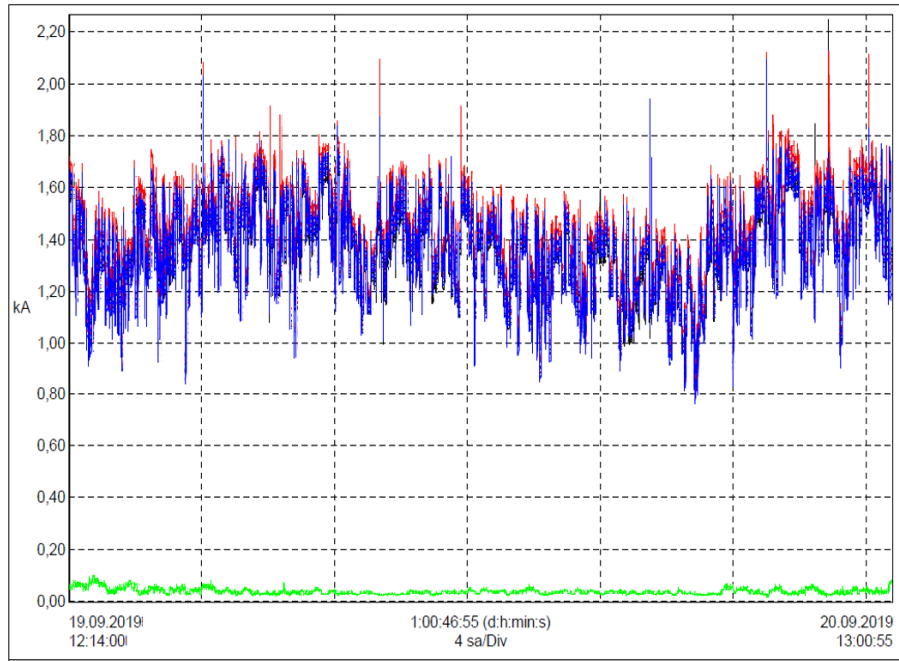
Parametre	Tarih	Zaman	Ortalama	Min.	Maks.	Birimler	Süre	Birimler
U12 rms	19.09.2019	12:14:00	398,3	382,2	415,4	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)
U23 rms	19.09.2019	12:14:00	398,2	388,0	413,0	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)
U31 rms	19.09.2019	12:14:00	398,3	379,2	413,4	V	1:00:47:00	(d:h:min:s)

Şekil 5.7 ve 5.8’de ölçüm süresince yük altında kademe değiştirebilen bir mekanizmaya sahip olan 3.150 KVA transformatörün Boyahane fiderindeki AG barasında faz-nötr ve faz-faz gerilim değişimleri verilmiştir. Gerilimde yaşanan değişimler zaman koordinatında değerlendirildiğinde; işletme yemek saatleri ve vardiya değişimlerinde yüke bağlı olarak gerçekleşmiş doğal bir osilasyon olduğu ortaya çıkıyor. Gerilim seviyelerinde yaşanan bu küçük değişimler limitler dahilinde olup, gerilim faz-faz arası minimum 379,2 Volt, maksimum 415 Volt olarak kaydedilmiştir. Ortalama rms değerleri de:

U12: 398,3 Volt

U23: 398,2 Volt

U31: 398,3 Volt olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.9: Boyahane fideri akım grafiği

Tablo 5.5: Boyahane fideri akım ölçüm parametreleri

Parametre	Tarih	Zaman	Ortalama	Min.	Maks.	Birimler	Süre	Birimler
A1 rms	19.09.2019	12:14:00	1,355	0,782	2,249	kA	1:00:47:00	(d:h:min:s)
A2 rms	19.09.2019	12:14:00	1,404	0,8	2,129	kA	1:00:47:00	(d:h:min:s)
A3 rms	19.09.2019	12:14:00	1,363	0,768	2,098	kA	1:00:47:00	(d:h:min:s)
AN rms	19.09.2019	12:14:00	38,54	16,3	99,5	A	1:00:47:00	(d:h:min:s)

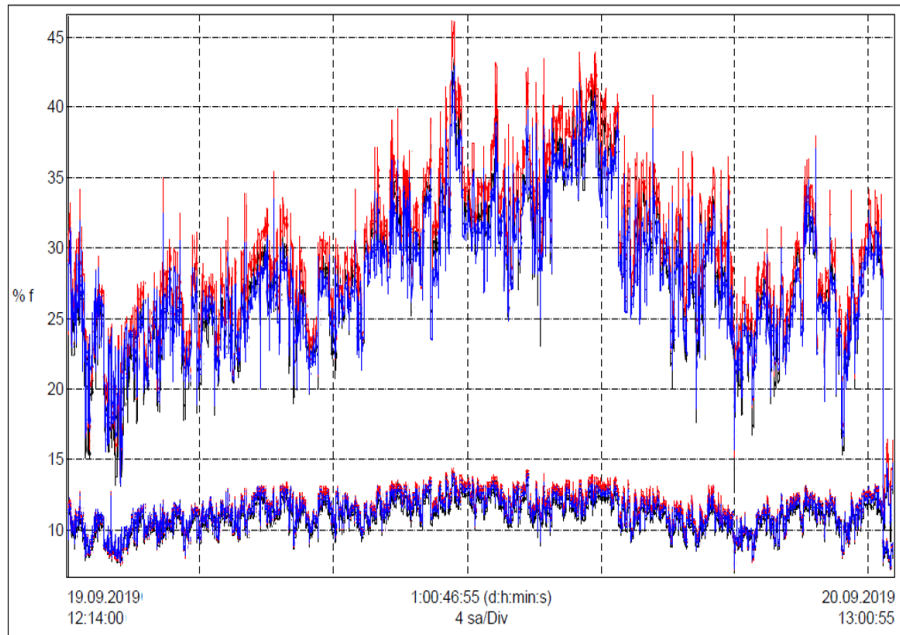
Şekil 5.9’da Boyahane’nin akım grafiği, tablo 5.5’te de parametreleri verilmiştir. Yükte yaşanan değişimler zaman koordinatında değerlendirildiğinde; işletme yemek saatleri ve vardiya değişimlerinde prosese bağlı doğal bir osilasyon olduğu ortaya çıkıyor. Ölçüm süresince minimum akım 782 Amper, maksimum akım 2.249 Amper olarak A1 barasında kaydedilmiştir. Ortalama rms değerleri:

A1: 1.355 Amper

A2: 1.404 Amper

A3: 1.363 Amper

Nötr barasında: 38,54 Amper olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.10: Boyahane fideri akım ve gerilim harmonik grafiği

Tablo 5.6: Boyahane fideri akım ve gerilim harmonik büyüklükleri

İsim	Tarih	Zaman	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler	Süre	Birimler
A1 THDf	19.09.2019	12:14:00	28,11	9,20	43,90	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
A2 THDf	19.09.2019	12:14:00	29,55	10,90	46,20	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
A3 THDf	19.09.2019	12:14:00	27,76	10,30	43,00	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
U12 THDf	19.09.2019	12:14:00	11,23	7,20	14,10	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
U23 THDf	19.09.2019	12:14:00	11,25	7,10	14,00	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
U31 THDf	19.09.2019	12:14:00	11,14	7,20	13,90	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
V1 THDf	19.09.2019	12:14:00	10,81	7,00	13,40	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
V2 THDf	19.09.2019	12:14:00	11,47	7,10	14,40	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)
V3 THDf	19.09.2019	12:14:00	11,38	7,30	14,10	% f	1:00:47:00	(d:h:min:s)

Şekil 5.10 ve Tablo 5.6’da Boyahane fiderindeki akım ve gerilim harmonikleri görülmektedir. Fider altındaki yükün zaman içinde değişen karakteristiğine bağlı olarak akım dalga formunda **%9 - %46,2**, gerilim dalga formunda ise **%11,14 - %14,1** aralığında değişen harmonikler gözlemlenmiştir. 5 sn lik örnekleme zaman aralığında kaydedilen bu veriler, akım ve gerilim dalga formlarında gerçekleşen harmonik bozunumun standartların üzerinde olduğunu gösteriyor.

Akım ve gerilim harmoniklerinin ortalama değerleri:

A1 THD: % 28,11

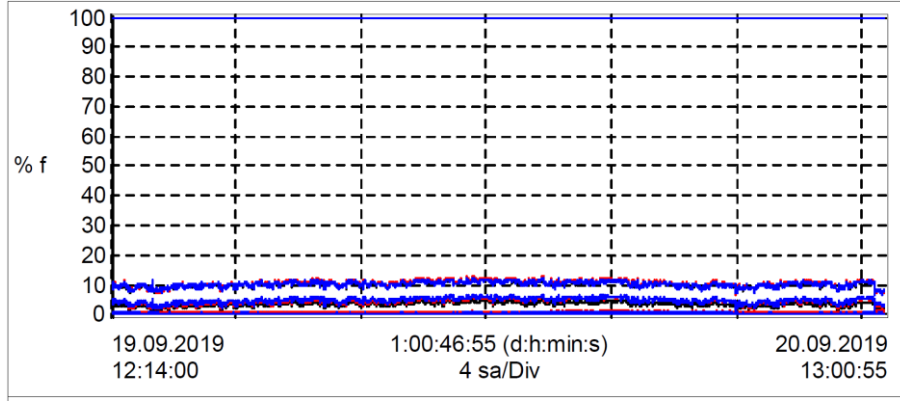
A2 THD: % 29,55

A3 THD: % 27,76

U12 THD: % 11,23

U23 THD: % 11,25

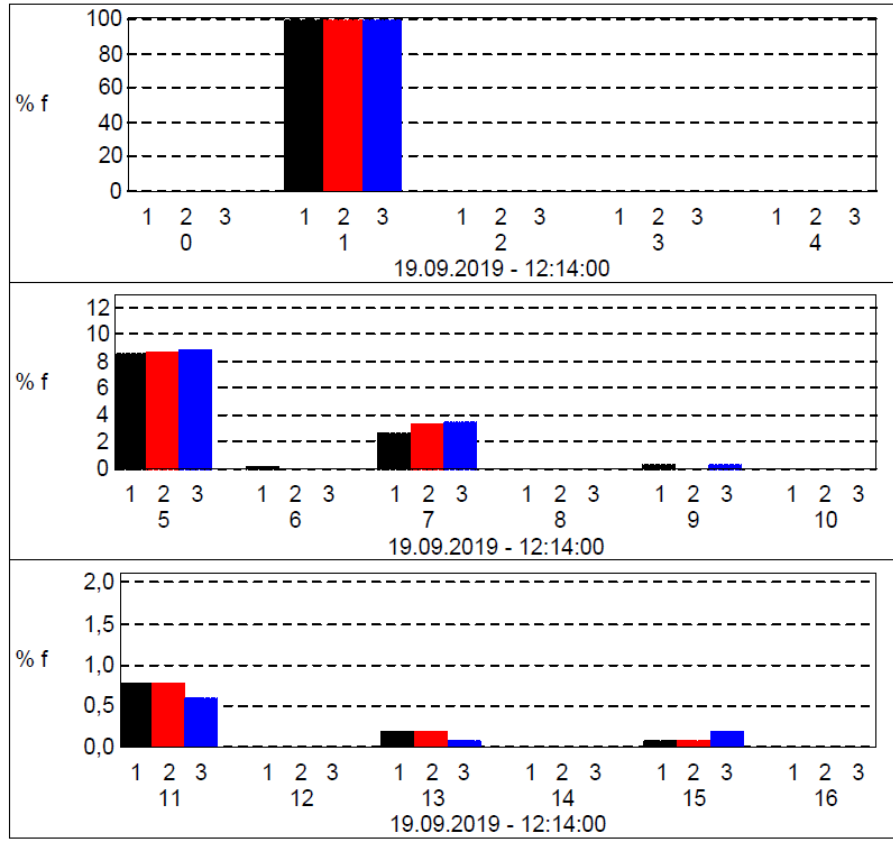
U31 THD: % 11,14



Şekil 5.11: Boyahane fideri gerilim harmonik bileşenleri

Tablo 5.7: Boyahane fideri gerilim harmoniği kademeleri ve büyüklükleri

İsim	ORT	MİN.	MAKS.	Gösterim
V1 Hf 0	0,209	0,200	0,30	% f
V1 Hf 1	100,0	100,0	100,00	% f
V1 Hf 2	0,047	0,00	0,20	% f
V1 Hf 3	0,093	0,00	0,20	% f
V1 Hf 4	0,078	0,00	0,30	% f
V1 Hf 5	10,160	6,600	12,20	% f
V1 Hf 6	0,217	0,00	0,60	% f
V1 Hf 7	3,543	1,000	5,40	% f
V1 Hf 8	0,110	0,00	0,30	% f
V1 Hf 9	0,530	0,100	0,70	% f
V1 Hf 10	0,000	0,00	0,10	% f
V1 Hf 11	0,573	0,100	2,10	% f
V1 Hf 12	0,007	0,00	0,10	% f
V1 Hf 13	0,143	0,00	0,90	% f
V1 Hf 14	0,000	0,00	0,00	% f
V1 Hf 15	0,118	0,00	0,30	% f

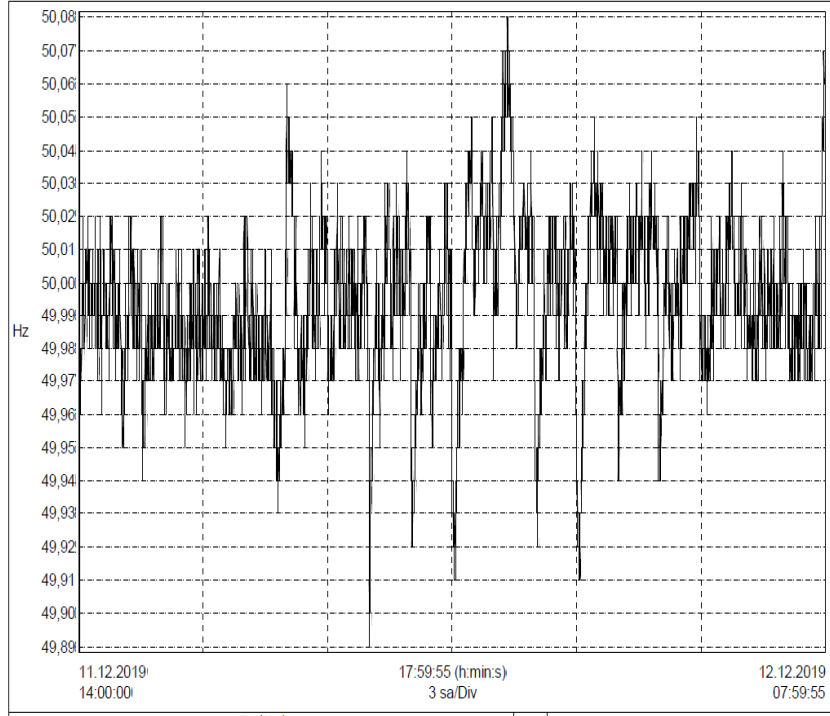


Şekil 5.12: Boyahane fideri gerilim harmonik bileşenleri bar grafiği

Şekil 5.11, 5.12 ve Tablo 5.7’de gerilim harmonik bileşenleri belirtilmiştir. Grafiklerdeki ve tablodaki verilerden, bu fiderde 5. ve 7. harmoniklerin baskın olduğu sonucu çıkmaktadır. İşletmedeki makine parkuru ve motor-inverter envanteri de göz önünde bulundurulduğunda, 6 darbeli sürücülerin akım ve gerilim sinüsoidal dalga formunu bozan harmoniklerin ana sebebi olduğu anlaşılmıştır. Akım harmonikleri toplamda yaklaşık 350 A’dır.

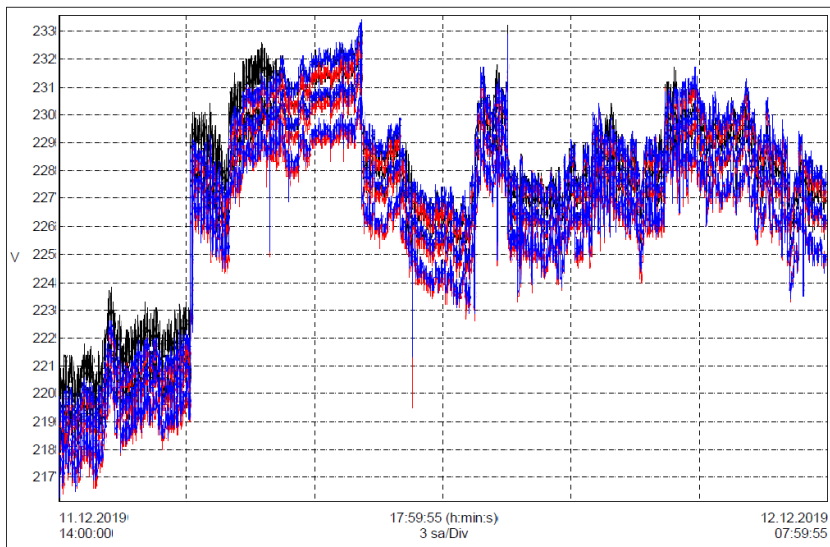
Boyahane fiderinde yapılan bu ölçüm kompanzasyon sistemi aktif halde iken yapılmıştır. Kompanzasyon sistemindeki kondansatörlerin rezonans etkisiyle meydana getirdikleri akım harmonikleri ve akım harmoniklerinden dolayı oluşan ekstra gerilim harmoniklerini belirlemek için kompanzasyon sistemi kapatılıp 18 saatlik bir ölçüm daha yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları da aşağıdaki gibidir:

İsim	Tarih	Zaman	ORT	MIN.	MAKS	Örnekler	Süre	Birimler
F	11.12.2019	14:00:00	49,99	49,89	50,08	12960	18:00:00	(h:min:s)



Şekil 5.13: Boyahane fideri frekans grafiği_2

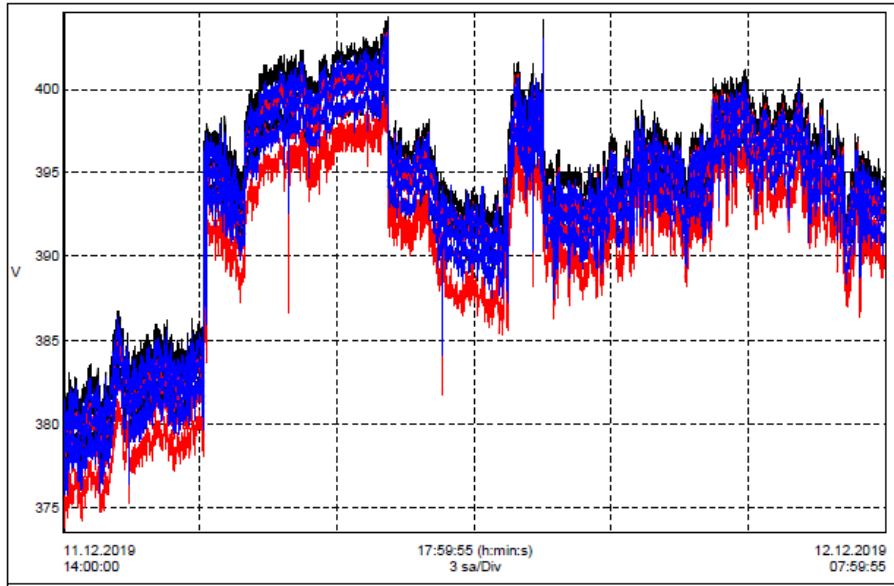
Şekil 5.13'teki verilere göre; ölçüm süresinde frekans minimum 49,89 Hz, maksimum 50,08 Hz ve ortalama 49,99 Hz olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.14: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-nötr)_2

Tablo 5.8: Boyahane fideri gerilim verileri (faz-nötr)_2

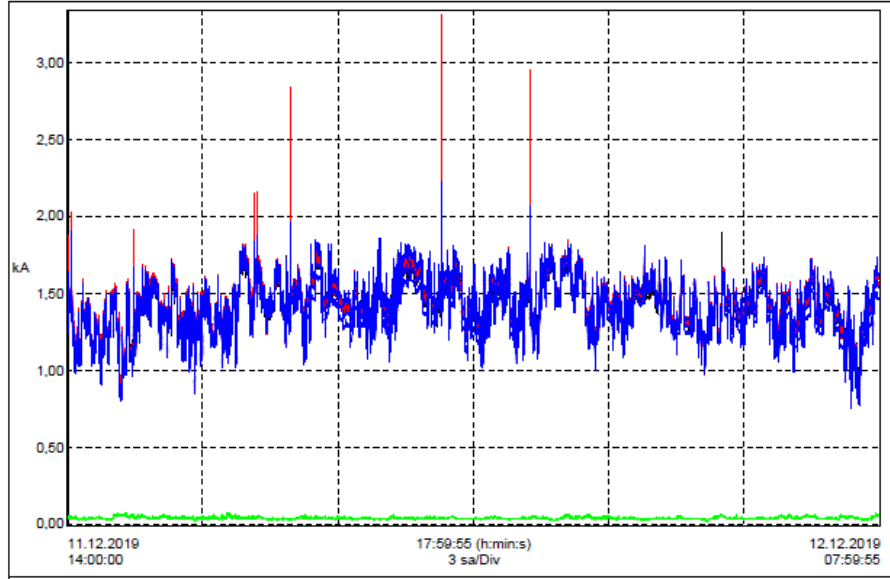
İsim	Tarih	Zaman	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler	Süre	Birimler
V1 rms	11.12.2019	14:00:00	227,3	217,40	233,20	V	18:00:00	(h:min:s)
V1 rms	11.12.2019	14:00:00	226,4	216,40	232,90	V	18:00:00	(h:min:s)
V1 rms	11.12.2019	14:00:00	226,3	216,30	233,40	V	18:00:00	(h:min:s)



Şekil 5.15: Boyahane fideri gerilim grafiği (faz-faz)_2

Tablo 5.9: Boyahane fideri gerilim verileri (faz-faz)_2

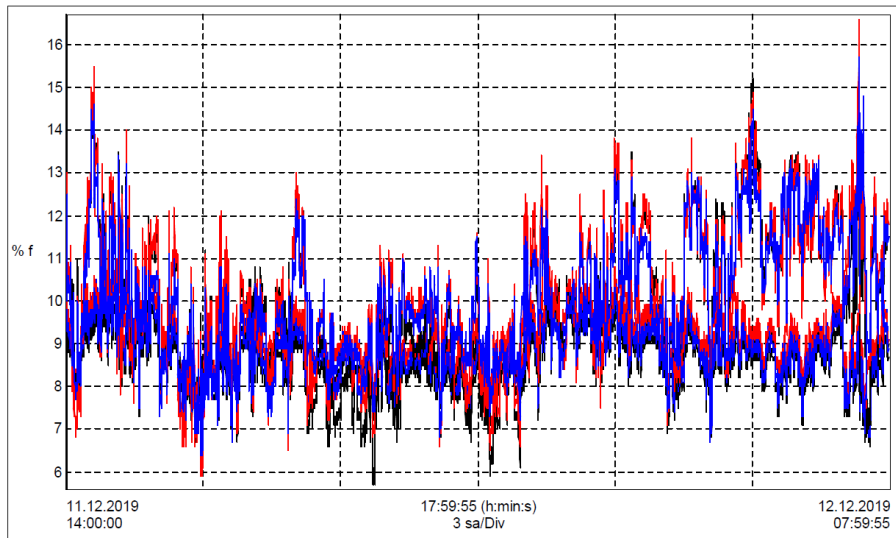
İsim	Tarih	Zaman	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler	Süre	Birimler
U12 rms	11.12.2019	14:00:00	393,4	376,50	404,30	V	18:00:00	(h:min:s)
U23 rms	11.12.2019	14:00:00	391,8	373,80	403,40	V	18:00:00	(h:min:s)
U31 rms	11.12.2019	14:00:00	392,9	375,80	403,50	V	18:00:00	(h:min:s)



Şekil 5.16: Boyahane fider akım grafiği _2

Tablo 5.10: Boyahane fideri akım verileri _2

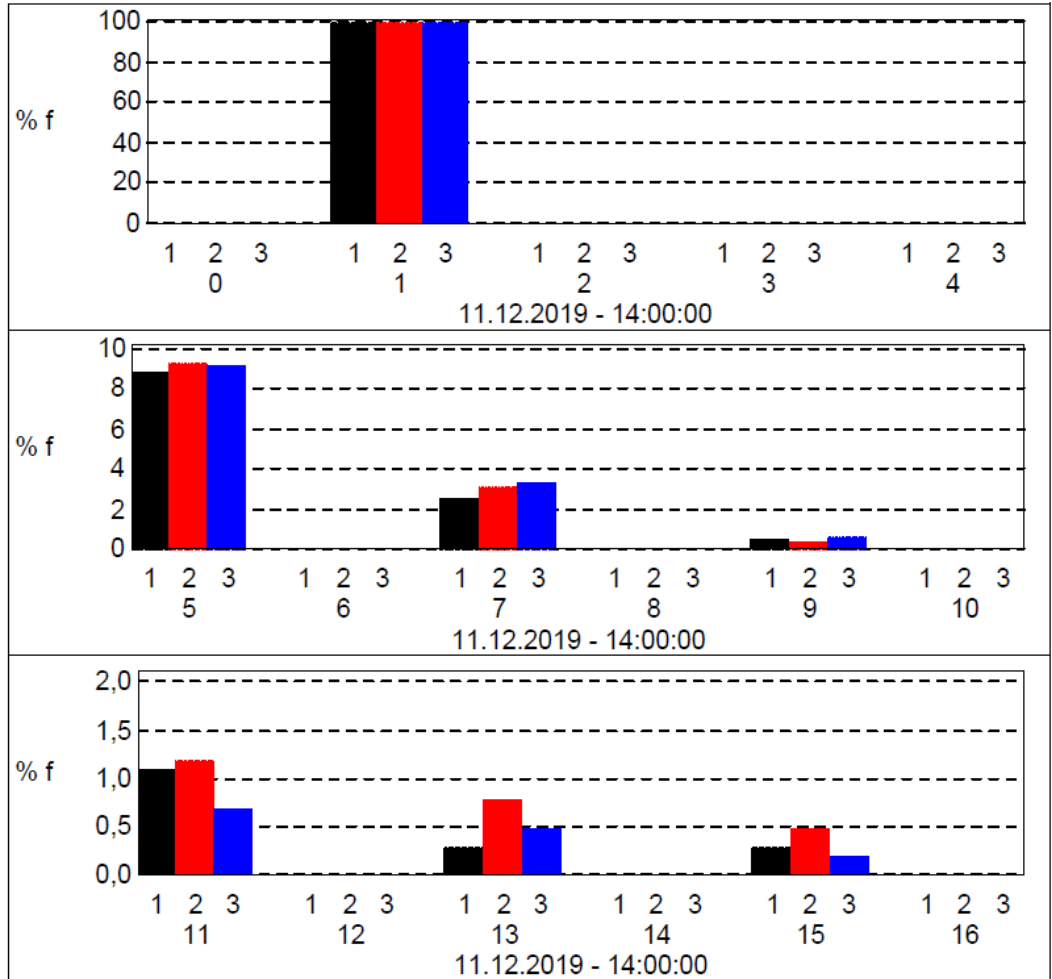
İsim	Tarih	Zaman	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler	Süre	Birimler
A1 rms	11.12.2019	14:00:00	1,409	0,87	2,42	kA	18:00:00	(h:min:s)
A2 rms	11.12.2019	14:00:00	1,425	0,84	3,31	kA	18:00:00	(h:min:s)
A3 rms	11.12.2019	14:00:00	1,398	0,76	2,23	kA	18:00:00	(h:min:s)
AN rms	11.12.2019	14:00:00	44,31	20,60	76,80	A	18:00:00	(h:min:s)



Şekil 5.17: Boyahane fideri akım-gerilim harmonik grafiği _2

Tablo 5.11: Boyahane fideri akım-gerilim harmonik verileri_2

İsim	Tarih	Zaman	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler	Süre	Birimler
A1 THDf	11.12.2019	14:00:00	9,925	5,70	15,20	% f	18:00:00	(h:min:s)
A2 THDf	11.12.2019	14:00:00	10,08	5,90	16,60	% f	18:00:00	(h:min:s)
A3 THDf	11.12.2019	14:00:00	10,01	6,40	15,70	% f	18:00:00	(h:min:s)
U12 THDf	11.12.2019	14:00:00	8,804	6,80	10,50	% f	18:00:00	(h:min:s)
U23 THDf	11.12.2019	14:00:00	9,031	7,00	10,80	% f	18:00:00	(h:min:s)
U31 THDf	11.12.2019	14:00:00	8,752	6,80	10,50	% f	18:00:00	(h:min:s)
V1 THDf	11.12.2019	14:00:00	8,515	6,60	10,20	% f	18:00:00	(h:min:s)
V2 THDf	11.12.2019	14:00:00	9,102	7,00	11,00	% f	18:00:00	(h:min:s)
V3 THDf	11.12.2019	14:00:00	7	7,00	10,80	% f	18:00:00	(h:min:s)



Şekil 5.18: Boyahane fideri gerilim harmonik bar grafiği _2

Tablo 5.12: Boyahane fideri gerilim harmonik kademeleri_2

İsim	ORT	MİN.	MAKS.	Birimler
V1 Hf 1	100	100	100	%f
V1 Hf 3	0,209	0,1	0,3	%f
V1 Hf 5	7,955	6,2	9,6	%f
V1 Hf 7	2,576	1,1	3,6	%f
V1 Hf 9	0,421	0,2	0,7	%f
V1 Hf 11	1,363	0,6	2,1	%f
V1 Hf 13	0,337	0,2	0,6	%f
V1 Hf 15	0,265	0,1	0,4	%f

Boyahane fiderinde kompanzasyon sistemindeki kondansatör kademeleri kontrollü şekilde kapatıldıktan sonra oluşan akım ve gerilim harmonik grafiği Şekil 5.14'te, gerilim harmonik kademelerinin yoğunlukları da Tablo 5.12'de belirtilmiştir.

Grafik ve tablo verilerine göre toplam akım ve gerilim harmoniği ortalaması:

A1 THD: % 9,925 (Öncesi % 28,11)

A2 THD: % 10,08 (Öncesi % 29,55)

A3 THD: % 10,01 (Öncesi % 27,76)

U12 THD: % 8,804 (Öncesi % 11,23)

U23 THD: % 9,031 (Öncesi % 11,25)

U31 THD: % 8,752 (Öncesi % 11,14)

olarak ölçülmüştür.

Bu durumda, harmonik filtrasyon olmayan kompanzasyon sistemlerinde, kondansatörlerin rezonans sebebiyle akım harmoniklerini çok ciddi artırdığı görülmektedir. Kondansatör kademeleri kapatıldığında akım harmonikleri ortalama % 65 düşmüştür. Bu manevraya bağlı olarak, akım harmoniklerinden kaynaklanan gerilim harmonikleri de düşmüştür. Gerilim harmonikleri ise üç fazda ortalama %21 düşmüştür. Yükler aynı olduğu için 5 ve 7. harmonikler baskınlığını korumakta.

Tablo 5.13: Akım ve gerilim harmoniği karşılaştırması

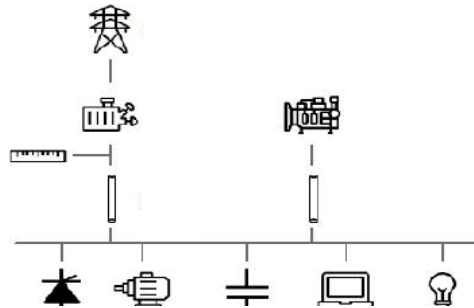
<i>Harmonik</i>	Kompanzasyon Sistemi Aktif	Kompanzasyon Sistemi Kapalı	Harmonikte Düşüş
A1 THD	9,925	28,11	65%
A2 THD	10,08	29,55	66%
A3 THD	10,01	27,76	64%
U13 THD	8,804	11,23	22%
U23 THD	9,031	11,25	20%
U31 THD	8,752	11,14	21%

5.3. Tesisin PQF-Size ile Benzetimi

Tesisin harmonik yoğun bölgesi olarak tespit edilen, proseslerde 6 darbeli sürücülerin yoğun olarak kullanıldığı Boyahane fiderindeki akım ve gerilim dalga formlarındaki bozunumlara çözüm olarak, bu fider için 450 Amper paralel aktif harmonik filtre simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonda, kompanzasyon sistemi deaktive edilerek konulacak bir harmonik filtre sistemi ile hem reaktif güç kompanzasyonu hem de harmonik eliminasyonu gerçekleştirileceği öngörülmüştür.

Benzetim çalışmasında kullanılacağı öngörülen Paralel Aktif Harmonik Filtre sistemi 3 faz bağlantılı ABB PQFI-M45 (450 A) modelidir. Bu model, ağır endüstriyel yükler için kullanılan bir üründür. Bir web tabanlı yazılım olan ABB PQF-Size ile, bu cihazın benzetim çalışması yapılarak sonuçları analiz edilmiştir.



Şekil 5.19: Paralel Aktif Harmonik Filtre'nin bağlanacağı tesisin yük karakteristiği şematiği

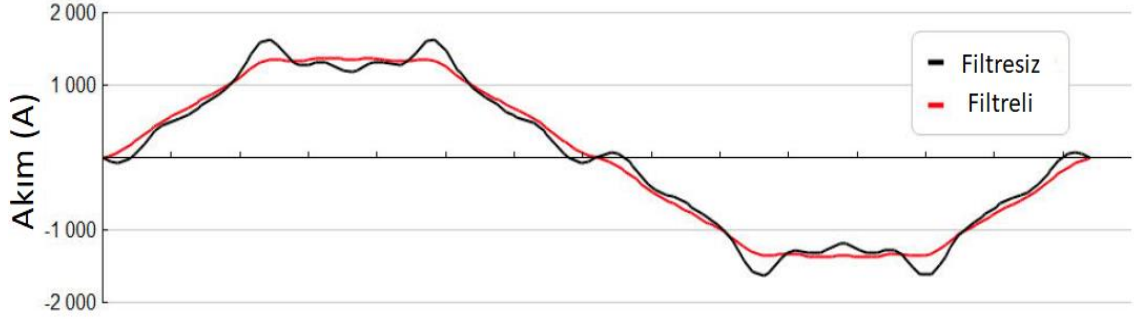
Çözüm için bu modelin tercih edilmesinde, ürünün işletme ihtiyaçlarını karşılayabilecek avantajlara sahip olması belirleyici olmuştur. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

- IEEE uluslararası yönergelerine ve standartlarına göre imal edilmiştir.
- 20. harmoniğe kadar eş zamanlı filtrasyon gerçekleştirip, 50. harmoniğe kadar bileşen seçebilmektedir.
- En iyi doğruluk faktörü için kapalı çevrim sistemi ile çalışarak %97'den yüksek harmonik azaltma faktörüne sahiptir.
- Programlanabilir filtreleme stratejisi ve harmonik seçimi özelliğine sahiptir. Seçilen harmonikler için hedeflenen düzeltme seviyesi cihaz için uygundur.
- Reaktif güç üretebilir ve güç faktörü kontrolü yapar. Endüktif ve kapasitif yükler için kademesiz reaktif güç kompanzasyonu yapabilir.
- Faz-faz ve faz-nötr arası yük akımlarını dengeler.
- Kurulumu ve kullanımı kolaydır.
- Özel akım trafosu gerektirmez.



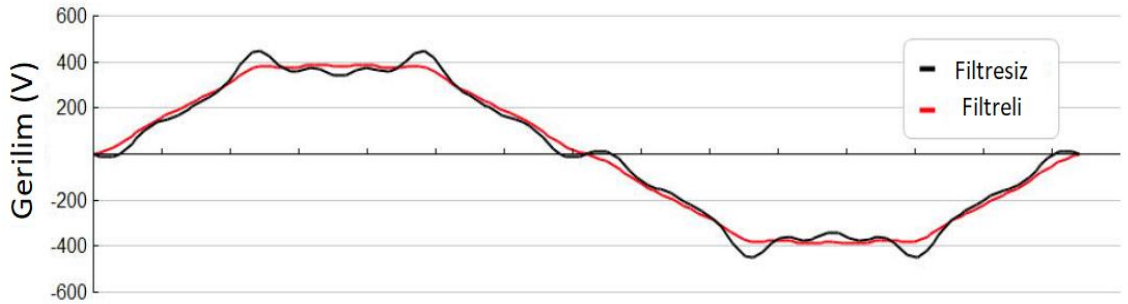
Şekil 5.20: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre

Sisteme paralel bağlanan aktif harmonik filtreler, yükte var olan harmonik akım bileşenleri ile aynı büyüklükte ve zıt yönde harmonikleri enjekte eder, böylece sistemdeki harmonikleri elimine eder. Paralel aktif filtre sistemleri bir akım kaynağı gibi davranırlar.



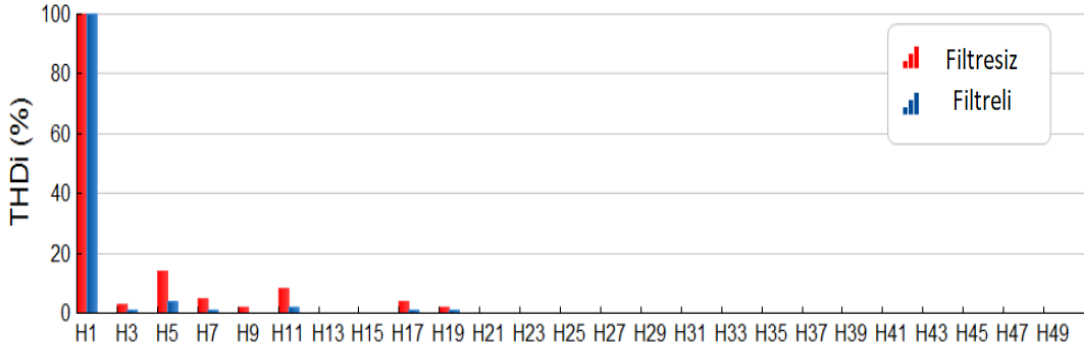
Şekil 5.21: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda akım dalga formu

Şekil 5.21'de de görülebileceği üzere akım dalga formu saf sinüsoidal forma oldukça yaklaşmıştır.



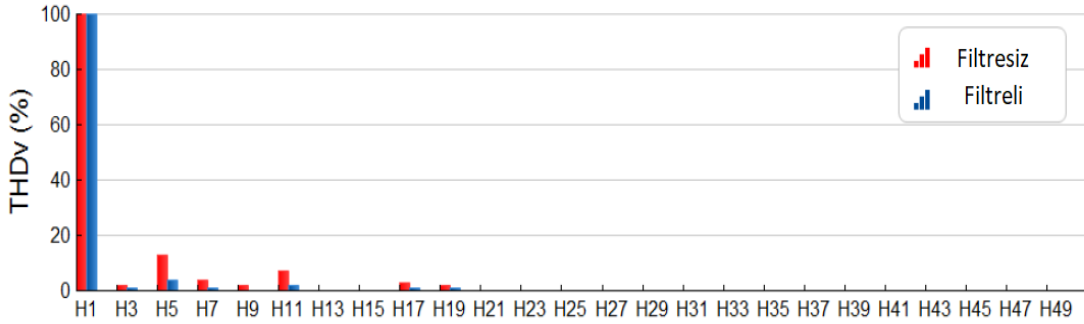
Şekil 5.22: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda gerilim dalga formu

Şekil 5.22'de de görülebileceği üzere gerilim dalga formu da saf sinüsoidal forma oldukça yaklaşmıştır. Grafik faz-faz arası gerilimi göstermektedir.



Şekil 5.23: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda akım harmonikleri

Paralel aktif filtre ile, tesisin iç şebekesinde yoğun olarak bulunan 5. ve 7. akım harmonik bileşenlerin bastırılacağını Şekil 5.23'teki simülasyon grafiğinde görebiliyoruz. Filtrasyon ile akım harmoniği, kompanzasyon kapalı sistemde %10 seviyelerinden %3 lere inmiştir.



Şekil 5.24: PQFI Paralel Aktif Harmonik Filtre simülasyonunda gerilim harmonikleri

Paralel aktif filtre ile, 5. ve 7. mertebede baskın gerilim harmonik bileşenlerinin de bastırılacağını Şekil 5.24'teki simülasyon grafiğinde görebiliyoruz. Filtrasyon ile gerilim harmoniği, %9 seviyelerinden %5,5 oranlarına inmiştir. Bu oran, AG tesisler için uygun limitlere yakındır. Tesisteki diğer yüklerden kaynaklı harmonikler de elimine edildiğinde, iç şebekedeki THDi ve THDv daha uygun seviyelere inecektir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrik güç sistemlerinde bir güç kalitesizliği olan harmoniklerin sebepleri, kaynakları, güç sistemi üzerinde meydana getirdikleri olumsuz etkileri ve matematiksel modellenmesi araştırılmıştır. Akabinde, harmoniklerin engellenmesi için alınabilecek önlemler ve filtreleme sistemleri incelenmiştir.

Ana dağıtım panosu üzerindeki analizör ile “harmonik yoğun bölge” olarak tespit edilen Boyahane Fideri’nde, Güç Kalite Analizörü ile daha ayrıntılı bir ölçüm yapıldığında; yük karakteristiğine bağlı ve kompanzasyon sisteminin filtresiz oluşundan kaynaklanan harmoniklerin yoğunluğu tespit edilmiştir. Gerilim ve akım dalga formları incelenip, harmoniklerin hangi kademelerde yoğunlaştığı azaltılmıştır. 6 darbeli dönüştürücülerin yoğun olarak kullanıldığı işletmede 5. ve 7. harmoniklerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Kompanzasyon sisteminin de harmonik filtresiz oluşu, özellikle akım harmoniklerinde rezonans nedeniyle ciddi bir artışa yol açtığı tespit edilerek verilerle ispatlanmıştır. Bu değerlendirmeler neticesinde, bu fidere uygulanan Aktif Harmonik Filtre simülasyonu ile, gerilim ve akım harmoniklerinin uygun değerlere çekilebileceği raporlanmıştır.

Benzetim çalışması sonrası elde edilen veriler ışığında, harmonik yoğun bu fider için Aktif Harmonik Filtre uygulaması için tedarikçi firmalarla görüşülmeye başlanmıştır.

Çalışma süresinde edinen bilgi ve tecrübeler ek olarak elde edilen bulgular ışığında, endüstriyel tesislerde harmoniklerin önlenmesi ve elimine edilebilmesi için sunulabilecek bazı öneriler aşağıda verilmiştir:

- Endüstriyel tesislerde harmonik, son yıllarda farkındalığı artmış bir konu olmaya başlamışsa da işletmede teknik ve güvenlik sorununa yol açmadıkları müddetçe sürekli takip edilen bir parametre değil. Bu da işletme proseslerinde verim kaybına, kalite düşüşüne, enerjinin tasarruflu kullanılmamasına, gerilim kayıplarına, rezonans olaylarına, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına neden olabilmektedir. Nonlineer yükler içeren elektrik güç sistemlerinde, akım ve gerilim harmonik kaynaklarının belirlenip, bunlara önlemler alınması gerekmektedir.

- Tesislerin ilk kurulum aşamalarında, harmoniklerin engellenebilmesi ve azaltılabilmesi için alınabilecek ekonomik önlemler mevcuttur. Filtre yatırımı yapmadan önce bu alternatifler mutlaka değerlendirilmelidir.
- Sistemde dengesiz yüklenmelerin önüne geçebilmek için yüklerin dağılımına ilk tasarım aşamasında önem verilmeli. Nonlineer yükler, lineer yüklerden ayıştırılmalı ve farklı transformatörlerden beslenmeli.
- Endüstriyel tesislerde yoğun olarak kullanılan dönüştürücüler(inverter-converter) çoğunlukla 6 darbeli doğrultma devrelerinden oluşmaktadır. Ancak en çok akım harmoniği üreten kaynaklar bunlardır. 12 ve 24 darbeli doğrultma devreleri daha yüksek frekans mertebelerinde harmonik üretirler, dolayısıyla TDHi'ye etkileri daha az olur.
- Transformatörlerin U_k kısa devre gerilim empedansları, kritik rezonans frekansını etkilediği için oluşabilecek harmonik distorsiyonu etkiler. Transformatör seçiminde U_k parametresi de dikkate alınmalıdır.
- Kompanzasyon sistemlerinin tasarımında, kritik rezonans frekansı iyi tayin edilerek filtrasyon işlemleri yapılmalı.
- Harmoniklerin çok yüksek olduğu tesislerde, pasif filtrasyon ile aktif filtrasyon hibrit sistem olarak birlikte kullanılabilir. Ancak burada tesise özel filtre sistemleri tasarlanmalıdır.
- Özellikle endüstriyel tesislerde yoğunluğunu artırmaya devam eden harmonikler için, mevcut ve yeni yatırım tesislerinde uzaktan sayaç okuma sistemleri ile harmonikler takip edilip, kompanzasyon limitleri gibi ceza-i müeyyideye tabi tutularak şebeke kalitesizliği önlenabilir.

7. KAYNAKLAR

Ahmed, I., Shames, M.Z. and Alam, M.M., “An Overview of Harmonic Sources in Power System”, *Department of Electrical and Electronics Engineering, Ahsanullah University of Science and Technology, ISOR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Bangladesh, (IOSR-JEEE), e-ISSN: 2278-1676, Vol.7(3), 01-03, (2013).*

Akmaz, D., “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması için Aktif Güç Filtre Tasarımları”, (2012).

Csanyi, E., “How Bad Harmonoics Influence the Work of Motors and Generators, Trasformers, Capacitors etc”, *Electrical Engineering Portal, (2017).*

Çelebi, A., Çolak, M., “Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemlerde Oluşan Harmoniklerin Şebekeye Etkileri” (Araştırma Makalesi), *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir, (2019).*

Dalcı, K.B., Yumurtacı, R., Bozkurt, A., “Harmonic Effects on Electromechanical Overcurrent Relays” (Araştırma Makalesi), *Electrical Engineering Department, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doğu Üniversitesi Dergisi, 6(2), 202-209, (2005).*

Duman, S., Ferik, Y., Alboyacı, B., Yörükeren N., “Doğru Akımla Çalışan Ark Ocaklarında Harmonik Analizi” (Araştırma Makalesi), *Düzce Üniversitesi, Kocaeli Üniversitesi.*

Efe, S.B., 2006. “Güç Sitemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İnönü Üniversitesi, Malatya, (2006).*

Ekrem, B., “Fourier Transform”, <https://www.baranekrem.net/sinyallerimdeki-seytanlar-fourier-transform/>, (2019).

Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, *İkinci Kısım, Üçüncü Bölüm*, (2001).

Elektrikstok.com, "Elektrikte harmonik nedir Harmonik ne demek", <https://www.elektrikstok.com/elektrikte-harmonik-nedir-harmonik-ne-demek>, (2018).

Girgin, Ö., Sarul, M.H., Bakan, A.F., "Düşük Harmonikli 12 Darbeli Doğrultucu Tasarımı" (Araştırma Makalesi), *Elektrik-Elektronik Fakültesi*, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

IEEE, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems 1993", IEE Std 519-1992, (1993).

Karuppanan, P., "Design and Implementation of Shunt Active Power Line Conditioner using Novel Control Strategies" (Doctor of Philosophy Thesis), *Department of Electronics and Communication Engineering*, National Institute of Technology, Rourkela (Odisha), India, (2012).

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, (2003).

Lucas, J.R "Analysis of Non-sinusoidal Waveforms", *Theory of Electricity*, Part 1, (2001).

Özdemir, E., Özdemir, Ş., Kale, M., "Aktif Güç Filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu" (Araştırma Makalesi), *Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

Öztura, H.Ş., "Power Quality and Harmonic Analysis of Iron and Steel Industry" (Master's Thesis), *Department of Electrical and Electronics Engineering*, Yaşar University, İstanbul, (2015).

Power Quality and Harmonics: Causes and Effects, *Premium Power Web Site*, (2019).

Rüstemli, S., Cengiz, M.S., Dinçer, F., “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu”, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü*, Bitlis Eren Üniversitesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Bitlis, Hatay, (2013).

Schneider Electric, “Harmonics and Transformers”, *Schneider Electric/Merlin Gerin*, T6.

Singh, B., Al-Haddad, K., “A Review of Active Filters for Power Quality Improvement”, *IEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol 46(5), IEE, (1999).

Sucu, M., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu” (Yüksek Lisans Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik Ana Bilim Dalı, Elektrik Eğitimi Programı, Marmara Üniversitesi, Bölüm 3, İstanbul, (2003).

Şahin, Ö., “Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi” (Yüksek Lisans Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2003).

Şekerci, H., Uzunkuyu, B., “K-Faktörünün Transformatördeki Önemi” (Araştırma Makalesi), Yaşar Üniversitesi, Elta Elektrik.

Şerbetçi, M.B., “Harmonik Problemi Olan Tesislerde Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Analizi” (Yüksek Lisans Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2019).

Tuğ, L., Yavuz, C., “Alçak Gerilimde Aktif Filtre ile Akım Harmoniklerinin Etkisinin Azaltılması” (Akademik Paltform 618-626), *Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.*

Ünlüsoy, B., “Enerji Kalitesi, TS EN50160 Standardı ve Ülkemizdeki Uygulamaları”, *Schneider Elektrik San. Ve Tic. A.Ş., İstanbul, Türkiyei, (2019).*

Yıldız, Ş.N., “Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Elektrik Enerjisinde Kalitenin Yükseltilmesi” (Yüksek Lisans Tezi), *Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Cumhuriyet Üniversitesi, (2006).*

Zile, M., “Üç Fazlı Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Harmoniklerin Analizi ve Önlenmesi” (Araştırma Makalesi), *Mersin Üniversitesi, Mersin.*

3eeletrotech, “Şebekede Gizli Tehlike Harmonikler”, *Dijital Arşiv, (2018).*

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ethem ORUCU

Doğum Yeri ve Tarihi : Kütahya / 01.01.1994

Lisans Üniversite : Fatih Üniversitesi / İstanbul Üniversitesi

Elektronik posta :ethemorucu@gmail.com

İletişim Adresi :Sergazı Mh. 411 Sk.No:4 Merkezefendi/Denizli