



ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE HARMONİK OLAYLARIN ANALİZİ

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Ümit GÖK

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞİMŞİR**

ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE HARMONİK OLAYLARIN ANALİZİ

Ümit GÖK

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞİMŞİR

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Şubat 2023

Ümit GÖK tarafından hazırlanan “ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE HARMONİK OLAYLARIN ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞİMŞİR
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/02/2023

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞİMŞİR (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Hüseyin Oktay ERKOL (BANÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ümit GÖK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE HARMONİK OLAYLARIN ANALİZİ

Ümit GÖK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞİMŞİR

Şubat 2023, 75 sayfa

Elektrik enerjisi günümüzde vazgeçilemez bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Her geçen gün artan teknoloji ile birlikte kullanıcıların yük çeşitliliği de artmaktadır. Şebekeden beslenen kullanıcıların nonlineer yük çeşitliliğinin artması şebeke üzerinde birtakım elektrik güç kalitesi problemlerine de yol açmaktadır. Bu elektrik güç kalitesi problemlerinden en önemlilerinden biride harmonik bileşenlerdir. Harmonik bileşenlerin etkileri sonucunda güç sistemlerinde gerilim düşümlerinin artması, rezonans olayları, enerji tüketiminde artış, transformatörlerde aşırı ısınma, elektrik motorlarının aşırı ısınması gibi olumsuz olaylar meydana çıkabilmektedir.

Bu tez çalışmasında güç sistemlerini etkileyen en önemli elektrik güç kalitesi problemlerinden biri olan harmonikler üzerinde durulmuştur. Öncelikle harmoniğin tanımı yapılarak harmonik bileşenlerin nasıl ortaya çıktığı, güç sistemimizde kullanmış olduğumuz elemanlara nasıl zararlar verdiği araştırılmıştır. Harmonik bileşenlerin Fourier yöntemi ile analizi yapılarak tesislerde toplam harmonik

bozulma sınır değerleri üzerinde tartışılmıştır. Daha sonra harmonikleri azaltma ve ortadan kaldırma yöntemleri anlatılmıştır. Son olarak ise harmonikleri ortadan kaldırma yöntemlerinden seri ve paralel pasif filtre tasarımı yapılarak tasarım öncesi ve sonrası elektrik güç sisteminin nasıl tepkiler verdiği MATLAB programı yardımıyla simüle edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Harmonik bileşenler, aktif filtire, pasif filter, harmonik bozulma.

Bilim Kodu : 90513

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ANALYSIS OF HARMONICS IN ELECTRICAL SYSTEMS

Ümit GÖK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

February 2023, 75 pages

Electrical energy is an indispensable source of energy today. With the increasing technology, the load variety of the users is increasing day by day. The increase in the nonlinear load diversity of the users fed from the grid also causes some electrical power quality problems on the grid. One of the most important of these electrical power quality problems is harmonic components. As a result of the effects of harmonic components, adverse events such as increase in voltage drops in power systems, resonance events, increase in energy consumption, overheating in transformers, overheating of electric motors may occur.

In this thesis, harmonics, one of the most important electrical power quality problems affecting power systems, are emphasized. First of all, by defining the harmonic, how harmonic components emerge and how they damage the elements we use in our power system has been investigated. The harmonic components were analyzed with the Fourier method and the total harmonic distortion limit values in the plants were

discussed. Then, the methods of reducing and eliminating harmonics are explained. Finally, serial and parallel passive filter design, which is one of the methods of eliminating harmonics, is simulated with the help of the MATLAB program, how the electrical power system reacts before and after the design.

Key Word : Harmonic components, active filter, passive filter, harmonic distortion.

Science Code : 90513

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının araőtırılması, yşrştşlmesi ve uygulanması sırasında her tşrlş yardımcılarını, desteklerini bilgi ve tecşbelerini benden esirgemeyen yoğun çalışma programına rağmen bana her zaman vakit ayıran danıőmanım sayın Dr. Őęr. Őyesi Mehmet ŞİMŞİR'e sonsuz teőekkřrlerimi sunarım.

Manevi olarak hiğbir yardımcıyı esirgemededen yanımnda olan eőim Zehra ve kızım Ece'ye sonsuz teőekkřr ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
HARMONİKLER, HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ.....	3
2.1. HARMONİK VE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİYLE İLGİLİ BAZI TERİMLER.....	3
2.1.1. Enerji Kalitesi	3
2.1.2. Lineer Yük.....	3
2.1.3. Nonlineer Yük	4
2.1.4. Gerilim Harmonikleri	4
2.1.5. Akım Harmonikleri.....	4
2.1.6. Ara Harmonik	4
2.1.7. Sinüsoidal Dalga.....	4
2.1.8. Nonsinüsoidal Dalga.....	4
2.1.9. Harmonik Uyumluluk Seviyesi	5
2.1.10. Mevcut Harmonik Seviyesi	5
2.1.11. İzin Verilen Harmonik Artış Seviyesi	5
2.1.12. Frekans.....	5
2.1.13. Şebeke Empedansı	5
2.1.14. Alçak Gerilim	5

	<u>Sayfa</u>
2.1.15. Orta Gerilim.....	6
2.1.16. Yüksek Gerilim.....	6
2.1.17. Gerilim Dalgalanması.....	6
2.1.18. Fliker.....	6
2.1.19. Gerilim Çökmesi.....	6
2.1.20. Gerilim Dengesizliği.....	7
2.1.21. Çentik.....	7
2.1.22. Gürültü.....	7
2.1.23. Etkin Değer.....	7
2.1.24. Ortalama Değer.....	8
2.1.25. RMS Değer.....	8
2.1.26. Gerçek RMS.....	8
2.2. HARMONİĞİN TANIMI.....	8
2.3. HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR.....	15
2.4. HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	16
2.4.1. Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkisi.....	16
2.4.2. Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi.....	17
2.4.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi.....	18
2.4.4. Harmoniklerin Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etkileri.....	19
2.4.5. Harmoniklerin Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etkileri.....	19
2.4.6. Harmoniklerin Sigortalar Üzerindeki Etkileri.....	20
2.4.7. Harmoniklerin Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri.....	20
2.4.8. Harmoniklerin İletim Sistemleri Üzerindeki Etkileri.....	20
2.4.9. Harmoniklerin Dirençler ve Reaktanslar Üzerindeki Etkileri.....	21
BÖLÜM 3.....	25
HARMONİKLERİN FOURİER ANALİZİ İLE GÖSTERİMİ VE TOPLAM HARMONİK BOZULMA.....	25
3.1. ÇİFT FONKSİYONUN SİMETRİSİ.....	27
3.2. TEK FONKSİYONUN SİMETRİSİ.....	28
3.3. YARIM DALGA SİMETRİSİ.....	28
3.4. ÇEYREK DALGA SİMETRİSİ.....	29
3.5. FOURİER KATSAYILARININ BULUNMASI.....	29
3.5.1. Analitik Yöntem.....	29

	<u>Sayfa</u>
3.5.2. Grafik Yöntemi	30
3.5.3. Ölçme Yöntemi.....	32
3.6. HARMONİKTEKİ BOZULMA	33
3.7. TOPLAM HARMONİK DİSTORSİYONU	33
3.8. TOPLAM TALEP BOZULUMU	34
3.9. HARMONİK STANDARTLARI	35
BÖLÜM 4	41
AKTİF, PASİF VE HİBRİT FİLTRELER	41
4.1. HARMONİKLERİN AKIMINI AZALTMA YÖNTEMLERİ	41
4.1.1. İzolasyon Transformatorü Kullanma	41
4.1.2. 12 veya Daha Üst Darbeli Doğrultucu Kullanma.....	41
4.1.2. Şok Bobini	42
4.2. HARMONİKLERİ FİLTRELEME YÖNTEMLERİ.....	42
4.2.1. Pasif Filtre.....	44
4.2.1.1. Seri Pasif Filtre	44
4.2.1.2. Paralel Pasif Filtre	45
4.2.1.3. Tek Ayarlı Filtre	46
4.2.1.4. Çift Ayarlı Filtre	46
4.2.1.5. Sönümlü Pasif Filtre	47
4.2.2. Aktif Filtre	48
4.2.2.1. Seri Aktif Filtre	49
4.2.2.2. Paralel Aktif Filtre	50
4.2.3. Hibrit Filtre	51
BÖLÜM 5	52
PASİF FİLTRE TASARIMI VE MATLAB PROGRAMI İLE SİMÜLASYONU ..	52
5.1. SERİ PASİF FİLTRE TASARIMI.....	52
5.2. PARALEL PASİF FİLTRE TASARIMI	58
BÖLÜM 6	70
SONUÇLAR	70

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Lineer yük akım gerilim dalga şekli.....	9
Şekil 2.2. Nonlineer yük akım gerilim dalga şekli	9
Şekil 2.3. Temel dalga	10
Şekil 2.4. Temel dalga ve çeşitli mertebelerdeki harmonik bileşenler.....	12
Şekil 2.5. Üçlü-N harmoniklerinin nötr iletkeninde birleşmesi	18
Şekil 2.6. Direnç elemanının modellenmesi.....	22
Şekil 2.7. Endüktif reaktansın modellenmesi	23
Şekil 2.8. Kapasitif reaktansın modellenmesi	24
Şekil 3.1. Grafik metotla fourier analizin yapılması	30
Şekil 3.2. Dijital bir harmonik analizörün blok diyagramı	32
Şekil 4.1. Harmonik filtrelerin sınıflandırılması	43
Şekil 4.2. Seri pasif filtre	44
Şekil 4.3. Paralel pasif filtre	45
Şekil 4.4. Tek ayarlı pasif filtre	46
Şekil 4.5. Çift ayarlı pasif filtre	47
Şekil 4.6. Sönümlü pasif filtreler (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) c tipi.....	48
Şekil 4.7. Aktif filtrenin çalışma şekli.....	49
Şekil 4.8. Seri aktif filtre	49
Şekil 4.9. Paralel aktif güç filtresi	50
Şekil 4.10. Hibrit Filtre.....	51
Şekil 5.1. Sisteme filtre tasarımı yapılmadan önceki devre şeması	53
Şekil 5.2. Bozulmuş sinyal	53
Şekil 5.3. Filtre uygulandıktan sonra ortaya çıkan devre	54
Şekil 5.4. Filtre uygulandıktan sonra oluşan sinyal	55
Şekil 5.5. Sisteme filtre tasarımı yapılmadan önceki devre şeması	55
Şekil 5.6. Bozulmuş Sinyal	56
Şekil 5.7. Filtre uygulandıktan sonra ortaya çıkan devre	57
Şekil 5.8. Filtre uygulandıktan sonraki sinyal görüntüsü.....	57
Şekil 5.9. Paralel pasif filtre tasarımı yapacağımız örnek tesis.....	58

Sayfa

Şekil 5.10. Matlab ile oluşturduğumuz 3.,5.,7. ve 11. Harmonikleri içeren devre yapısı	61
Şekil 5.11. Harmonik bileşenlerin etkileri sonucunda bozulan dalga şekli.....	62
Şekil 5.12. 3. harmonik bileşen için filtre tasarımı	64
Şekil 5.13. 3.Harmonik bileşen için yapmış olduğumuz filtre tasarımından sonra oluşan sinyal şekli	65
Şekil 5.14. Sistemde bulunan 3., 5.,7. ve 11. harmonikler için filtre tasarımı	67
Şekil 5.15. Filtre tasarımı sonucunda oluşan sinyal	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Frekansı 50 Hz olan bir dalğanın bazı harmoniklerinin frekansı.....	11
Çizelge 2.2. Bazı harmonik mertebeler için temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerler.....	14
Çizelge 3.1. Bazı ülkelerin harmonik standartları.....	35
Çizelge 3.2. 400 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri ...	36
Çizelge 3.3. 154 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri ..	37
Çizelge 3.4. 154 kV altındaki iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değeri.....	38
Çizelge 3.5. 400 kV iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değeri	38
Çizelge 3.6. 154 kV iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değerleri	39
Çizelge 3.7. 150 kV altı için iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değerleri	39
Çizelge 3.8. Akım harmonikleri sınır değerleri	40
Çizelge 5.1. Filtre tasarımında kullanılacak değerler.....	63
Çizelge 5.2. Hesaplanan kondansatör değerleri	67
Çizelge 5.3. Hesaplanan bobin değerleri.....	67
Çizelge 5.4. Hesaplanan direnç değerleri.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

L	: bobin
R	: direnç
C	: kondansatör
f	: frekans
ω	: açısal hız
V	: gerilim
I	: akım
H	: henry
d_n	: harmonikteki bozulma
U_n	: harmonik gerilim
U_I	: anma gerilimi
I_h	: akım harmoniği
I_L	: maksimum yük akımı
X_L	: endüktif reaktans
X_C	: kapasitif reaktans
X_{C_n}	: n. harmonik mertebesindeki kapasitif reaktans
X_{L_n}	: n. harmonik mertebesindeki endüktif reaktans

KISALTMALAR

TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

THD : Toplam Harmonik Distorsiyon

THD_V : Gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu

THD_I : Akımın Harmonik Distorsiyonu

TTB : Toplam Talep Bozulumu

AC : Alternatif Akım

DC : Doğru Akım

IEC : The International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)

IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)

AF : Aktif Filtre

PF : Pasif Filtre

UPS : Uninterruptible Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)

VFD : Variable Frequency Drive (Değişken Frekanslı Sürücü)

AG : Alçak Gerilim

OG : Orta Gerilim

YG : Yüksek Gerilim

PLC : Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)

Hz : Hertz

kHz : Kiloherz

kv : Kilovolt

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisi son kullanıcıya gelinceye kadar üretim, iletim ve dağıtım aşamalarından geçmektedir. Elektrik enerjisinin üretimini, iletimini ve dağıtımını sağlayan kuruluşların görevi elektrik enerjisini kesintisiz ve kaliteli bir biçimde tüketicilerle buluşturmaktır. Alternatif akım güç sistemlerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması ise dalga şeklinde olmaktadır. Bu sebeple gerilim ve akım dalga şekillerinin tam sinüs olması beklenmektedir. Ancak pratikte bu durumun oluşması bazı zamanlarda mümkün bulunmamaktadır. Pratikte gerilim ve akım dalga şekillerinin tam sinüsoidal yapıda olmasını engelleyen bazı durumlar ortaya çıkmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan senkron jeneratörlerin yapısından ve güç sistemlerinde kullanılan lineer olmayan yüklerin oluşturduğu bozulmalar bu dalga yapısında meydana gelen bozulmaların ana sebepleridir. Genelleme yapacak olursak sinüs dalga şeklinin bozulması harmonik adı verilen bozucu bileşenlerin ortaya çıkması demektir. Harmonik bileşenler elektrik sistemlerinde ek kayıplara, ek gerilim düşümlerine, rezonans olaylarına, güç faktörünün değişmesi gibi teknik ve ekonomik problemlere sebep olabilirler.

Güç sistemlerinde harmonik bileşenleri ortaya çıkaran harmonik kaynakları motor hız kontrol düzenleri, doğru akım ile enerji nakli, statik var generatörleri, kesintisiz güç kaynakları, transformatörler, güç elektroniği elemanları, gaz deşarjlı aydınlatma, fotovoltaiik sistemler, bilgisayarlar, şebekelerdeki nonlineer yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler olarak sıralayabiliriz [1].

Bu cihazların kullanımının günümüzde yaygın ve hızla artmış olması sebebiyle harmonik bileşenlerin sayısının ve genliklerinin artması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Enerji kalitesinin artırılarak işletmenin sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla harmoniklerin analizleri detaylı olarak yapılmalı ve harmoniklerin oluşmasının önlenmesi gerekmektedir. Harmoniklerin önlenemediği durumlarda sistemde güç kayıpları artacak ve güç elektroniği elemanları zarar görecektir, bazı durumlarda ise rezonans olayları meydana gelebilecektir.

Rezonans durumunda ortaya çıkacak olan aşırı akım ve aşırı gerilim işletmeye büyük zararlar verebilmektedir. Elektrik enerjisinin kalitesini arttırmak ve harmonikleri ortadan kaldırmak için kullanılan genel yöntemler pasif filtrelerdir (PF). Fakat pasif filtreler sadece önceden belirlenmiş harmonik bileşenleri yok etmek üzere tasarlandıkları için günümüzde gelişen sanayi tesislerinin ihtiyaçlarını karşılamakta zorlanmaktadır. Aynı zamanda pasif filtrelerin bir diğer önemli dezavantajı ise elektrik güç sistemlerinde rezonans olaylarının meydana çıkmasına sebep olmakta ve bu rezonans olanları tesislere büyük zararlar vermektedirler.

Pasif filtrelerin sadece önceden belirlenmiş harmonik bileşenleri yok etmesi ve aynı zamanda tesiste rezonans olaylarının meydana gelmesine sebep olması dolayısıyla bir diğer filtreleme yöntemi olan aktif filtrelerin (AF) gelişimine zemin hazırlamıştır. Aktif filtreler sadece önceden belirlenmiş harmonik bileşenleri değil sistemde var olan tüm harmonikleri engellemektedir. Sistemde yapılan değişimler veya sisteme sonradan ilave edilecek ek yükler aktif filtrelerin çalışmasını engellememektedirler. Son yıllarda güç elektroniği uygulamalarının gelişmesi değişik yapıdaki harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına sebep olmuş buda aktif filtrelerin son yıllarda daha da gelişmesine imkan tanımıştır [2].

Bu tez çalışmasında genel olarak harmoniklerin tanımı yapılacak, harmonik etkenlerin sebepleri detaylı olarak incelenecek, harmoniklerin sistemlere vermiş olduğu zararlar tespit edilerek bu zararların en aza indirgenmesi için hangi yöntemlerin kullanılması gerektiği anlatılacak, kullanılacak yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte karşılaştırılması yapılacak, harmoniklerin fourier yöntemi ile analizi yapılacak, aktif, pasif ve hibrit filtreler detaylı olarak anlatılacak ayrıca harmonik etkenlerin analizi MATLAB programı yardımıyla simüle edilecektir.

BÖLÜM 2

HARMONİKLER, HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ

Bu bölümde genel olarak harmoniğin tanımı yapılacak, elektrik güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlardan harmonik üretenlerin hangileri olduğu detaylı olarak anlatılacak ve harmonik üreten bu elektrik güç sistemi ekipmanlarının tesislerimizde ne gibi sorunlara yol açacağıın tespiti yapılacaktır. Ancak daha önce bu tez çalışmasında ve literatürde kullanılan bazı harmonik ve elektrik güç kalitesiyle ilgili terimlerin ne anlama geldiği anlatılacaktır.

2.1. HARMONİK VE ELEKTRİK GÜÇ KALİTESİYLE İLGİLİ BAZI TERİMLER

Harmonik ve elektrik güç kalitesiyle ilgili literatürde kullanılmakta olan bazı terimlerin ne anlama geldiği bu bölümün ilerleyen kısımlarında ifade edilmiştir

2.1.1. Enerji Kalitesi

Elektrik enerjisini elektrik üretiminden tüketimine kadar tüm aşamalarda kesintisiz ve verimli kullanmak için çaba gösteren akım ve gerilimlerin frekans, dalga biçimi, genlik ve üç faz simetrisi açısından standartlar çerçevesinde değerlendirilmesidir. Bir elektrik güç sisteminde kullanılan enerji ne kadar kaliteli ise o güç sisteminde kullanılan cihazların kullanım ömürleride o oranda fazla olmaktadır.

2.1.2. Lineer Yük

Sistemde harmonik etki yaratmayan, akım gerilim karakteristiği doğrusal olan ve orjinden geçen, başka bir ifade ile aynı akım ve gerilim eğrilerine sahip elektriksel yüklere lineer yük denir.

2.1.3. Nonlineer Yük

Sistemde harmoniklere sebep olan doğrusal olmayan ve orjinden geçmeyen akım gerilim eğrisine sahip başka bir ifade ile akım ve gerilim dalga şekilleri farklı olan yüklere nonlinear yük denir.

2.1.4. Gerilim Harmonikleri

ıkış gerilimi ideal olmayan enerji santralleri sebebiyle ve akım harmoniklerinin şebeke empedansı boyunca gerilim düşümlerine sebep olması nedeniyle meydana gelen temel frekansın tam sayı katlarına eşit frekansa sahip sinüsoidal gerilimlere gerilim harmonikleri denilmektedir.

2.1.5. Akım Harmonikleri

Esas olarak UPS'ler, değişken frekanslı sürücüler (VFD), doğrultucular ve ark ocakları gibi doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu, frekansları temel frekansın tam sayı katlarına eşit olan sinüsoidal akımlara akım harmonikleri denir.

2.1.6. Ara Harmonik

Frekansý temel frekansın tam sayı katına eřit olmayan sinüs biçimli akımlar ve gerilimlere denilmektedir. İnterharmonik ismi ile de bilinmektedirler.

2.1.7. Sinüsoidal Dalga

İdeal bir elektrik şebekesinde akım ve gerilimin dalga şeklinin benzemesi gereken, harmonik vb. bozulmalar içermeyen tam sinüs biçimindeki dalgaya denilmektedir.

2.1.8. Nonsinüsoidal Dalga

Tam sinüsoidal dalga formunda olmayan harmonik vb. bozulmalar içeren dalga biçimine denilmektedir.

2.1.9. Harmonik Uyumluluk Seviyesi

Mevzuatta tanımlanan tekil ve toplam harmoniklerin limit değerlerini ifade etmektedir.

2.1.10. Mevcut Harmonik Seviyesi

Yeni bir kullanıcı devreye alınmadan önce enerji alınan bara gerilimindeki tekil ve harmonik bozulmanın değerini gösteren ifadedir.

2.1.11. İzin Verilen Harmonik Artış Seviyesi

Devreye yeni alınacak bir kullanıcının ortak bağlantı noktasında oluşturabileceği maksimum toplam harmonik bozulma değerini ifade etmektedir.

2.1.12. Frekans

Bir alternatif akım sinüs dalgasının saniye başına oluşturduğu döngü sayısına denilmektedir. Birimi hertz (Hz)'dir. Aynı zamanda frekans bir saniye içinde akımın yön değiştirme hızına denilmektedir.

2.1.13. Şebeke Empedansı

Kullanıcının ortak bağlantı noktasından bakıldığında şebeke tarafından da görülen eşdeğer empedansına denilmektedir.

2.1.14. Alçak Gerilim

Etkin değeri 1000 voltun altında olan gerilimlere alçak gerilim denilmektedir. AG ile ifade edilmektedir. Elektrik enerjisini iletmek ve daha uzun mesafelere sorunsuz bir şekilde taşıyabilmek için alçak gerilim yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple orta gerilim ve yüksek gerilim değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.15. Orta Gerilim

Etkin değeri 1000 volt ve 36 kV (dahil) arasında olan gerilimlere orta gerilim denilmektedir. OG ile ifade edilmektedir.

2.1.16. Yüksek Gerilim

Etkin değeri 36 kV üzerinde olan gerilimlere yüksek gerilim denilmektedir. YG ile ifade edilmektedir.

2.1.17. Gerilim Dalgalanması

Ark fırınları vb. yükler gibi akım değeri hızlı bir şekilde değişen yükler sebebiyle oluşan flicker (kırpışma) sorununa sebep olan periyodik ve düzensiz voltaj değişimlerine denilmektedir. Büyük güçlü asenkron motorlar ve ark ocakları gibi yükler gerilim dalgalanmasını meydana getirebilirler [3].

2.1.18. Fliker

Kırpışma olarak da bilinmektedir. Gerilim dalgalanmasının sebep olduğu aydınlatma elemanının ışığının parlaklığında ve renginde ani değişimlere yol açan göz konforunu olumsuz yönde etkileyen olaydır. Ark fırınları, statik frekans dönüştürücüleri ve haddeleme makinaları güç sistemlerinde flikere sebep olabilmektedir [4].

2.1.19. Gerilim Çökmesi

Gerilim çukuru da denilmektedir. Gerilimin rms değerinin minimum on milisaniye maksimum altmış saniye süreyle nominal değerinin yüzde 90'ının altına düşmesine denilmektedir. Transformatörlerin enerjilendirilmesi sırasında, arızalar meydana geldiğinde, motorlara yol verme ve yük anahtarlama gibi durumlarda gerilim çukurları meydana gelebilmektedir [4]. Gerilim çökmelerinin tesisteki elemanlar

üzerindeki etkileri büyüklüklerine göre ve gerilim çökmesindeki geçen zamana bağlı olarak değişmektedir.

2.1.20. Gerilim Dengesizliği

Çok fazlı sistemlerde faz-faz arasındaki gerilim değerlerinin veya fazlar arasındaki açıların farklı olması durumuna denilmektedir.

2.1.21. Çentik

Değişken frekanslı konvertörler ve UPS gibi invertör tabanlı ekipmanlarda kullanılan 3 fazlı 6 darbeli tam dalga doğrultucularda farklı faz üzerinde bulunan iki tristörün aynı anda iletimde oldukları geçiş anlarında çok kısa bir anda oluşan faz-faz kısa devresinin hat üzerinde meydana getirmiş olduğu ani gerilim düşümüne denilmektedir [3].

2.1.22. Gürültü

Yüksek anahtarlama frekansı oluşturan güç elektroniği ekipmanları tarafından üretilmektedir. Birkaç kHz ile birkaç yüz kHz arasında geniş bir aralıkta ortaya çıkar ve iletişim elemanlarında sinyal bozulması gibi olaylara neden olan parazitlere denilmektedir. Kontrol devreleri, ark makinası, anahtarlama güç kaynakları, meydana gelmesinde etkili olan elemanlardır [3].

2.1.23. Etkin Değer

Sinüsoidal bir gerilim fonksiyonunda tepe değerinin yaklaşık 0,707 katına eşit olan değerdir. Ölçü aletleriyle ölçüm yaptığımızda görmüş olduğumuz değerdir. Şebekede kullandığımız gerilimin maksimum değeri 325 voltur. Buda şebeke gerilimimizin etkin değerinin yaklaşık 230 volt olduğu anlamına gelmektedir.

2.1.24. Ortalama Değer

Sinüsoidal bir fonksiyonda tepe değerini yaklaşık 0,637 katına eşit olan değerdir. Alternatif akımın bir periyottaki pozitif alternastaki ani değerlerinin sayısı negatif alternastaki ani değerlerinin sayısına eşittir.

2.1.25. RMS Değer

Sinüsoidal bir fonksiyonun etkin değerine eşit olan, sinüsoidal olmayan fonksiyonun ise temel ve harmonik bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökünü alınmasıyla bulunan değerdir.

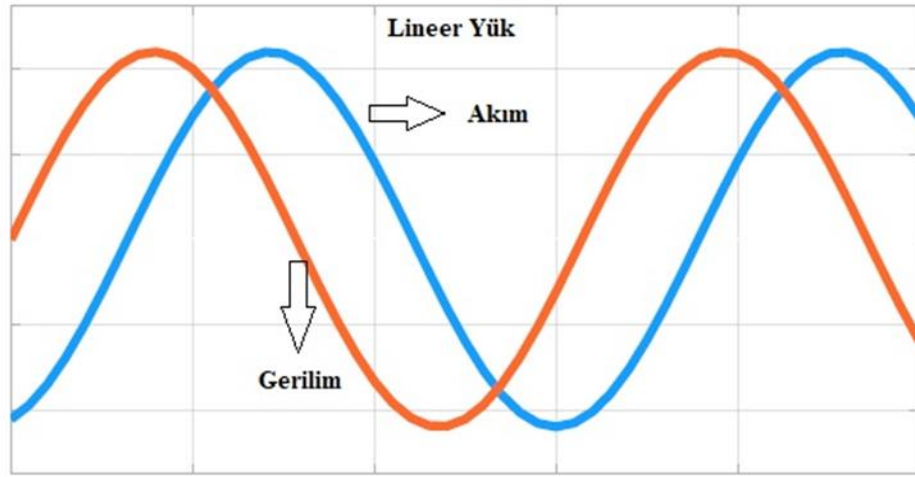
2.1.26. Gerçek RMS

Ampermetre ve voltmetreler için kullanılan bu terim ölçümün sadece temel bileşeni değil aynı zamanda harmonik bileşenleri de içerdiği anlamına gelmektedir.

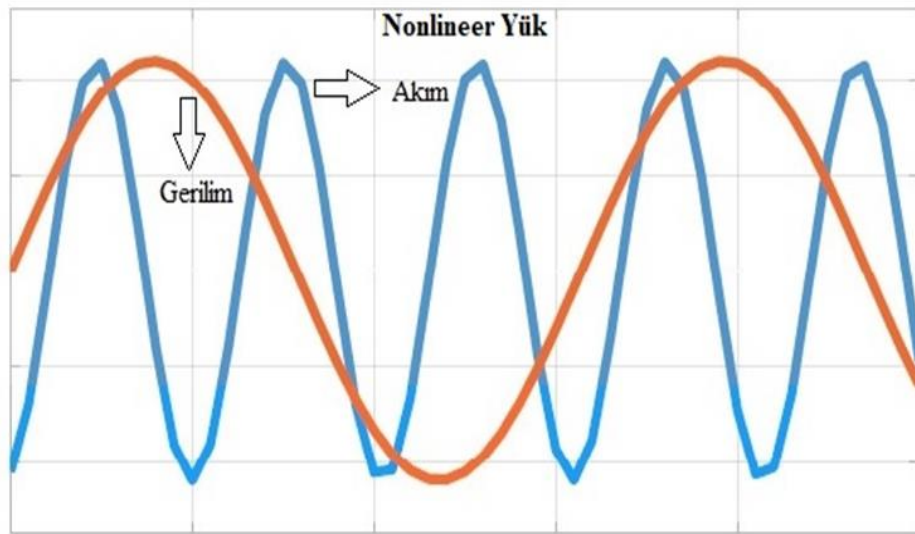
2.2. HARMONİĞİN TANIMI

Kaliteli bir elektrik enerjisinde gerilimin dalga şeklinin tam sinüsoidal olması beklenmektedir. Gerilimin genliğinin değişmesi, gerilim çökmeleri meydana gelmesi, dalga şeklinin sinüsoidal şekilden bozulmaya başlaması, değişik frekanslı akımlar meydana gelmesi ise kalitesiz ve istenmeyen bir elektrik enerjisi anlamına gelmektedir. Bir direnci ele aldığımızda bu direnç AC devresinde de DC devresinde de aynı şekilde davranmaktadır. Direnç boyunca akan akım gerilimle doğru orantılı olmaktadır. Direncin doğrusal bir devre elemanı olması sebebiyle dirence uygulanan gerilim ve akım sinüsoidal dalga şeklinde olmaktadır. Ancak bir elektrik devresinde veya bir elektrik güç sisteminde gerilim-akım karakteristiği çoğu zaman lineer değildir ve dalga şekli sinüsoidal olmayabilir. Aşağıdaki Şekil 2.1’de lineer ve Şekil 2.2’de nonlinear yüklerin akım-gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir. Şekil 2.1’de lineer yükün çekmiş olduğu akım sinüsoidal bir dalga şekli iken Şekil 2.2’de nonlinear yükün çekmiş olduğu akımın sinüsoidallikten uzaklaşmış olduğu görülmektedir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’yi karşılaştırdığımızda temel olarak Şekil 2.2’deki dalga şekline sahip sistemimizde nonlinear bir yükün var olduğu tespiti

yapılabilir ve bu sebeple güç kalitesi problemleri ile karşılaşma ihtimalimizin yüksek olduğu anlamı çıkabilmektedir. Bu güç kalitesi problemlerinin, en önemlilerinden bir tanesi harmoniklerdir. Bu sebeple harmoniklerin ne anlama geldiği, nasıl ortaya çıktıkları, bir sistemde ortaya çıkan harmoniklerin tespitinin yapılmasının öneminin çok önemli olduğu, harmonik bileşenlerin var olduğu bir sisteme ne gibi zararlar verebileceği, harmonik bileşenlerin giderilmesi için hangi yöntemlerin kullanılacağına bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple elektrik sistemlerinde harmoniklerin analizi son derece önemli hale gelmiştir. Harmoniklerin analizi yapılarak giderilmesi için tedbirler alınması gerekmektedir.



Şekil 2.1. Lineer yük akım gerilim dalga şekli.



Şekil 2.2. Nonlineer yük akım gerilim dalga şekli.

Belirli bir frekans değerindeki dalga Şekilleri kendi frekansının katlarındaki sinüs dalgalarının toplam değerine eşittir. Toplanarak periyodik dalgayı oluşturan sinüs dalgalarının her birine harmonik denilmektedir [5].

Birinci harmonik, temel bileŐen olarak adlandırılmaktadır. Çift harmonikler genellikle dūŐük değerde olmaktadır ve birbirlerinin etkisini yok edecek yapıdadırlar. İkinci harmonik temel bileŐen frekansının iki katı, üçüncü harmonik temel bileŐen frekansının üç katı, n. harmoniğin frekansı temel bileŐen frekansının n katıdır. Harmonik bileŐenlerin frekansları arttıkça büyüklükleri ters orantılı Őekilde azalmaktadır.

ÇeŐitli frekanslarda harmonik akım ve gerilimlerin bulunduğu bir Őebekede, bileŐke akım veya gerilimin dalga biçimi, temel frekansa (50 Hz) iliŐkin ana bileŐenin ani değeri ile tüm harmonik akım veya gerilimlerin ani değerleri toplamı olarak ortaya çıkar. Faz farklarını dūŐünmezsek bu toplam 2.1'deki eŐitlik ile ifade edilmektedir [6].

$$V(t) = \sum_{n=1,2,..}^{\infty} V_n(t) = \sum_{n=1,2,..}^{\infty} V_{m_n} \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t \quad (2.1)$$

Elektrik güç sistemlerinde yüksek genlikli ve sistemimize en çok zarar verecek olan harmonikler 3. 5. ve 7. harmoniklerdir. Harmoniklerin etkilerinin teknik ve ekonomik değerleri bilinerek harmoniklerin iyi analiz edilmesi ve etkilerinin ortadan kaldırılması iŐletmelerin sağlıklı çalışması açısından oldukça etkilidir.



Şekil 2.3. Temel dalga.

Şekil 2.3'te frekansı 50 Hz olan sinüsoidal temel şebeke gerilimi gösterilmiştir. Şekildeki sinyal tam sinüsoidal ve herhangi bir harmonik bileşen etkisine maruz bırakılmamıştır. Bu durum elektrik güç sistemlerimizde her zaman istenen durumdur. Fakat bazı zamanlarda bu pek mümkün olmamaktadır.

Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmonik mertebelerdeki frekansları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Harmonikler genellikle frekanslarıyla değil mertebeleriyle adlandırılırlar. Bunun sebebi ise örneğin Türkiye'de temel dalga frekansı 50 Hz iken Amerika'da temel dalga frekansının 60 Hz olmasıdır. Bu durumda Türkiye'de 3. mertebeden harmonik bileşen frekansı 150 Hz iken Amerika'da 3. mertebeden harmonik bileşen frekansı 180 Hz'dir.

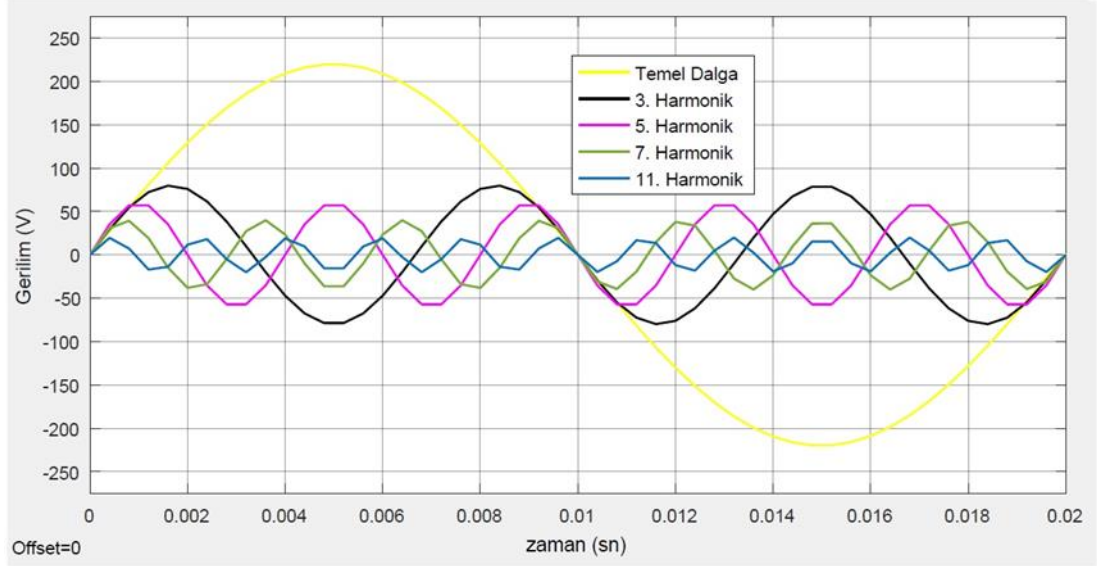
Çizelge 2.1. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı.

HARMONİK	FREKANS
Temel Bileşen (1. Harmonik)	50 Hz
2. Harmonik	100 Hz
3. Harmonik	150 Hz
4. Harmonik	200 Hz
5. Harmonik	250 Hz
6. Harmonik	300 Hz
7. Harmonik	350 Hz
9. Harmonik	450 Hz
11. Harmonik	550 Hz

İşletmelerimizde çok çeşitli yapılardaki nonlineer yükler sebebiyle çeşitli frekanslardaki sinyaller ortaya çıkar. Şekil 2.4'te sistemlerdeki nonlineer yükler sonucunda ortaya çıkan harmonik bileşen sinyalleri gösterilmiştir. 50 Hz temel şebeke sinyali ile birlikte frekansı 150 Hz olan 3. gerilim harmoniği, frekansı 250 Hz olan 5. gerilim harmoniği, frekansı 350 Hz olan 7. gerilim harmoniği ve frekansı 550 Hz olan 11. gerilim harmoniği birlikte gösterilmiştir.

Sinüsoidal temel şebeke sinyali bu harmonik bileşenlerin bir veya birden fazlasına maruz bırakıldığında sinüsoidal şebeke sinyali sinüsoidallikten uzaklaşacak ve bunun sonucunda kullanıcılarda harmonik etkenlerin etkisi ile birtakım problemler ortaya çıkmış olacaktır. Harmonik bileşenler etkisiyle bozulan sinüsoidal sinyali tekrardan eski haline getirebilmek için harmonik bileşenlerin etkisini ortadan kaldırmak

gerekmektedir. Eğer bu etkileri ortadan kaldırmaz isek tesisimizde çeşitli zararlar ortaya çıkacak buda üretim kaybı ve maliyet artışı olarak bize geri donecektir. Buda işletemelerde istenmeyen bir durum demektir.



şekil 2.4. Temel dalga ve çeşitli mertebelerdeki harmonik bileşenler.

Bu zararlardan korunmak için bazı tedbirler almamız gerekecektir. Öncelikle sistemimizdeki harmoniklerden korunmak için sistemimizde harmoniklerin olup olmadığının tespiti yapılmalı harmonikler varsa bunların hangi mertebeden oldukları belirlenmelidir. Yani ilk adım olarak harmonik ölçümü yapılmalıdır. Fakat harmonik ölçümü yapılmadan öncede g sistemimizde meydana gelen birtakım olaylar sistemimizde harmoniklerin bulunduğunun göstergesi olabilir. Örneğin; sistemimizde bulunan kondansatör ve bağlı ekipmanlarda çok sık arıza meydana geliyorsa, sistemdeki ana şalterimiz rezonans olayları ile çok sık açma yapıyor ve sistemi durduruyorsa, ölçüm cihazlarımız hatalı ölçümler yapıyor ise ve nötr kablomuz aşırı şekilde yükleniyor ve ısınıyorsa sistemimizde harmoniklerin olduğunun göstergesi olabilir. Bu gibi durumlarda harmonik ölçümleri yapmak faydalı olacaktır.

Bir elektrik güç sisteminde harmoniklerin olması o sistemin çalışmayacağı anlamına gelmemektedir. Bir tesis yüksek harmonik üreterek harmoniklerin kaynağı olurken aynı zamanda çalışmasına devam edebilmektedir. Harmonik etkenler genellikle

elektrik dağıtım sistemleri üzerinden taşınarak aynı sistemde olan başka tesisleri etkileyebilmektedir [7,8].

Günümüzde kullanımı her geçen gün artan yarı iletken devre elemanları içeren cihazları sonucunda harmonik bileşen içeren akımlarda artmıştır. Yarı iletken elemanlar içeren bir elektronik cihazın oluşturacağı harmonik akımların hangileri ve bu harmonik akımların hangi mertebelerde olduğu bu elektronik cihazın puls sayısına yani içerdiği diyot, tristör vb. gibi yarı iletken devre elemanlarının adedine bağlıdır. Yarı iletken bir devre elemanı içeren elektronik cihazın oluşturacağı harmonik akımın hangi mertebede olduğunu aşağıdaki formül ile hesaplayabiliriz.

$$n = h \times q \pm 1 \quad (2.2)$$

n: harmonik akımın mertebesi

h: puls sayısı

q: sıra ile artan tamsayı

Örneğin 6 puls bir sistem için ;

$n = 6 \times 1 \pm 1 = 5.$ ve $7.$ derecedeki harmonikler üretilecektir. Üretilecek olan harmoniklerin temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değeri ise aşağıdaki fomül ile belirlenmektedir.

$$\% = 100/n \quad (2.3)$$

Örneğin 5. Harmonik için yüzdesel değer;

$$\% = 100/5 = 20'dir \quad (2.4)$$

2.2'deki eşitlikten anlaşılacağı üzere 6 darbeli bir doğrultucu 5., 7., 13., 17., 19., 23. harmonikleri üretirken 12 darbeli bir doğrultucu 11., 13., 23., 25., 35. harmonikleri üretmektedir. 2. harmonik gibi çift sayılı harmonik etkilere elektrik şebekelerinin dalga yapısından kaynaklı simetri özelliği sebebiyle bazı durumlar dışında (yarım

dalga doğrultucular) fazla rastlanılmamaktadır. Genel olarak endüstriyel tesislerde 6 darbeli doğrultucuların kullanıldığı unutulmamalıdır [9].

Çizelge 2.2’de bazı harmonik mertebeleri için 6 puls ve 12 puls sistemlerde temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerleri verilmiştir. Bu çizelgeden 6 puls veya 12 puls sistemlerin hangi harmonikleri üreteceği anlaşılabilir.

Çizelge 2.2. Bazı harmonik mertebeler için temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerler.

HARMONİK DERECE	DARBE SAYISI	
	6 PULS (%)	12 PULS (%)
5	20	-
7	14,3	-
11	9,1	9,1
13	7,7	7,7
17	5,9	-
19	5,3	-
23	4,3	4,3
25	4	4

Farklı güç kalitesi olaylarında da yaşandığı gibi harmoniklerin var olduğu bir sistemde de sistemin çalışmasının devamlılığı sistemin sağlamlığı ve donanımlardaki hassasiyete bağlı bulunmaktadır. Örneğin bir tesis yüksek harmonik üreten bir tesis olabilir fakat bu tesis harmonik üretmesine rağmen aynı zamanda çalışmasına devam edebilir. Fakat bu tesisin üretmiş olduğu harmonikler çoğu kez elektrik dağıtım sistemleri üzerinden taşınıp farklı tesisleri etkileyebilmektedir. Yapıları itibarıyla lineer oldukları bilinen alıcıların harmonikli akımlar üretebildiği durumlarda yaşanabilmektedir. Bu duruma sebep olan olay ise alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüsoidal olduğu durumlardır. Harmonik üreten kaynakların şebekede üretmiş oldukları harmoniklerin frekansı 100 Hz ile 50 kHz arasında değişim göstermektedir. 5 kHz’e kadar olan harmoniklerin alıcılar üzerinde olumsuz etkileri olmaktadır. 5 kHz üzerindeki harmoniklerin ise daha çok iletişim sistemleri üzerinde olumsuz etkisi olmaktadır. Uluslararası IEC 519-1992’ye göre kabul edilebilir harmonik bozulma sınır değerleri; Gerilim için %3, Akım için ise %5 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin üzerinde bulunan harmonik oranlarında elektrik güç sistemlerine büyük kayıplar ve zararlar oluşturabilecek problemler ortaya çıkmaktadır.

2.3. HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

Güç sistemleri üzerinde pek çok etkisi olan harmoniklerin etkilerinin bilinmesi ve analizlerinin yapılması için öncelikle harmonik üreten kaynakların tespitinin yapılması son derece önemlidir. Harmonikler akım gerilim karakteristiği dengesiz olan elemanlar tarafından meydana gelmektedir. Bir güç sistemindeki harmonik kaynakları;

- Küçük güçteki nonlineer yükler
- Büyük güçteki nonlineer yükler
- İletim sistemlerinde büyük güçte bulunan güç elektroniği elemanları

olarak sıralayabiliriz. Küçük güçteki nonlineer yüklere örnek olarak Televizyon, bilgisayar, batarya şarj cihazları gibi aletlerin içinde bulunan doğrultucular verilebilir. Bu cihazların düşük güçte olmalarına rağmen sistemde sayılarının birden fazla olması harmonik etkilerin oluşmasına yol açmaktadır. Büyük güçteki doğrusal olmayan yüklere örnek olarak elektrikli ark fırınlarını verebiliriz. Ark fırınlarının empedansları zamana göre değişiklik göstereceğinden güç sisteminde meydana getirmiş olduğu harmonik bileşen akımları da düzensizdir [10-12].

İşletmelerde harmonik akım üreten bazı kaynakları şu şekilde sıralayabiliriz;

- Kesintisiz güç kaynakları
- Anahtarlamalı güç kaynakları
- Kaynak makineleri
- Motor hız kontrol düzenleri
- Ark fırınları ve haddehaneler
- Metro taşımacılığında kullanılan sürücüler
- İndüksiyon eritme ve ısıtma fırınları
- Yük ve motor devrelerinde verimin artırılması için kullanılan yarıiletken devre elemanları
- Redresörler
- Rüzgar ve güneş enerjisi konvertörlerinin dağıtım sistemine bağlanması

- Bilgisayarlar
- Akü şarj sistemleri
- Plastik enjeksiyon
- Dalma erezyon ve tel erezyon sistemler
- Floresant lambalar ve elektronik balastlar
- Deşarj lambaları
- Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları
- Senkron makinaların hava boşluğunda sinüs biçiminde olmayan akının dağılımından dolayı harmonik içeren emk'ların üretilmesi
- Yüksek gerilim DC iletim sistemlerinde DC ve AC dönüşümün her ikisinde harmonik akım üretimine sebep olur
- Motorların manyetik devrelerinde doyma
- Tristörlü dinamik kompanzasyon
- Güç elektroniği elemanları
- Döner rotorlu makineler

2.4. HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu bölümde harmonik etkenlerin güç sistemleri üzerindeki transformatörlere, iletkenlere, kondansatörlere, elektronik elemanlara, aydınlatma elemanlarına, sigortalara, döner makinalara, iletim sistemlerine, dirençlere ve reaktanslara ne gibi etkenlerinin olacağı belirtilecektir. Temel olarak bozulmuş gerilimler ve akımlar sistemde bulunan güç elektroniği elemanlarının kayıplarının artmasına, ısınmalarına, ölçüm elemanlarının hatalı ölçüm yapmasına, elektrik motorlarında ise tork dalgalanmalarına neden olmaktadır [13].

2.4.1. Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkisi

Harmoniklerin transformatörleri etkilemiş olduğu durumlar genelde iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Akım harmonikleri kaçak akı kayıplarında artışa ve bakır sargı kayıplarındaki (I^2R) artışa neden olmaktadır. Gerilim harmonikleri ise histeresiz akımlarından dolayı demir kayıplarındaki artışa ve buna bağlı olarak yalıtımda zorlanmalara neden olabilmektedirler. Bu iki durumda da transformatör üzerinde ek

ısınmalar meydana gelebilmekte buda transformatör ömrünü direkt olarak etkileyebilmektedir [2].

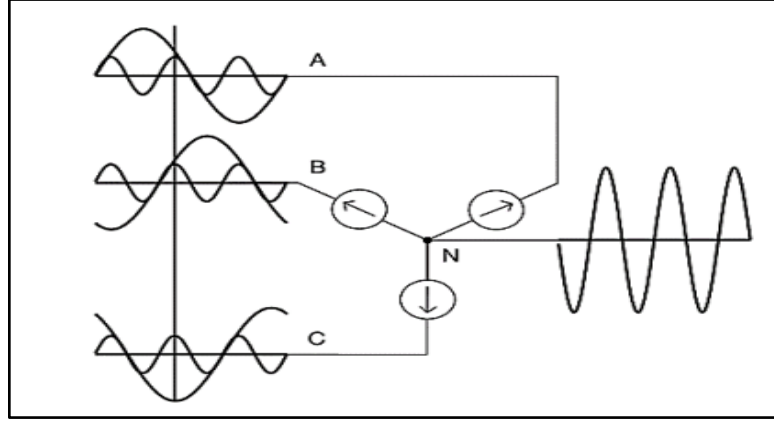
Harmonik bileşenler aynı zamanda sargılardaki nüve ve bağlantı noktalarındaki manyetik akıdan dolayı oluşan kaçak kayıpların artmasına da sebep olmaktadır. Transformator etiketinde belirtilen güç değerinde çalıştırılıyorsa harmonik bileşenler bu güç değerini arttıracak ve transformatorün aşırı yüklenmesine sebep olacaktır.

2.4.2. Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi

Harmonik bileşenler iletkenler üzerindeki ısınmanın artmasına buna bağlı olarak kayıpların artmasına neden olmaktadır. Harmonik bileşenler iletkenlerde ısınmaya iki yolla sebep olmaktadır. Birinci yol “skin-effect” olarak bilinen akımın iletkenin dış yüzeyinde yoğunlaşması akımın iletkenin dış yüzeyinde toplanması frekans arttıkça artmaktadır. Büyük harmonik derecelerinde iletkenin dış yüzeyinden geçen akım artmaktadır. İkinci yol ise nötr iletkeninin aşırı akım yüklenmesi sonucu oluşmaktadır [14].

Üç fazlı güç sistemlerinde fazlar eşit olarak yüklendiği takdirde nötrdeki akım bileşkesi sıfır olmaktadır. Dengesiz yüklü sistemlerde ise nötrden sadece denge dışı kadar akım geçmektedir. Elektrik güç sistemlerinde genellikle ekonomik olması amacıyla kullanılan faz iletkeninin kesitinin yarısı kadar nötr iletkeni kullanılmaktadır. Şebeke akımlarının birbirini dengelemesine karşın harmonik akımlar birbirini dengelemediği için dengesizlik ortaya çıkmakta temel harmoniğin üç katının tek sayılı çarpanları olan harmonik akımlar “üçlü-N” harmonikleri şeklinde nötr iletkeninde birleşmektedir [15].

Şekil 2.5’de üçlü-N harmoniklerinin nötr iletkeninde birleşmesinin benzetim şekli verilmiştir.



Şekil 2.5. Üçlü-N harmoniklerinin nötr iletkeninde birleşmesi [16].

2.4.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi

Kondansatörler elektrik güç sistemlerinde kompanzasyon amacıyla kullanılan lineer bir devre elemanıdır ve harmonikli akım çekmezler. Bozucu yüklerin olduğu harmonik akım ve gerilimlerin bulunduğu bir sistem içerisinde lineer bir devre elemanı olan kondansatör büyük bir oranda etkilenecektir. Kondansatör empedansını;

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.5)$$

şeklinde bulabiliriz. Denklemden de anlaşılacağı üzere frekansın artması kondansatör empedansının düşmesine sebep olacaktır. 50 Hz şebeke frekansında 30 ohm olan kondansatör empedansı 3. Harmonik bileşenin frekansı olan 150 Hz de 3 kat azalacak ve 10 ohm olacaktır. Örnekten de anlaşılacağı üzere kondansatörler yüksek frekansta düşük empedans göstereceklerdir. Kondansatörler bu düşük empedansları sebebiyle sistemde meydana gelen harmonikleri üzerine çekerler. Üzerinde zaten temel şebeke frekansı olan kondansatörlerin harmonik akımların da etkisiyle RMS akımı artacak elektriksel ve mekanik olarak zorlanmaya başlayacaktır. Bu artış sebebiyle IEC 60831 standardı ile bir sınır getirilmiştir. Bu sebeple kondansatör üreticileri kondansatörleri nominal akımın % 30 fazlasına dayanacak şekilde üretmektedir. Kondansatörlerin harmonikli sistemlerde yaratacağı bir diğer problem ise rezonans olaylarıdır. Transformator ve motor gibi endüktif karakterli yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde kullanılan kondansatörler bu yüklerle birlikte seri veya

paralel rezonans ihtimalini doğurmaktadır. Bu sebeple bir sistemde kullanılacak olan kondansatör grubu tasarlanırken güç sisteminde yaratacağı rezonans frekansının hesaplanması gerekmektedir.

2.4.4. Harmoniklerin Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etkileri

Harmoniklerin olduğu bir elektrik güç sisteminde çalışan elektronik kontrol cihazları harmoniklerin etkisiyle zaman zaman hatalı çalışabilmektedir. Harmonikler gerilimin dalga şeklini bozduğu gibi sıfır geçiş noktasını da kaydırabilmektedir. PLC gibi elektronik kontrol cihazlarında sıfır geçiş noktası çok önemlidir. Bu sıfır geçiş noktasının harmonik etkiyle kayması sonucunda PLC tarafından kontrol edilen güç sisteminde hatalara sebep olabilmektedir. Zaman zaman elektronik kartlarda meydana gelen arızaların sebepleri de harmonik etkilerden kaynaklı olabilmektedir. Elektronik kartların girişinde bulunan ve parazit engellemeye yarayan devre içerisindeki kondansatörlerde harmonik akımların etkisiyle patlayabilirler. Tristör kontrollü bir devrede harmonik akımların etkisiyle tristörlerin tetikleme anları değişebilmektedir. Tesis içerisinde kullanılan ekipmanların elektronik kartlarında bu tarz sıkıntıların meydana gelmesi ekonomik olarak ciddi sorunlara yol açabilmektedir.

2.4.5. Harmoniklerin Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etkileri

Harmonik bileşenli gerilimler floresant lambaların gürültülü çalışmasına ve demir kayıplarına yol açabilmektedir. Floresant ve civa buharlı lambalarda balastla birlikte kondansatörlerde kullanılmaktadır. Devrenin endüktansı ile beraber kondansatörler bir rezonans devresi oluşturabilmektedir. Eğer sistemde meydana gelen harmonik frekans bu devrede meydana gelen rezonans frekansına eşit olur ise aşırı ısınma ve arızalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca harmonik etkiler akkor telli lambaların kullanım ömrünü de oldukça kısaltmaktadır.

2.4.6. Harmoniklerin Sigortalar Üzerindeki Etkileri

Enerji nakil hatlarına ortaya çıkan harmonikler devre kesici ve sigortaların akım kesme kapasitelerini etkilemektedir. Sigortaların çalışmasında meydana gelen olumsuzluklar sigorta içerisinde bulunan elektro manyetik endüksiyon bobininden kaynaklanmaktadır. Sigortada açma esnasında meydana gelen elektrik arkı bobin tarafından ortaya çıkarılan manyetik alan ile birlikte ark hücrelerine sürülür. Dolayısıyla bobinin çalışmasında oluşacak aksaklıklar arkın yeniden meydana gelmesine ve kesicinin tekrardan kapanmasına yol açmaktadır. Harmonik etkiler aynı zamanda devre kesiciler ve sigortalar üzerindeki ısınmayı arttırarak izolasyon malzemelerinin ömrünün kısılmasına yol açmaktadır. Ayrıca harmonik etkiler akım geçişlerinde temel frekanstaki normal sinüs dalgasına oranla daha yüksek bir değişim hızına yol açmakta ve akım kesme işlevi zorlanabilmektedir [17].

2.4.7. Harmoniklerin Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri

Harmonik gerilim ve harmonik akımların en büyük etkileri harmonik frekansta demir ve bakır kayıplarının aşırı artması nedeniyle döner makina sargılarının aşırı şekilde ısınmasıdır. (Akım harmoniklerine maruz kalınırsa bakır kayıpları, gerilim harmoniklerine maruz kalınırsa demir kayıpları artmaktadır.) Harmonik etkiler bu sebeple döner makinanın veriminin düşmesine sebep olmakta ayrıca döner makinanın vibrasyonlu çalışmasını ortaya çıkarmaktadır. Harmonik etkiler aynı zamanda döner makinanın ısınmasına sebep olmakta bu ısınma sonucu döner makinanın ömrü azalmaktadır. Bu durumdan genel olarak tek fazlı motorlar daha çok etkilenmektedir.

2.4.8. Harmoniklerin İletim Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Elektrik iletim sistemleri tasarlanırken ve döşenirken belirli bir empedans değeri kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Sistemde var olabilecek harmonikler bu empedans değerinin artmasına sebep olacak ve empedansta meydana gelebilecek bu artış hat kayıplarında artışa neden olacak ve dielektrik zorlanmayı arttıracaktır.

Harmonik akımlar iletim hattı boyunca gerilim düşümü meydana getirecektir. Akımın n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü;

$$|\Delta V_n| = |I_n| \cdot |Z_n| \quad (2.6)$$

olarak ifade edilecektir. Ayrıca harmonik akımların meydana getireceği ek kayıpları ise;

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.7)$$

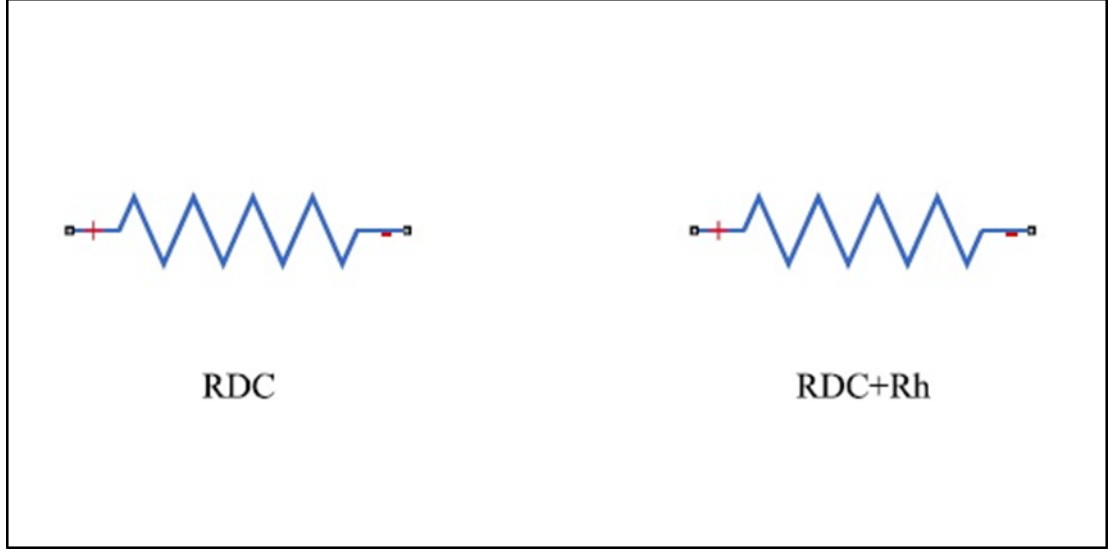
formülü ile hesaplayabiliriz. Bu formülde I_n n. harmonik bileşen akımını, R_n n. harmonik frekanstaki iletim sistemi omik direncini göstermektedir.

2.4.9. Harmoniklerin Dirençler ve Reaktanslar Üzerindeki Etkileri

Harmonik bileşenlerin mertebesi yükseldikçe frekans değerlerinde de artış meydana gelmektedir. Frekans değerindeki artış ile birlikte deri etkisi (skin effect) oluşmakta ve iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin var olan DC omik direnci değerine harmoniklerin etkisiyle birlikte R_h direnci eklenmektedir. Böylelikle harmonikli akıma karşı gösterilen omik direnç değeri;

$$R = R_h + R_{DC} \quad (2.8)$$

olarak karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak harmonikler sebebiyle oluşan R_h direnci ihmal edilse de detaylı analizlerde hesaba katılmaktadır. Direnç elemanının modellenmesinin harmonik etkiler barındıran bir sistemde ve harmonik etkiler barındırmayan bir sistemde nasıl yapılacağı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Direnç elemanının modellenmesi.

Harmonik akımların olmadığı bir sistemde endüktif reaktans;

$$X_L = \omega.L = 2.\pi.f.L \quad (2.9)$$

Şeklinde hesaplanabilir. n'inci dereceden bir harmonikli akım barındıran bir sistemde iste reaktans değeri;

$$X_{L_n} = n.X_L = n.\omega.L = n.2.\pi.f.L \quad (2.10)$$

Olarak hesaplanabilir. Bu formülde;

X_L : Temel frekanstaki endüktif reaktans değeri

ω : Açısal hız

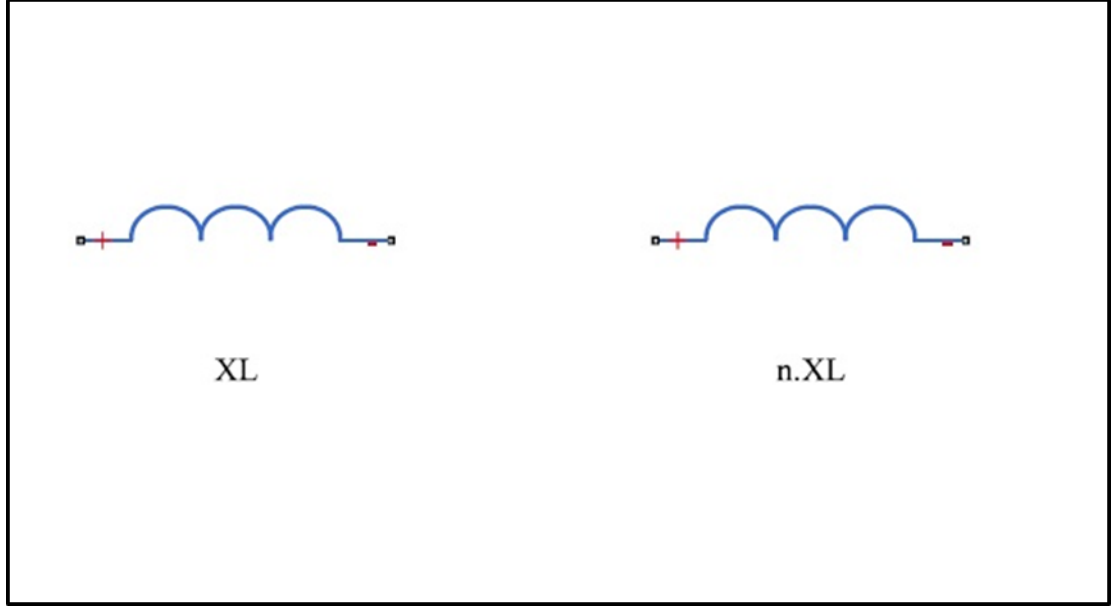
L : Endüktans

f : Frekans

X_{L_n} : n'inci harmonik mertebesindeki endüktif reaktans değeri

n : Harmoniğin mertebesini ifade etmektedir.

Endüktif reaktansın modellemesinin harmonik akım barındıran ve harmonik akım barındırmayan sistemlerde nasıl yapılacağı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Endüktif reaktansın modellenmesi.

Harmonik akımların bulunmadığı bir sistemde kapasitif reaktans;

$$X_C = \frac{1}{\omega.C} = \frac{1}{2.\pi.f.C} \quad (2.11)$$

olarak hesaplanmaktadır. n'inci dereceden bir harmonik akım içeren sistemde ise kapasitif reaktans;

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} = \frac{1}{n.\omega.C} = \frac{1}{n.2.\pi.f.C} \quad (2.12)$$

Olarak hesaplanabilir. Bu formülde;

x_C : Temel frekanstaki kapasitif reaktans değeri

ω : Açısal hız

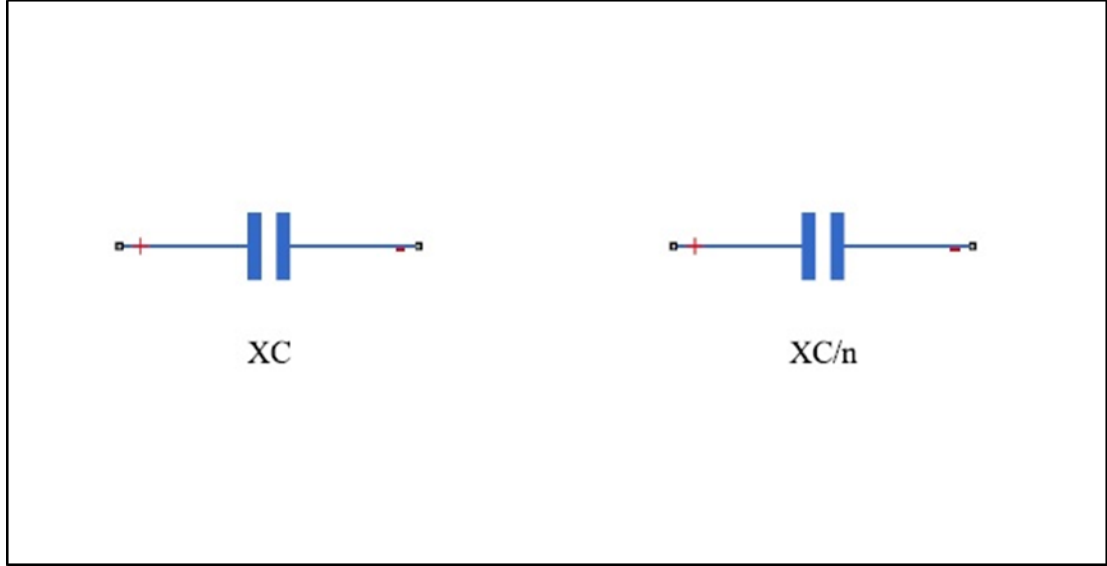
C : Kapasitans

f : Frekans

x_{C_n} : n'inci harmonik mertebesindeki kapasitif reaktans değeri

n :Harmoniğin mertebesini ifade etmektedir.

Kapasitif reaktansın modellemesinin harmonik akım barındıran ve harmonik akım barındırmayan sistemlerde nasıl yapılacağı şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kapasitif reaktansın modellenmesi.

Harmonik akım barındırmayan bir sistemde X_C olarak modellenirken n’inci dereceden bir harmonik akım barındıran bir sistemde ise $\frac{X_C}{n}$ olarak modellenmektedir [1].

BÖLÜM 3

HARMONİKLERİN FOURIER ANALİZİ İLE GÖSTERİMİ VE TOPLAM HARMONİK BOZULMA

Harmonikler temel frekansın integral katsayısı olan bir frekansa sahip bir periyodik dalganın sinüs şeklindeki bileşeni olarak adlandırılırlar. Bozulmuş olan bir periyodik dalganın harmonik bileşenleri Fourier serileri ile açıklanabilmektedir [18].

Nonsinüsoidal dalgaları analiz ederken kullanılan en temel ve yaygın yöntem Fourier serileridir. Fourier'e göre nonsinüsoidal periyodik dalgalar genlikleri ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalganın birleşmesiyle meydana gelmektedir. Aynı zamanda nonsinüsoidal periyodik dalgalar genlik ve frekansları farklı olan birçok sinüsoidal dalgaya ayrılabilir. AC bir sinyal için temel sinüse ana bileşen (ana harmonik veya temel bileşen) diğer sinüs bileşenlerine ise harmonik adı verilmektedir. Temel frekansın tam katı frekanslara sahip bu akım ve gerilim bileşenlerine harmonik adını verdiğimiz bileşenlerin elde edildiği seriye ise Fourier serisi bu serinin elemanlarına (harmoniklere) da Fourier bileşenler denilmektedir. Örneğin;

$$f(t)=A_0+A_1 \sin(t)+A_2 \sin(2t)+\dots+A_n \sin(nt) \\ \dots\dots+B_1 \sin(t)+B_2 \sin(2t)+\dots+B_n \sin(nt) \quad (3.1)$$

Şeklinde gösterilebilir. Temel frekansın tam katı olmayan frekanslara sahip olan bileşenlere ise interharmonik (ara harmonik) denilmektedir. Pratikte bu tarz harmoniklere üç fazlı güç sistemlerinde ark fırınlarında rastlanabilmektedir. Bir fonksiyonun Fourier serilerine açılabilmesi için Dirichlet şartları olarak bilinen üç şartı sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar şunlardır;

- Fonksiyonun sonlu sayıda süreksizlik barındırması gerekmektedir.

- Fonksiyonun sonlu sayıda maksimum ve minimum noktası olması gerekmektedir.
- Fonksiyonun ortalamasının sonlu değer alıyor olması gerekmektedir

Bu şartları sağlayan fonksiyonlar Fourier serisine açılabilir [1].

Bir $f(\omega t)$ fonksiyonunun Fourier serileri ile trigonometrik biçiminin genel ifadesi şu şekildedir.

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \sin n\omega t + B_n \cdot \cos n\omega t) \quad (3.2)$$

Bu ifadeyi açtığımızda ise;

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_2 \cdot \sin(2\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots + A_n \cdot \sin(n\omega t) + B_1 \cdot \cos(\omega t) + B_2 \cdot \cos(2\omega t) + B_3 \cdot \cos(3\omega t) + \dots + B_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (3.3)$$

ifadesine dönüşmektedir. Bu ifadedeki katsayılar ise;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (3.4)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3.5)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.6)$$

Şeklinde bulunmaktadır. Pratikte ise bu katsayıları bulmak için güç analizörü cihazları kullanılmaktadır. Bazı gösterimlerde ise $f(\omega t)$ fonksiyonunun Fourier serileri ile trigonometrik biçiminin genel ifadesi şu şekilde de gösterilebilmektedir.

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n \cdot \sin n\omega t + A_n \cdot \cos n\omega t) \quad (3.7)$$

Bu ifadeyi açacak olursak;

$$f(\omega t) = A_0 + B_1 \cdot \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + \dots + B_n \cdot \sin(n\omega t) + A_1 \cdot \cos(\omega t) + A_2 \cdot \cos(2\omega t) + A_3 \cdot \cos(3\omega t) + \dots + A_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (3.8)$$

ifadesine dönüşmektedir. Bu ifadedeki katsayılar ise;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot d\omega t \quad (3.9)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot d\omega t \quad (3.10)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot d\omega t \quad (3.11)$$

Şeklinde bulunmaktadır. Nonsinüsoidal dalgaların simetrisine göre Fourier serileri değişiklikler gösterebilmektedir. Simetri özelliklerinden faydalanarak harmonik analizleri daha pratik bir şekilde yapabiliriz. Faydalanabileceğimiz bazı fonksiyon simetrisi şunlardır;

- Çift Fonksiyon Simetrisi
- Tek Fonksiyon Simetrisi
- Yarım Dalga Simetrisi
- Çeyrek Dalga Simetrisi

3.1. ÇİFT FONKSİYONUN SİMETRİSİ

Bir fonksiyon $f(\omega t) = f(-\omega t)$ koşulunu sağlıyorsa çift fonksiyondur. Başka bir ifade ile ise periyodik dalganın düşey ekseninin sol tarafındaki eğrinin düşey eksen etrafında sağ tarafa katlandığında iki eğri tam olarak üst üste gelir ise bu fonksiyon çift fonksiyon simetrisine sahip olmaktadır. Çift fonksiyon simetrisinin Fourier serisi açılımında sadece kosinüslü terimler yer almaktadır. Bazı durumlarda A_0 sabit terimide olabilmektedir. Örneğin;

$$f(\omega t) = A_0 + B_1 \cdot \cos(\omega t) + B_2 \cdot \cos(2\omega t) + B_3 \cdot \cos(3\omega t) + \dots + B_n \cdot \cos(n\omega t) \quad (3.12)$$

3.2. TEK FONKSİYONUN SİMETRİSİ

Bir fonksiyon $f(\omega t) = -f(-\omega t)$ koşulunu sağlıyorsa tek fonksiyondur. Başka bir ifade ile ise periyodik dalganın düşey ekseninin sağ tarafındaki eğrinin önce düşey eksen etrafında sağa daha sonra yatar eksen etrafında aşağı katlandığında iki eğri tam olarak üst üste gelir ise bu fonksiyon tek fonksiyon simetrisine sahip olmaktadır. Tek fonksiyon simetrisinin Fourier serisi açılımında sadece sinüslü terimler yer almaktadır. Örneğin;

$$f(\omega t) = A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_2 \cdot \sin(2\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots + A_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (3.13)$$

3.3. YARIM DALGA SİMETRİSİ

Bir fonksiyon $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$ koşulunu sağlıyorsa fonksiyonun yarım dalga simetrisi vardır. Başka bir ifade ile ise periyodik olan bir fonksiyonun yarım periyotluk parçası yatay eksen boyunca sağa veya sola π kadar kaydırıldığında yatay eksen üzerinde bu parçalar katlandığında iki eğri üst üste gelirse yarım dalga simetrisi vardır. Bu gibi durumların fourier analizi yapılırken integral $0 - \pi$ aralığında alınır ve çıkan sonuç 2 ile çarpılmaktadır. Yarım dalga simetrisi tek fonksiyonun yarım dalga simetrisi ve çift fonksiyonun yarım dalga simetrisi olarak ikiye ayrılmaktadır. Tek fonksiyon yarım dalga simetrisi var ise Fourier açılımında sadece sinüslü tek terimler olmaktadır. Örneğin;

$$f(\omega t) = A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t) + A_5 \cdot \sin(5\omega t) + A_7 \cdot \sin(7\omega t) \quad (3.14)$$

Eğer çift fonksiyon yarım dalga simetrisi var ise buna çeyrek dalga simetrisi de denilmektedir bu gibi durumlarda Fourier açılımında sadece kosinüslü tek terimler olmaktadır. Örneğin;

$$f(\omega t) = B_1 \cdot \cos(\omega t) + B_3 \cdot \cos(3\omega t) + B_5 \cdot \cos(5\omega t) + B_7 \cdot \cos(7\omega t) \quad (3.15)$$

3.4. ÇEYREK DALGA SİMETRİSİ

Periyodik dalga çift simetri ve yarım dalga simetrisi koşulunu beraber sağlıyorsa bu dalga şekline çeyrek dalga simetrisi denilmektedir. Bu dalga simetrisinin Fourier açılımında yalnızca kosinüslü tek terimler yer almaktadır. Bu dalgaların harmonik analizi yapılırken dalganın yarısı hesaplamaya alınır ve sonuç 2 ile çarpılır, veya dalganın çeyreği hesaplamaya alınır sonuç 4 ile çarpılır. Pratikte inverter çıkışlarındaki harmoniklerin analizi bu yöntemle yapılmaktadır.

3.5. FOURİERER KATSAYILARININ BULUNMASI

Sinüsoidal olmayan bir dalganın içerisinde sonsuz sayıda harmonik içeren bileşenler bulunabilmektedir. Ancak pratikte ve uygulamalarda harmonik içeren bileşenlerin katsayılarının bulunması imkansızdır. Sadece hesaplandığına değecek kadar genliği olan katsayıların hesaplanması yapılır. Bu katsayıları bulmak içinde bazı yöntemler vardır. Bu yöntemler şunlardır;

- Analitik Yöntem
- Grafik Yöntemi
- Ölçme Yöntemi

3.5.1. Analitik Yöntem

Bir T periyodu boyunca bir fonksiyon sinüsten uzaklaşıyor ise Fourier katsayıları şu şekilde bulunabilmektedir;

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t \quad (3.16)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t d\omega t \quad (3.17)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t d\omega t \quad (3.18)$$

bu katsayıların bulunması literatürde şu şekilde de ifade edilebilmektedir;

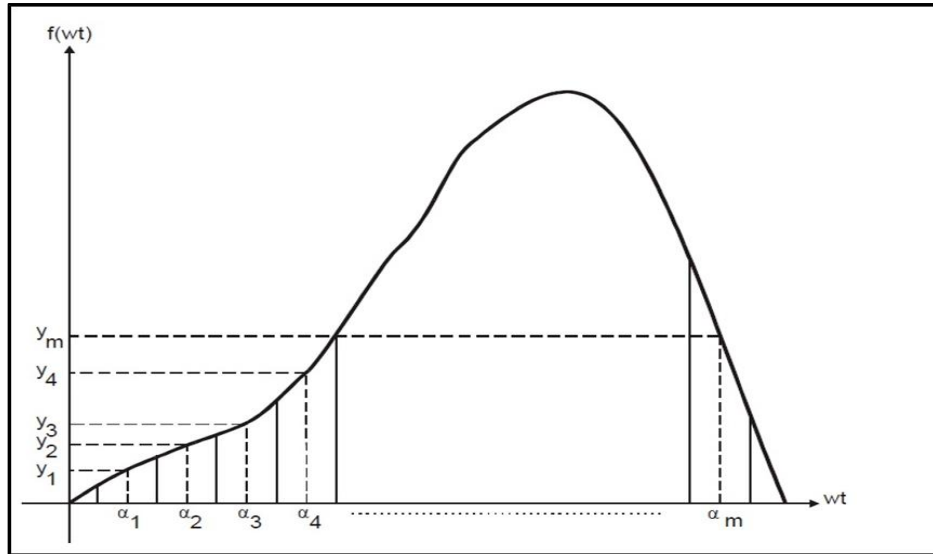
$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t \quad (3.19)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t d\omega t \quad (3.20)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t d\omega t \quad (3.21)$$

3.5.2. Grafik Yöntemi

Bir T periyodu boyunca bir fonksiyon sinüs dalga formundan uzaklaşıyor ise Fourier katsayılarının bulunmasının diğer bir yöntemi de grafik yöntemidir. Bu yöntem genellikle analizi yapılacak fonksiyonun grafiğinin olduğu fakat sayısal değerlerinin ölçümünün yapılamadığı durumlarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Grafik metotla fourier analizin yapılması [19].

Bu yöntem harmonik güç ölçüm analizörlerinin yaygın olarak kullanımda olmadığı dönemlerde osiloskoptan sisteme ait alınan akım veya gerilim grafiklerinin kağıt ortamına çizilmesiyle elde edilen akım veya gerilim fonksiyonuna bu yöntemin uygulanması ile harmoniklerin hesaplanması yapılabilmekteydi. Şekil 3.1’de x

ekseni m adet aralığa bölünmüş bir nonsinüsoidal dalganın pozitif alternansı verilmiştir. Her aralığın orta noktası için alınan α ve y değerleri kullanılarak temel bileşen için meydana çıkan Fourier eşitlikleri;

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cdot \cos \alpha_1 + y_2 \cdot \cos \alpha_2 + y_3 \cdot \cos \alpha_3 + y_4 \cdot \cos \alpha_4 + \dots + y_m \cdot \cos \alpha_m) \quad (3.22)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cdot \sin \alpha_1 + y_2 \cdot \sin \alpha_2 + y_3 \cdot \sin \alpha_3 + y_4 \cdot \sin \alpha_4 + \dots + y_m \cdot \sin \alpha_m) \quad (3.23)$$

Şeklinde bulunabilir. Bu denklemleri;

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \cos \alpha_i) \quad (3.24)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \sin \alpha_i) \quad (3.25)$$

şeklinde de sade bir biçimde ifade edebiliriz. Bu ifadeyi 5. Harmonik için yazmak istersek;

$$A_5 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \cos 5\alpha_i) \quad (3.26)$$

$$B_5 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \sin 5\alpha_i) \quad (3.27)$$

n . harmonik için yazmak istersek

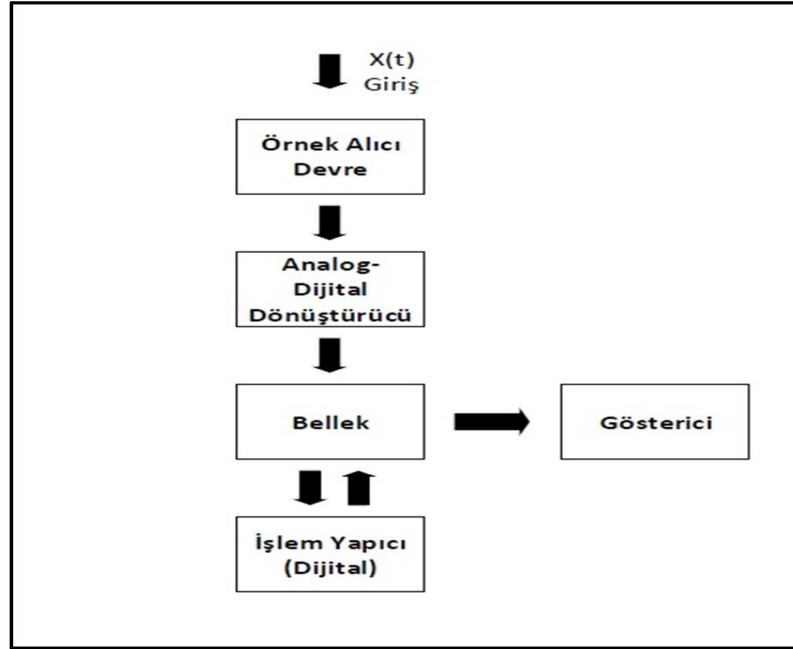
$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \cos n\alpha_i) \quad (3.28)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cdot \sin n\alpha_i) \quad (3.29)$$

Şeklindeki ifade ortaya çıkmaktadır.

3.5.3. Ölçme Yöntemi

Periyodik bir dalganın Fourier bileşenlerinin tespiti için farklı ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ölçme yöntemlerinde genellikle çok dar bantlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile harmoniklerin süzülerek voltmetre ile ölçülme yolu kullanılmaktadır. Bu ölçme yöntemleriyle oluşturulan düzenler harmonik genlik analizörü veya dalga analizörü olarak adlandırılırlar. Bu tür oluşturulan düzenlere harmonik genlik analizörü demek daha uygun olacaktır. Bunun sebebi ise bu analizörlerde harmonik bileşenlerin faz açıları ile ilgili herhangi bir veri elde edilememesidir.



Şekil 3.2. Dijital bir harmonik analizörün blok diyagramı [2].

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan bir diğer ölçme düzeni ise dijital harmonik analizörlerdir. Şekil 3.2’de bir dijital harmonik analizörün blok diyagramı verilmiştir. Bu analizörün en önemli üstünlüğü incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli olmasıdır. Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret gürültü oranının çok yüksek olması gerekir. Diğer bir ifade ile ise bir periyottan alınan örneklerin diğer periyottakilerle eşit olup olmadığı veya örnek alma esnasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi ortadan kaldırmak için ise

sadece bir periyot değil birkaç periyot incelenerek ortalaması alınır. Bunun sonucunda ise sistemde yazma ve tekrar etme için ayrı bir bölüm ihtiyacı ortaya çıkar. [2].

3.6. HARMONİKTEKİ BOZULMA

Harmonikteki bozulma değeri aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$d_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100 (\%) \quad (3.30)$$

Bu denklemde;

d_n : Harmonikteki bozulma

U_n : Harmonik gerilim

U_1 : Anma gerilimini

ifade etmektedir.

3.7. TOPLAM HARMONİK DİSTORSİYONU

Toplam harmonik distorsiyon; harmonik oluşturan bileşenlerin etkin değerinin ana harmoniğin etkin değerine oranlanmasıyla ortaya çıkan bir değerdir. % olarak ifade edilmektedir. Sadece ana harmoniğin toplam harmonik distorsiyon değeri 0'dır. Toplam harmonik distorsiyon kısaca THD olarak gösterilmektedir. Toplam harmonik distorsiyon harmonik bileşen içeren bir dalganın ana harmoniğin sinüs dalga şeklinden ne kadar uzaklaştığının ifadesidir. Pratikte THD'nin yüzde değeri sıfıra yakın olması istenmektedir. Toplam harmonik distorsiyonun matematiksel ifadesi şu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [1,20].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}}{V_1} \quad (3.31)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (3.32)$$

Bu denklemlerde;

THD_V : Gerilimin toplam harmonik distorsiyonu

THD_I : Akımın toplam harmonik distorsiyonu

V_n : Devreye uygulanan gerilimin n'inci mertebedeki harmoniğinin efektif değeri

I_n : Devreden geçen akımın n'inci mertebedeki harmoniğinin efektif değeri

V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki efektif değeri

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki efektif değeri

ifade etmektedir. Elektrik güç sistemlerinde gerilimin toplam harmonik bozulma sınır değeri %3 ile %5 arasında olması beklenirken akım için toplam harmonik bozulma değeri %15 ile %20 arasında olması beklenmektedir. Bu değerlerin üzerindeki harmonik bozulma değerleri sistemde olumsuz etkilere sebep olabilmektedir.

3.8. TOPLAM TALEP BOZULUMU

Akım harmoniği bileşenlerinin rms değerlerinin kareleri toplamının karekökünün maksimum yük akımına oranlanmasıyla ortaya çıkan değerdir. Dalga şeklinde meydana gelen bozulmayı yüzde olarak ifade etmektedir. Matematiksel ifadesi şu şekildedir;

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_h)^2}}{I_L} \times 100 \quad (3.33)$$

Bu denklemde;

I_h : Akım harmoniği

I_L : Maksimum yük akımı

TTB : Toplam talep bozulumu

3.9. HARMONİK STANDARTLARI

Şebekelerin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin zararlı etkilerinden mümkün mertebe zarar görmemesi ve tüketicilere kaliteli enerji sağlanması için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Çizelge 3.1’de farklı ülkeler tarafından farklı gerilim değerleri için oluşturulmuş harmoniklerin sınır değerleri ve toplam harmonik distorsiyon verilmiştir [21].

Çizelge 3.1. Bazı ülkelerin harmonik standartları [21].

Ülke	Gerilim (kV)	THD_V (%)
ABD	Genel	5
	2,4-6,9	1,5
	115<	
	Özel	8
	2,4-69	1,5
	115<	
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım	
	33>	5
	İletim	3
	22-33-66	1,5
	110<	
Finlandiya	1	5
	3-20	4
	30-45	3
	110	1,5
Fransa	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	1,6
İngiltere	0,415	5
	6,6-11	4
	33-66	3
	132	1,5
İsveç	0,43/0,25	4
	3,3-24	3
	84>	1

Bazı ülkeler lineer olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik etkileri sınırlandırmak için harmonik standartlar oluşturup sınırlandırmalar getirmişlerdir. 1992 yılında IEEE tarafından IEEE 519-1992 standardı oluşturulmuş 1995 yılında ise IEC

tarafından IEC 1000-3-2 standardı oluşturularak harmonikler ile ilgili bir takım sınırlandırmalar meydana getirilmiştir.

Çizelge 3.2. 400 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	2	3	1,5	2	1
7	1,5	9	0,5	4	0,8
11	1	15	0,3	6	0,5
13	1	21	0,2	8	0,4
17	0,5	>21	0,2	10	0,4
19	0,5			12	0,2
23	0,5			>12	0,2
25	0,5				
>25	0,2+0,3 (25/h)				
THD_v: %3					

Ülkemizde ise harmonik standartlar Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından belirlenmiştir. Çizelge 3.2'de 400 kV bir iletim sistemi tasarlanırken uyulması gereken harmonik gerilim planlama sınır değerleri verilmiştir. Tablodaki değerler her bir gerilim harmoniğinin ana bileşene göre oransal değerini ifade etmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından çıkarılan Elektrik Şebeke Yönetmeliğine göre iletim sistemine bağlanacak tesis, teçhizat ve bağlantı elemanlarının belirlenen gerilim harmonik planlama sınır değerlerine uygun olarak tasarlanması zorunludur. İletim sistemine bağlanan kullanıcılar ortak bağlantı noktalarında ve ortak bağlantı noktasına yakın diğer bağlantı noktalarında gerilim harmonik uyumluluk sınır değerlerini geçmeyecek şekilde faaliyet göstermelidir. Gerilim harmoniği uyumluluk sınır değerinin geçilip geçilmediğini kontrol eden güç kalitesi ölçüm sisteminin temini tesis ve işletmesi TEİAŞ mülkiyetinde olan trafo merkezlerinde TEİAŞ tarafından gerçekleştirilmeli, iletim sistemi kullanıcısı mülkiyetindeki trafo merkezlerinde ise kullanıcı tarafından yapılmalıdır. Gerilim harmoniği uyumluluk sınır değerinin geçilip geçilmediğini kontrol eden güç kalitesi ölçüm sistemini temin

etmeyen kullanıcılara gerilim harmoniği sınır değerlerinin aşıldığı varsayılarak ilgili cezai işlemler uygulanmaktadır [22].

Çizelge 3.3'de 154 kV bir iletim sistemi tasarlanırken uyulması gereken harmonik gerilim planlama sınır değerleri verilmiştir. Tablodaki değerler her bir gerilim harmoniğinin ana bileşene göre oransal değerini ifade etmektedir.

Çizelge 3.3. 154 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	2	3	2	2	1
7	2	9	1	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,5
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1	>21	0,2	10	0,4
19	1			12	0,2
23	0,7			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THD_v:% 3					

Çizelge 3.4'de 154 kV altındaki bir iletim sistemi tasarlanırken uyulması gereken harmonik gerilim planlama sınır değerleri verilmiştir. Tablodaki değerler her bir gerilim harmoniğinin ana bileşene göre oransal değerini ifade etmektedir.

Çizelge 3.4. 154 kV altındaki iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değeri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	3	3	3	2	1,5
7	3	9	1,2	4	1
11	2	15	0,3	6	0,5
13	2	21	0,2	8	0,4
17	1,6	>21	0,2	10	0,4
19	1,2			12	0,2
23	1,2			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THD_v: % 4					

Normal bir işletme koşulunda iletim sistemindeki bir bağlantı noktasında tesis veya bir ekipmanın devre dışında kalması durumunda ölçülen toplam harmonik bozulma güç kalitesi ölçüm periyodunun %5'inden uzun bir süre için 400 kV'de 50. harmoniğe kadar olan harmonik gerilimlerin her biri için Çizelge 3.5'de verilen üst sınırlar aşılmaksızın %3,5 luk toplam harmonik bozulma sınırını aşamaz.

Çizelge 3.5. 400 kV iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değeri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	3	3	1,7	2	1
7	1,5	9	0,5	4	0,8
11	1	15	0,3	6	0,5
13	1	21	0,2	8	0,4
17	0,5	>21	0,2	10	0,4
19	0,5			12	0,2
23	0,5			>12	0,2
25	0,5				
>25	0,2+0,3 (25/h)				
THD_v: %3,5					

154 kV'de 50. harmoniğe kadar olan harmonik gerilimlerin her biri için Çizelge 3.6'da verilen üst sınırlar aşılmaksızın %5 lik toplam harmonik bozulma sınırını aşamaz.

Çizelge 3.6. 154 kV iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değerleri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	4	3	2	2	1
7	2	9	1	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,5
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1	>21	0,2	10	0,4
19	1			12	0,2
23	0,7			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THD_v:% 5					

154 kV altında 50. harmoniğe kadar olan harmonik gerilimlerin her biri için Çizelge 3.7'de verilen üst sınırlar aşılmaksızın %8 lik toplam harmonik bozulma sınırını aşamaz.

Çizelge 3.7. 150 kV altı için iletim sisteminde harmonik uyumluluk sınır değerleri [22].

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik Bileşen	Harmonik Gerilim (%)
5	5	3	3	2	1,9
7	4	9	1,3	4	1
11	3	15	0,5	≥6	0,5
≥13	2,5	21	0,5		
THD_v:% 8					

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından çıkarılan Elektrik Şebeke Yönetmeliğine göre İletim sistemi kullanıcıları aynı zamanda Çizelge 3.8'de verilen akım harmonikleri sınır değerlerine de uymalıdır.

Çizelge 3.8. Akım harmonikleri sınır değerleri [22].

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV					34.5 kV <V≤154 kV					V>154 kV				
Grup	No	I _k /I _L					I _k /I _L					I _k /I _L				
Tek Harmonikler	h	<20	20-50	50-100	100-1000	1000	<20	20-50	50-100	100-1000	1000	<20	20-50	50-100	100-1000	1000
						^										
	h<11	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11≤h<17	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17≤h<23	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23≤h<35	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h≥35	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
	TTB	5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniye çözünürlükle ölçülen 10 ³ ar dakikalık ortalamalardır.																

Tabloda verilen değerler ortak bağlantı noktasındaki her bir akım harmoniğinin etkin değerinin maksimum yük akımının ana bileşeninin etkin değerine bölünmesidir. Akım harmoniklerinin sınır değerlerinin aşılmamasını kontrol eden güç kalitesi ölçüm sistemlerinin temini tesis ve işletmesi TEİAŞ bünyesindeki trafo merkezlerinde TEİAŞ tarafından, kullanıcı bünyesindeki trafo merkezlerinde ise kullanıcı tarafından yapılır. Akım harmoniklerinin sınır değerinin aşılmamasını izleyen Güç kalitesi ölçüm sistemini kurma yükümlülüğü bulunan kullanıcıların bu yükümlülüklerini yerine getirmemesi halinde akım harmoniklerinin sınır değeri aşıldığı kabul edilerek gerekli işlemler tesis edilmektedir [22].

BÖLÜM 4

AKTİF, PASİF VE HİBRİT FİLTRELER

Harmonik etkileri yok etmenin veya etkilerini en aza indirmenin iki yolu bulunmaktadır. Bunlar meydana gelen harmoniklerin akımlarını azaltma veya filtreleme yöntemidir. Bu bölümde harmonik bileşenlerin etkilerini yok etme veya harmonik bileşenlerin etkilerini azaltma yöntemleri anlatılmıştır.

4.1. HARMONİKLERİN AKIMINI AZALTMA YÖNTEMLERİ

Bu yöntemler kullanılarak harmonikleri ortadan tamamen kaldırmak mümkün değildir ancak harmonik akımların meydana getirmiş olduğu zararlı etkileri en aza indirmek için kullanılmaktadır.

4.1.1. İzolasyon Transformatörü Kullanma

3. mertebeden ve 3. mertebenin katı şeklindeki harmoniklerin transformatör sargısından geçmesini ve besleme devrelerine yayılmalarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. “Zikzak” sargılı transformatörler kullanılarak da besleme devrelerinin izolasyonu sağlanabilmektedir [21].

4.1.2. 12 veya Daha Üst Darbeli Doğrultucu Kullanma

12 veya daha üst darbeli doğrultucu kullanılmasındaki amaç altı darbeli sistemlerde etkili olan 5. ve 7. derece harmonikleri ortadan kaldırmak içindir. Yüksek genliklerinden kaynaklı en fazla harmonik kesintiyi bu derecedeki harmoniklerin yapmış olması sebebiyle ortadan kaldırılmaları çok önemlidir.

4.1.2. Şok Bobini

Sistemdeki mevcut güç kaynağına seri bir şekilde 3 fazlı bir şok bobini ilave edilerek bu uygulama yapılmaktadır. Bu uygulama ile sistemin akım harmoniklerini azaltmış oluruz. Şok bobinlerini harmonik üreticisini etkilemeden sisteme eklemek ve birden çok sistem için kullanmak mümkündür [21].

4.2. HARMONİKLERİ FİLTRELEME YÖNTEMLERİ

Harmonik filtreler harmonik akımların etkilerini en aza indirmek veya tamamen ortadan kaldırmak için ortaya çıkan seri veya paralel olarak tasarlanabilen rezonans devreleridir. Elektrik güç sisteminde meydana gelen harmonik akımları kaynaktan alarak sistemde meydana gelebilecek harmonik gerilim bozulmalarını ortadan kaldırırlar. Harmonik filtreler pahalı cihazlar olduğundan yukarıda bahsetmiş olduğumuz harmonik akımları azaltma yöntemleri kullanılıp sonuç alınamazsa harmonik filtreleme yöntemleri kullanılması daha ekonomik olması açısından önemlidir. Eğer bir tesiste harmonik akımları azaltma yöntemleri kullanılmasına rağmen harmonik etkiler yok edilemediyse mutlaka harmonik filtreleme yöntemleri kullanılmalıdır. Böylelikle yönetmeliklerin belirlemiş olduğu limit değerlerine de uyulmuş olunacaktır. Harmonik filtrelerin kullanılmasıyla ekipmanlarda meydana gelebilecek zararlı etkilerin önüne geçilirken aynı zamanda işletme maliyetlerindeki artış da engellenmiş olacaktır. Harmonik bir filtrenin iç yapısında basitçe bir takım direnç, indüktör ve kondansatör bulunur.

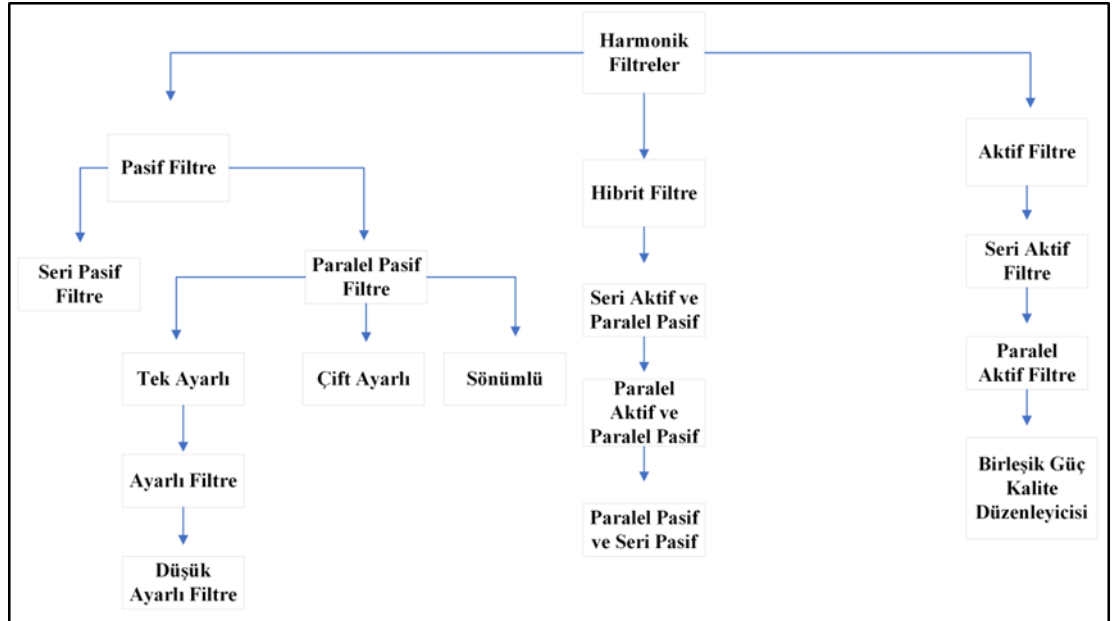
Bir tesiste harmonik filtre kullanılacaksa harmonik filtreden temel olarak aşağıdaki özellikleri sağlaması beklenmektedir [23].

- Kolay kurulabilmesi ve işletme yapısının basit olması
- Harmonik etkileri yok ederken başka problemlere sebep olmaması
- Dayanıklı olması
- Yatırım ve işletme maliyetlerinin ucuz olması
- Harmonikleri istenilen ölçüde yok etmesi

Bir tesisin harmonik filtrelendirme projesi yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar şunlardır;

- İlk olarak harmonik etkilerin neden kaynaklandığının tespiti iyi yapılmalı ve harmoniklerin ne oranda yok edileceğinin hedefi iyi belirlenmelidir.
- Harmonikler için en etkili ve aynı zamanda da ekonomik olacak yöntem tercih edilmelidir.
- Harmonik filtre tasarımı yapacağımız tesisin tek hat şeması mutlaka oluşturulmalıdır.
- Oluşturacağımız tek hat şeması üzerinde hangi yükün ne kadar harmonik etki yaratacağı belirtilmelidir.
- Tasarlayacağımız harmonik filtrenin yüke yakın olması çok önemlidir.
- Tasarım yapacağımız tesisin gerilim, akım, reaktif güç, aktif güç güç faktörü gibi bilgilerini bilmemiz gerekmektedir [23].

Temel olarak pasif filtre, aktif filtre ve hibrit filtre olarak sınırlandırılabilirler Harmonik filtrelerin temel yapıları Şekil 4.1’de verilmiştir



Şekil 4.1. Harmonik filtrelerin sınıflandırılması.

4.2.1. Pasif Filtre

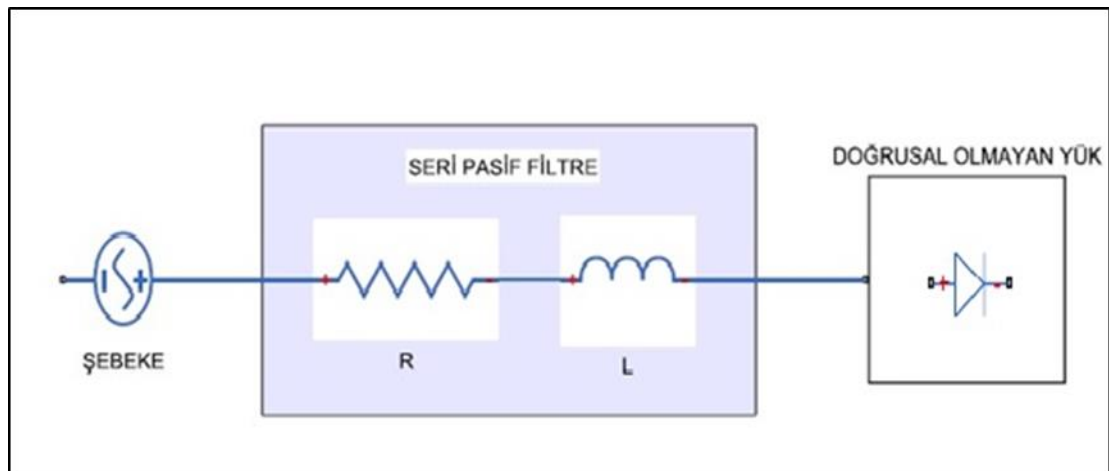
Pasif filtreler temel olarak direnç (R), kondansatör (C) ve bobinden (L) meydana gelirler. En yaygın olarak kullanılan harmonik filtreleme yöntemidir. Bu filtreleme yöntemiyle aslında harmonikler yok edilmez fakat harmoniklerin istenilen yöne akması sağlanır. Temel olarak seri pasif filtre ve paralel pasif filtre olarak 2'ye ayrılırlar [24].

4.2.1.1. Seri Pasif Filtre

Harmonik etkilere sebep olan eleman ile şebeke arasında paralel olarak bağlanmaktadır. Endüktans (L) elemanından meydana gelmektedir. Bu endüktans;

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (4.1)$$

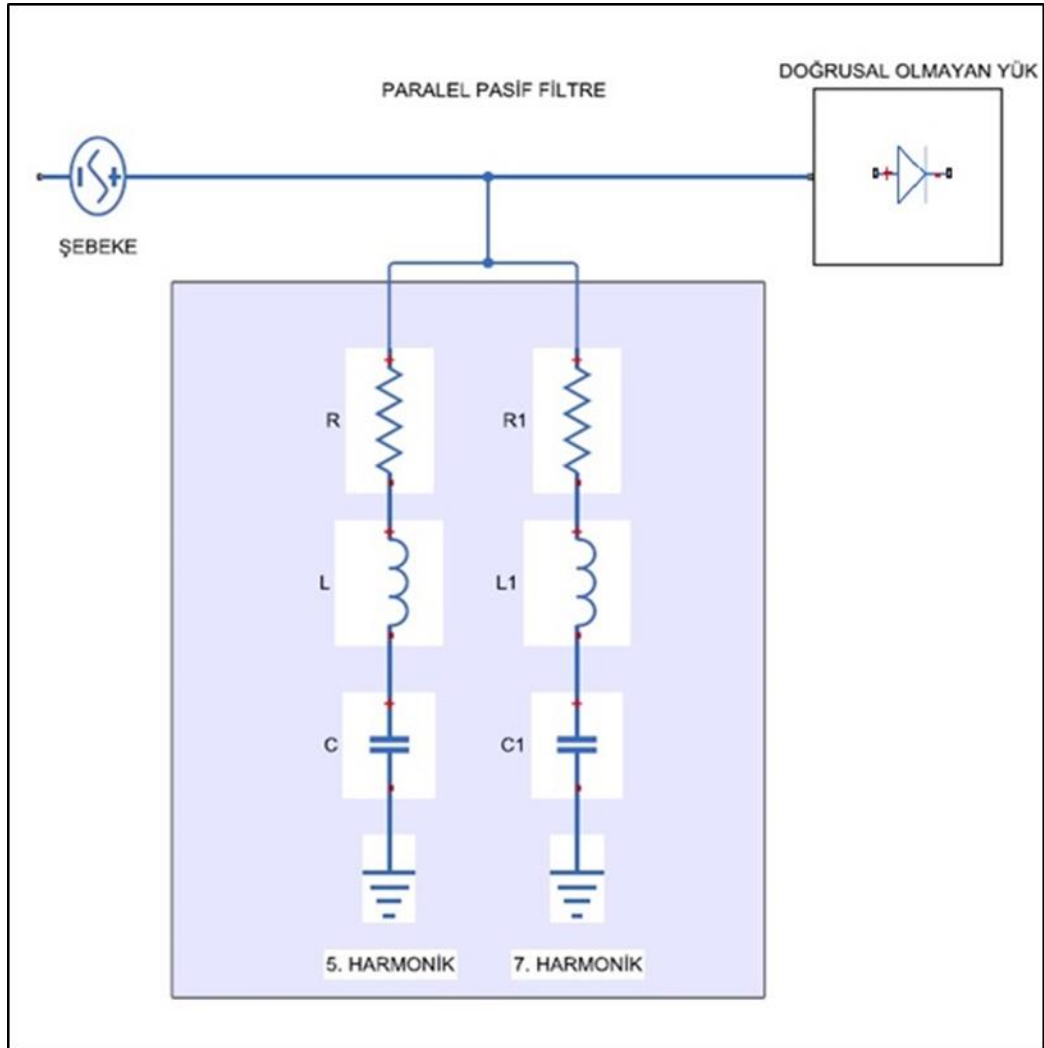
Formülü ile ifade edilmektedir. Yani harmonik bileşenlerin frekanslarına karşı yüksek empedans göstererek bu frekansların geçişini engellemektedir. Temel şebeke frekansında ise düşük empedans göstermektedir. Seri pasif filtrelerde hat geriliminin durumuna göre yalıtım zorunlulukları olabilmektedir. Ayrıca seri pasif filtre sistemde gerilim düşümlerine sebep olabilmektedir. Şekil 4.2'de seri pasif filtreye örnek devre şeması verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü üzere filtre doğrusal olmayan yük ile şebeke arasında seri bir şekilde bağlanmıştır [24].



Şekil 4.2. Seri pasif filtre.

4.2.1.2. Paralel Pasif Filtre

Paralel diğeri bir adıyla ise şönt pasif filtreler harmonik üreten kaynağa paralel olarak bağlanmaktadır. Yapısında harmonik kaynağa paralel olacak şekilde direnç (R), endüktans (L) ve kondansatör (C) bulunmaktadır. Yapısında bulunan endüktans (L) ve kondansatör (C) değerleri hesaplanırken her bir harmonik bileşen için ayrı ayrı hesaplama yapılmaktadır. Harmonik üreten kaynağa paralel bağlanması ile harmonikleri yok ederken aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu sağlayabilmektedir. Paralel pasif filtrenin tek ayarlı, çift ayarlı ve sönümlü olmak üzere üç çeşidi bulunmaktadır. Şekil 4.3'de paralel pasif filtreye örnek devre şeması verilmiştir.



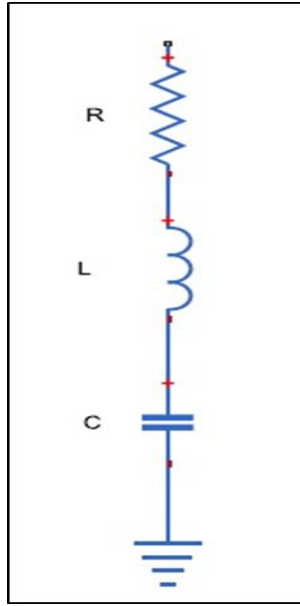
Şekil 4.3. Paralel pasif filtre.

4.2.1.3. Tek Ayarlı Filtre

Bant geçiren filtre ismi ile de bilinmektedir. Bu filtrenin en belirgin özelliği tek bir frekanstaki harmonik akımlara karşı kısa devre yolu meydana getirerek bu akımın hattan uzaklaşmasını sağlarlar. Tek ayarlı filtre devresi temel olarak endüktif, kapasitif ve omik yüklerden oluşmaktadır. Tek ayarlı bir filtrenin empedans değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [25].

$$Z=R+j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (4.2)$$

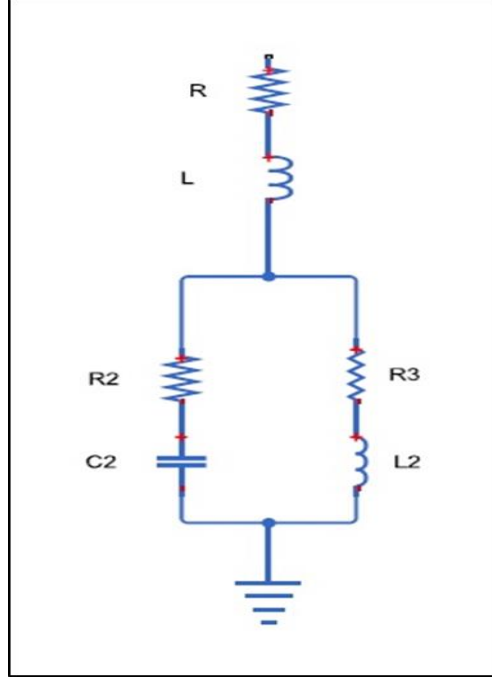
Şekil 4.4'te tek ayarlı pasif filtreye örnek devre şeması verilmiştir.



Şekil 4.4. Tek ayarlı pasif filtre.

4.2.1.4. Çift Ayarlı Filtre

Çift ayarlı pasif filtreler iki farklı değerdeki harmonik bileşeni ortadan kaldıracırlar. Çift ayarlı filtrelerde temel frekansta meydana gelen güç kaybının daha az olması tek ayarlı filtreye göre en avantajlı yönü olmuştur. Dezavantajı ise çift ayarlı filtrelerin karmaşık bir yapıya sahip olması ve ayarlanmasının zorluğudur. Şekil 4.5'de çift ayarlı filtrenin örnek devre şeması gösterilmiştir [24,26].

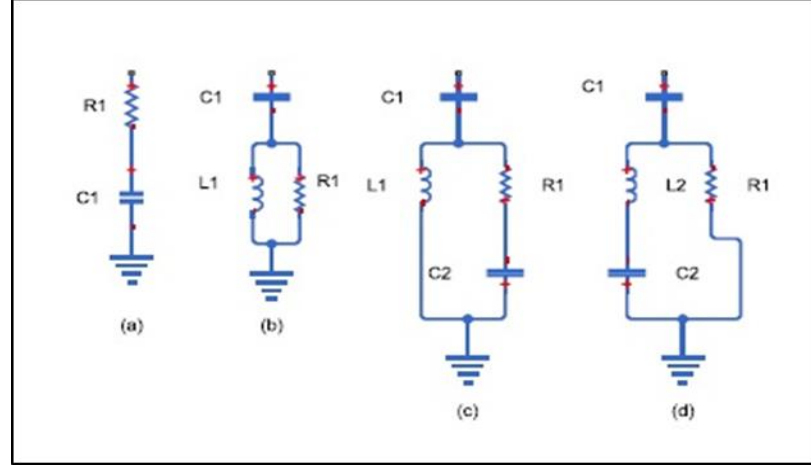


Şekil 4.5. Çift ayarlı pasif filtre.

4.2.1.5. Sönümlü Pasif Filtre

Yüksek geçişli filtre olarak da bilinmektedir. Yüksek mertebeden harmonik bileşenleri filtrelemek için kullanılmaktadır. Bu durumda yüksek frekanslara düşük empedans, düşük frekanslara ise yüksek empedans gösterirler. Sönümlü pasif filtrenin temel devre elemanları tek ayarlı pasif filtrenin devre elemanlarıyla aynıdır. Şekil 4.6'da sönümlü pasif filtrenin devre şemalarına yer verilmiştir. Burada görüleceği üzere sönümlü pasif filtreler birinci derece, ikinci derece, üçüncü derece ve c tipi olarak ayrılırlar. Bu filtrelerinde her birinin ayrı özellikleri bulunmaktadır. Birinci derece sönümlü pasif filtrede çok yüksek kapasiteye sahip bir kapasitör bulunmaktadır. Bundan dolayı çok yüksek temel frekansta kayıplara sebep olmaktadır. Çok fazla tercih edilmemesinin temel sebebi budur. 2. derece sönümlü pasif filtre 1. Derece sönümlü pasif filtreye oranla daha yüksek bir performans sergilemektedir. Ancak 3. Derece sönümlü pasif filtreye oranla ise yüksek temel frekans kayıplarına neden olmaktadır. Sönümlü pasif filtreler arasında en çok tercih edilen filtre türüdür. 3. derece sönümlü pasif filtrenin en önemli avantajı içerisinde yer alan C2 kondansatörü sayesinde temel frekans empedansını arttırarak temel frekans kayıplarını azaltmasıdır. C tipi sönümlü pasif filtre ise performans olarak 2.

derece sönümlü pasif filtre ile 3. derece sönümlü pasif filtrenin ortasında bir performans sergilemektedir. C tipi sönümlü pasif filtrenin en büyük dezavantajı ise temel frekansta ortaya çıkan sapmalardır diyebiliriz. [24-26]



Şekil 4.6. Sönümlü pasif filtreler (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) c tipi.

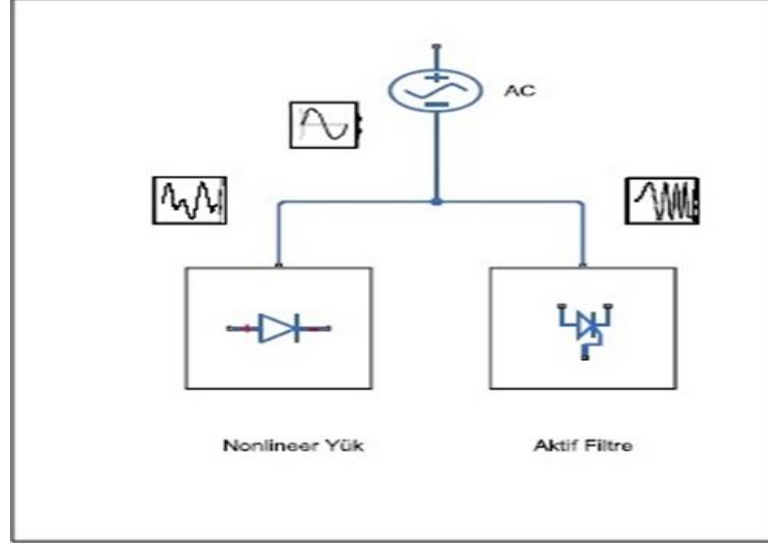
4.2.2. Aktif Filtre

Aktif filtreler harmonikleri yok etmek amacıyla kullanılan güç elektroniği tabanlı olarak geliştirilmiş filtrelerdir. Aktif harmonik filtrelerde çift yönlü çalışan bir invertör ile şebeke ve invertör arasında çeşitli filtreler bulunmaktadır. Bu sayede şebeke ile kendisi arasındaki harmonikleri yok etmektedir. Bu sebeple filtrenin kurulacağı nokta önemlidir. Aktif filtrenin çalışma mantığı ise kısaca akımdaki harmoniğin algılanmasıyla beraber algılanan harmonik akıma tam olarak ters fazda (180 derece faz farkı) üretilen harmonik akımın sisteme gönderilmesiyle kendisi ile tam tersi birleşen harmonik akım ortadan kaldırılmış olur.

Aktif güç filtreleri sistemdeki harmonik bileşenleri elimine ederken aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım dengesizlikleri, nötr akımı kompanzasyonu ve şebeke geriliminin regülasyonu içinde kullanılmaktadırlar [27].

Aktif filtreler pasif filtrelere göre oldukça pahalı cihazlardır. Ancak paralel rezonans sebebiyle pasif filtrelerin başarılı olamadığı durumlarda sistemdeki harmonikleri giderme konusunda oldukça başarılıdırlar [28].

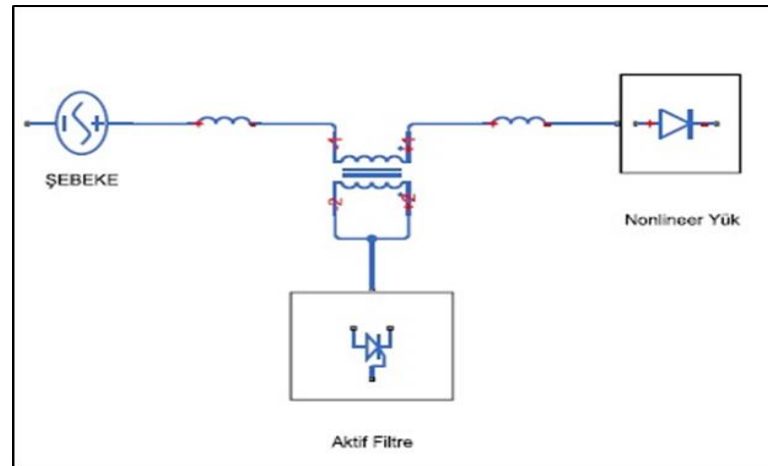
Şekil 4.7’de harmonik akımı sönmleyen aktif filtrenin bir örneği görülmektedir.



Şekil 4.7. Aktif filtrenin çalışma şekli.

4.2.2.1. Seri Aktif Filtre

Bu filtre türünde aktif filtre yük ile seri bir şekilde bağlanmaktadır. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere seri aktif filtreler güç sistemine bir trafo yardımıyla bağlanmaktadır.



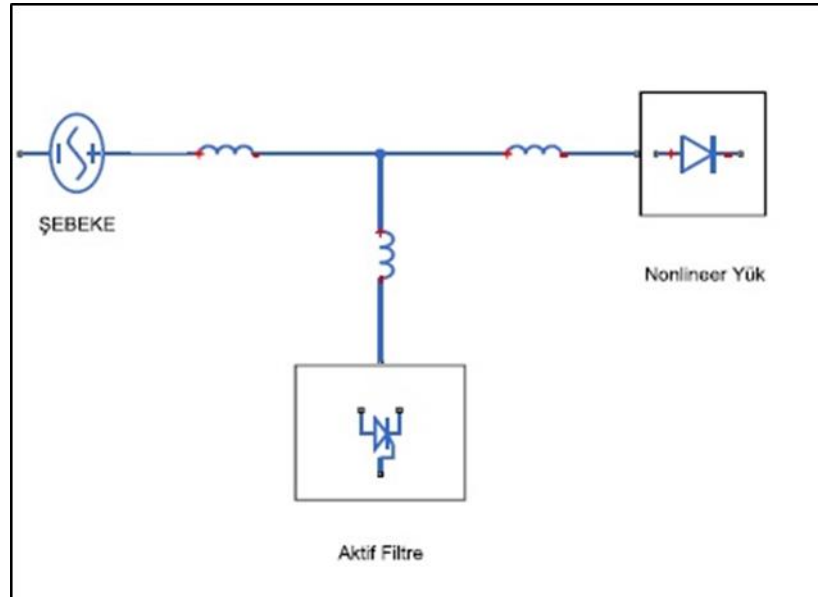
Şekil 4.8. Seri aktif filtre.

Seri aktif güç filtresi, esas olarak yükün her iki ucundaki saf sinüzoidal gerilim dalga formunun kararlılığına dayanmaktadır. Seri aktif filtreler gerilim harmoniklerini azaltır veya süzer, bu filtre sayesinde gerilimden kaynaklı kompanzasyonlar, gerilimdeki dengesizlikler ve gerilimdeki dalgalanmalar büyük oranda giderilmektedir [1].

Paralel aktif güç filtresine göre en büyük avantajı üzerindeki çıkış gerilim dalgasının sinüzoidal biçimini devam ettirebiliyor olmasıdır. Buda seri aktif güç filtresini biraz daha avantajlı duruma getirmektedir [29].

4.2.2.2. Paralel Aktif Filtre

Paralel aktif güç filtreleri şebekeye paralel olarak bağlanmaktadır. Şekil 4.9'da paralel aktif güç filtresinin şeması verilmiştir



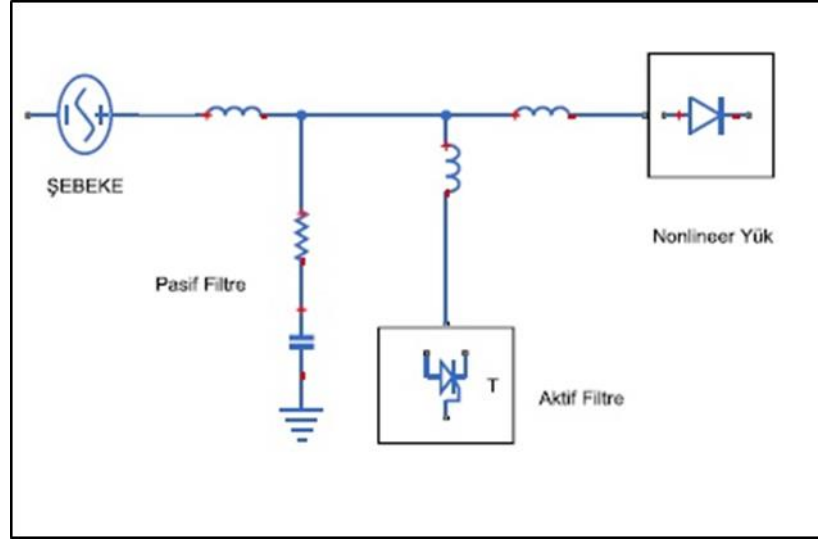
Şekil 4.9. Paralel aktif güç filtresi.

Diğer bir adıyla şönt aktif filtre olarak isimlendirilirler. Bu filtre türü sanayide en yaygın olarak kullanılan bir filtre türüdür. Paralel aktif güç filtreleri harmonik akımların filtrelemesi, reaktif güç kompanzasyonu sağlanması, sistemdeki yük akımlarının dengelemesi ve nötr akımının kompanzasyonu gibi akımdan

kaynaklanan harmoniklerin yok edilmesi için kullanılmaktadır. Pasif filtrelere göre en büyük dezavantajı kurulum maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. [29,30].

4.2.3. Hibrit Filtre

Hibrit filtre aktif güç filtreleri ile pasif güç filtrelerinin birleştirilmeleriyle ortaya çıkan bir filtre türüdür. Şekil 4.10'da hibrit filtrenin temel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Hibrit filtre.

Bu filtrenin kullanımındaki temel amaç maliyetleri azaltarak filtreleme kalitesini arttırmaktır. Yani burada sistemde daha önceden var olan pasif filtrelerin yanına aktif filtreler eklenerek maliyet azaltılmış olur. Bununla beraber aktif filtrelerin ve pasif filtrelerin avantajlarından aynı anda yararlanma imkanı elde edilmiş olmaktadır. Pasif filtreler temel harmonikleri sönmüleme ve güç kompanzasyonu imkanı sağlarken aktif filtreler hassas kabiliyetleri sayesinde kalan diğer harmonikleri sönmüleme ve kompanzasyon görevini üstlenirler. Hibrit filtreler harmonik kompanzasyonun yanı sıra kaynakla yük arasında harmonik izolasyonu, gerilim regülasyonu sağlamakta ve dengesizlikleri gidermek için kullanılmaktadır.

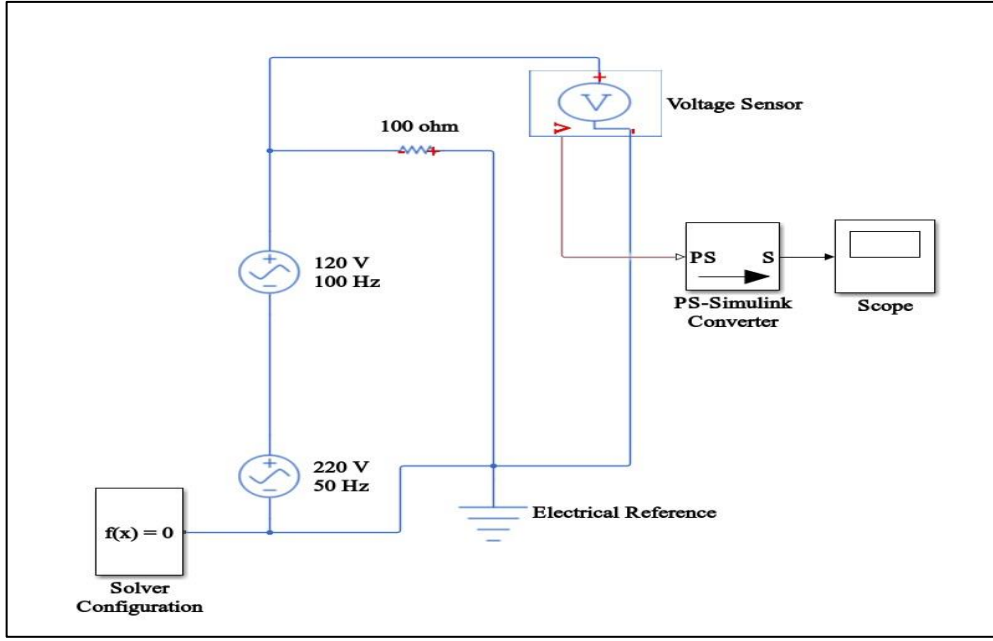
BÖLÜM 5

PASİF FİLTRE TASARIMI VE MATLAB PROGRAMI İLE SİMÜLASYONU

Pasif filtreler temel olarak endüktans, kapasitans ve direnç gibi pasif devre elemanlarından oluşurlar. Genel olarak kaynak ile yük arasına gelecek şekilde tasarlanarak temel frekans haricindeki harmonik bileşenleri yok etmeleri beklenmektedir. Pasif filtrelerde temel amaç sönümlendirilmek istenen harmonik bileşen frekansında filtrede bulunan L ve C elemanlarının rezonansa girmesini sağlamaktır. Bu bölümde 220 Volt ve 50 Hz temel şebeke frekansına çeşitli mertebelerdeki gerilim harmonikleri maruz bırakılarak meydana gelen bozulmuş dalganın şeklinin analizi yapılacak ve bu bozulmuş harmonik dalganın pasif filtre tasarımı yapılmak suretiyle tekrardan sinüsoidal forma geri döndürülmesi veya sinüsoidal forma oldukça yaklaştırılması hedeflenecektir. Filtre tasarımından önce ve filtre tasarlandıktan sonraki ortaya çıkan durum MATLAB programı yardımıyla simüle edilecektir.

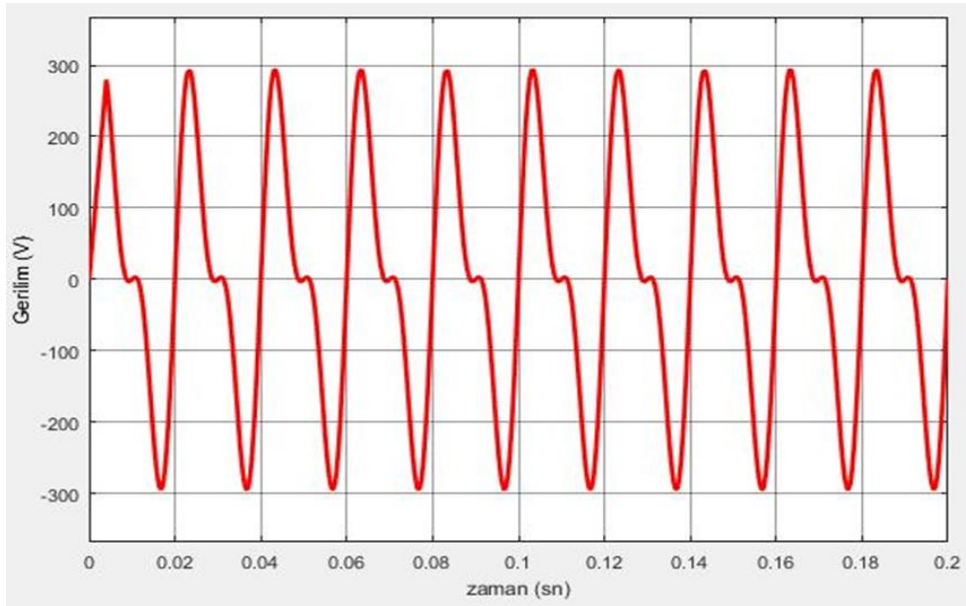
5.1. SERİ PASİF FİLTRE TASARIMI

Seri pasif filtreler harmonik kaynak ile şebeke arasına seri olarak bağlanmaktadır. Ortadan kaldırılmak istenilen harmonik bileşenleri geçirmemek için yüksek empedans göstermektedirler. Sadece tasarlandıkları harmonik bileşen frekanslarında etkilidirler. Bu bölümde ilk olarak 220 Volt ve 50 Hz şebeke frekansı 120 Volt ve 100 Hz lik bir dalganın etkisine maruz bırakılarak ölçümler yapılmıştır. 220 Volt 50 Hz temel şebeke frekansını etkileyecek olan 120 Volt 100 Hz lik sinyalin devre şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



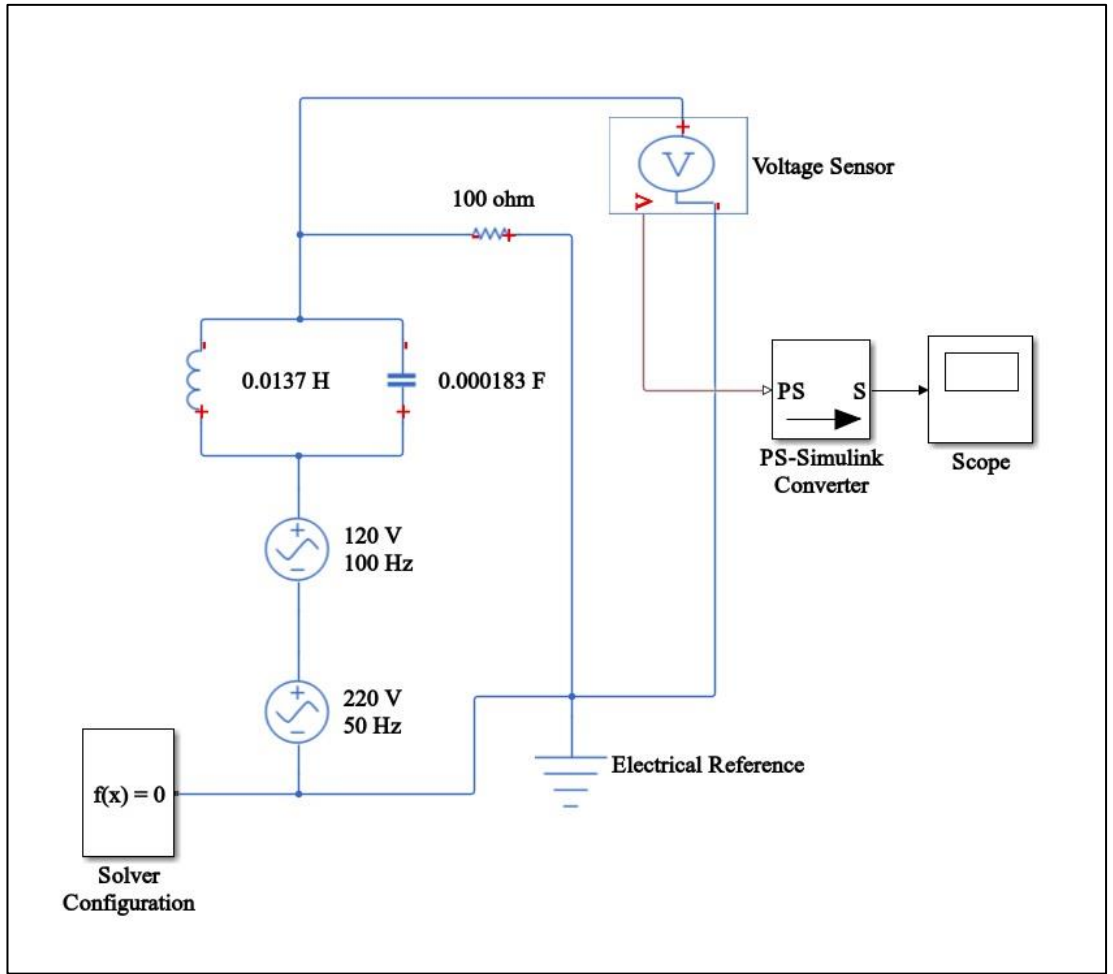
Şekil 5. 1. Sisteme filtre tasarımı yapılmadan önceki devre şeması.

Kurmuş olduğumuz bu devreyi simüle ettiğimizde ortaya çıkan bozulmuş zaman gerilim sinyali ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu sinyalden anlaşılacağı üzere 220 Volt 50 Hz temel şebeke frekansına etki eden 120 Volt ve 100 Hz frekansa sahip dalga temel sinüs sinyalini bozmuştur. Bozulan bu sinyali sinüs sinyaline yaklaştırmak için filtre uygulaması yapmamız gerekecektir.



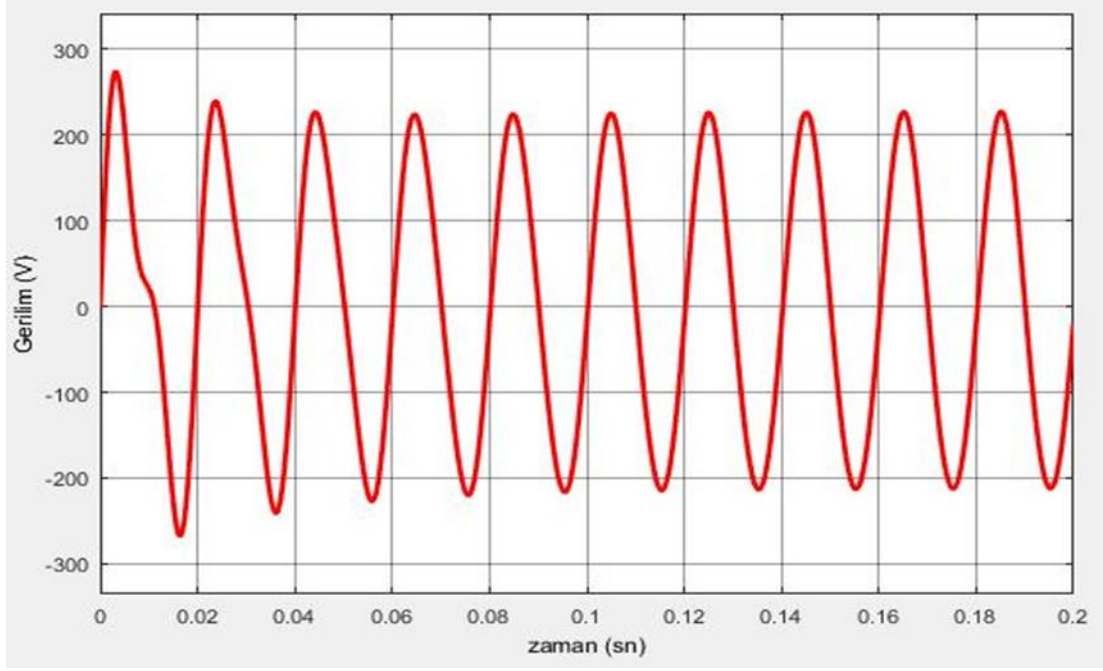
Şekil 5. 2. Bozulmuş sinyal.

Şekil 5.2’de harmonik etkilerle bozulmuş olan sinyali sinüsoidal forma döndürebilmek için şebekeye ve yüke seri bir şekilde bir L-C devresi tasarlanmıştır. Buradaki L-C devresi alternatif akımda 220 Volt ve 50 Hz şebeke frekansına karşı düşük bir empedans gösterecek, 120 Volt ve 100 Hz harmonik gerilim kaynağına ise büyük empedans gösterecektir. Bu sayede gerilim sinyali bozulmuş etkisinden kurtularak 220 Volt ve 50 Hz’lik şekline çok yaklaşmış olacaktır. Şekil 5.3’de şebekeye ve yüke seri bir şekilde tasarlanan L-C devresinin simüle edilmiş devresi görülmektedir.



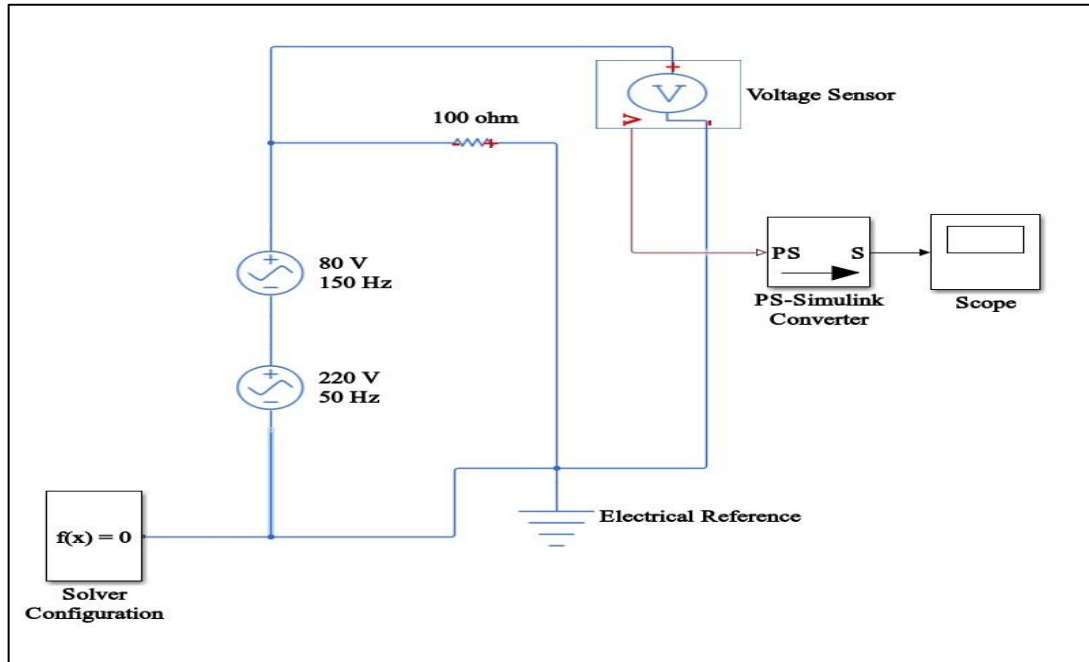
Şekil 5.3. Filtre uygulandıktan sonra ortaya çıkan devre.

Şekil 5.3’de görünen endüktans ve kapasitans değerleriyle tasarlanmış olduğumuz seri pasif filtreyi devreye uyguladığımızda Şekil 5.2’deki bozulmuş olan sinyalin Şekil 5.4’deki gibi tekrardan sinüsoidal forma yaklaştığı gözlemlenmiştir.



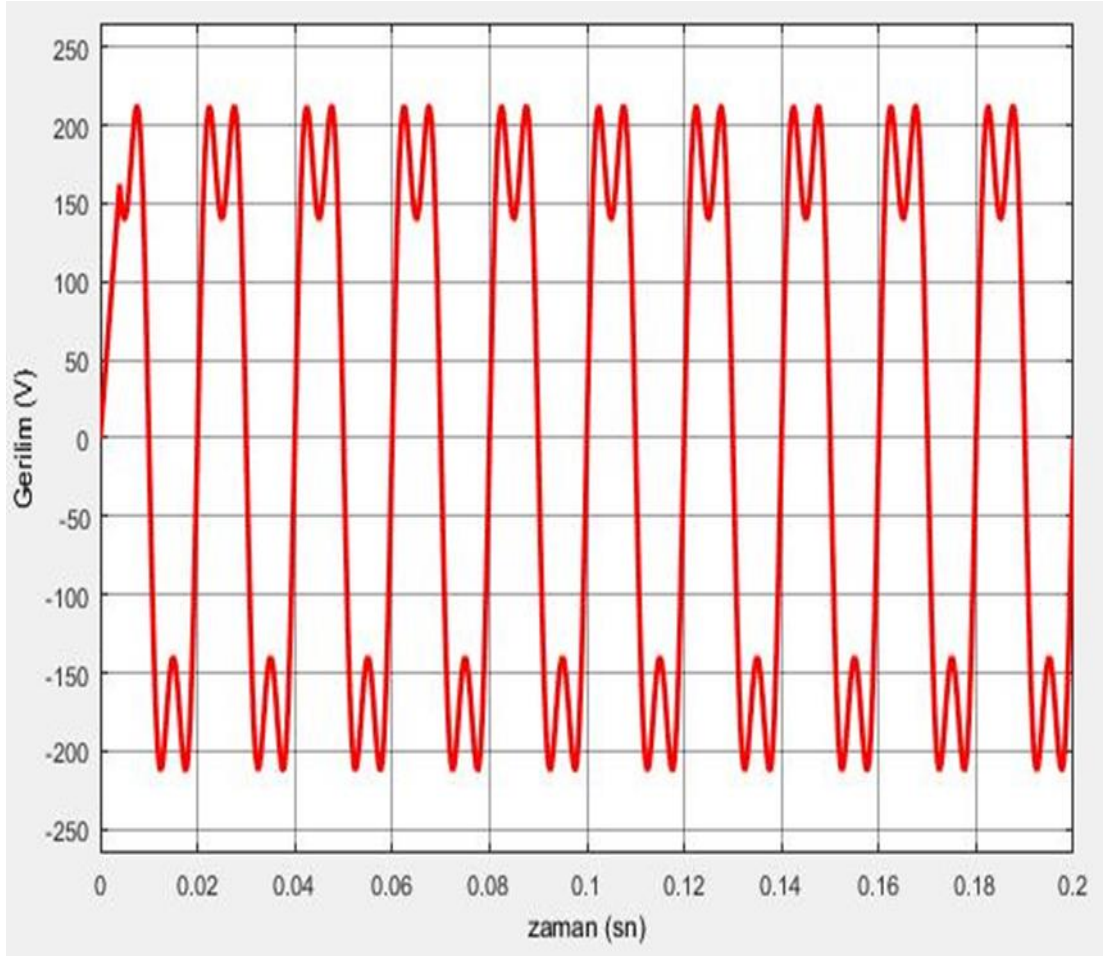
Şekil 5.4. Filtre uygulandıktan sonra oluşan sinyal.

İkinci olarak 220 Volt ve 50 Hz şebeke frekansı 80 Volt ve 150 Hz lik bir dalganın etkisine maruz bırakılarak ölçümler yapılmıştır. 220 Volt 50 Hz temel şebeke frekansını etkileyecek olan 80 Volt 150 Hz lik sinyalin devre şeması Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



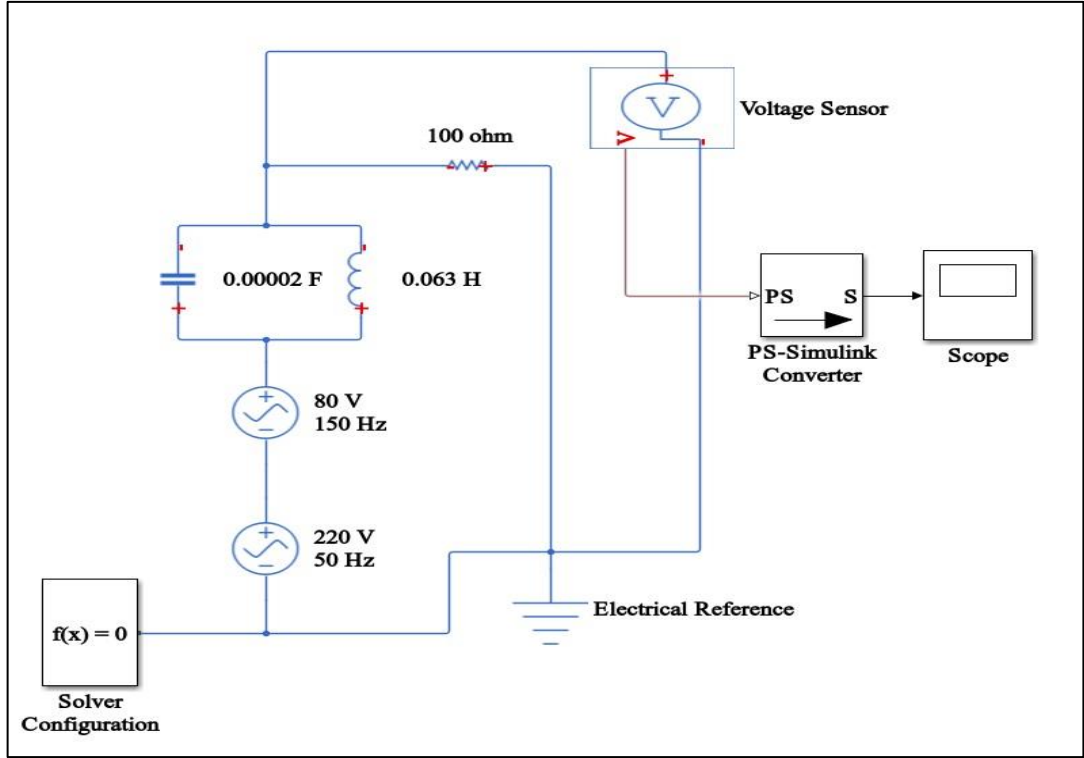
Şekil 5.5. Sisteme filtre tasarımı yapılmadan önceki devre şeması.

Kurmuş olduğumuz bu devreyi simüle ettiğimizde ortaya çıkan bozulmuş zaman gerilim sinyali ise şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu sinyalden anlaşılacağı üzere 220 Volt 50 Hz temel şebeke frekansına etki eden 80 Volt ve 150 Hz frekansa sahip dalga temel sinüs sinyali sinüsoidalikten oldukça uzaklaştırmıştır. Sinüsoidalikten uzaklaşan bu sinyali sinüs sinyaline yaklaştırmak için filtre uygulaması yapmamız gerekecektir.



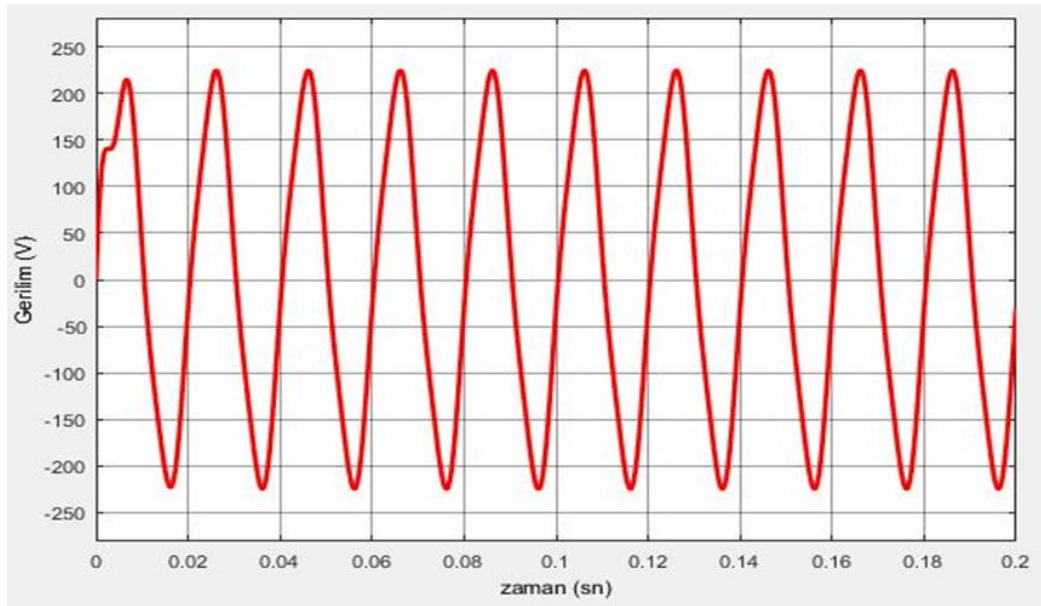
Şekil 5.6. Bozulmuş sinyal.

Şekil 5.6'daki harmonik etkilerle bozulmuş olan sinyali sinüsoidal forma döndürebilmek için şebekeye ve yüke seri bir şekilde Şekil 5.7'deki L-C devresi tasarlanmıştır. Buradaki L-C devresi alternatif akımda 220 Volt ve 50 Hz şebeke frekansına karşı düşük bir empedans gösterecek, 80 Volt ve 150 Hz harmonik gerilim kaynağına ise büyük empedans gösterecektir. Bu sayede gerilim sinyali bozulmuş etkisinden kurtularak 220 Volt ve 50 Hz'lik şekline çok yaklaşmış olacaktır.



Şekil 5.7. Filtre uygulandıktan sonra ortaya çıkan devre.

Şekil 5.7'deki endüktans ve kapasitans değerleriyle tasarlanmış olduğumuz seri pasif filtreyi devreye uyguladığımızda ise Şekil 5.6'daki bozulmuş olan sinyalin Şekil 5.8'deki gibi tekrardan sinüsoidallığe yaklaştığı gözlemlenmiştir.

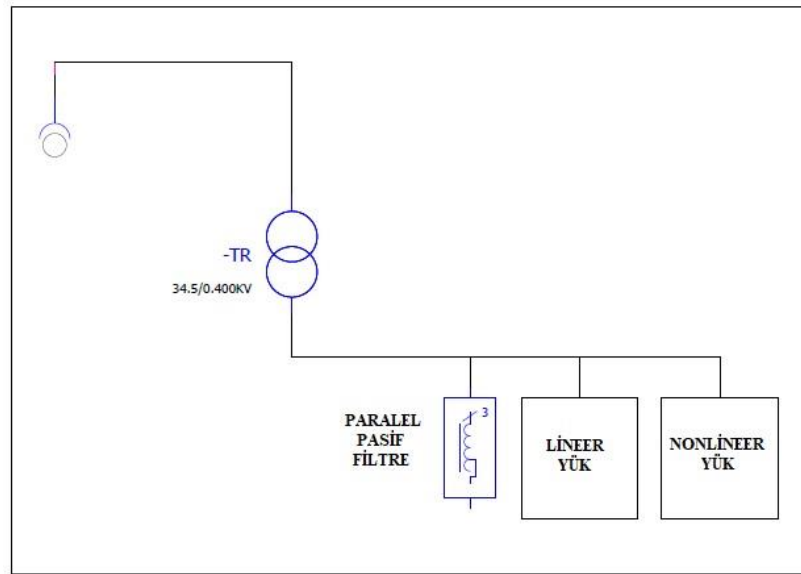


Şekil 5.8. Filtre uygulandıktan sonraki sinyal görüntüsü.

Deney çalışmalarında seri pasif filtre şebeke ile yük arasına seri olarak yerleştirilmiştir. Tasarlamış olduğumuz seri pasif filtre ortadan kaldırmak istediğimiz harmonik frekanstaki akıma karşı yüksek empedans değeri göstererek istemediğimiz harmonik bileşeni ortadan kaldırmıştır. Bu filtrenin temel olarak en büyük avantajı yatırım maliyetinin oldukça düşük olmasıdır. Dezavantaj olarak ise sadece ayarlamış olduğumuz ve ortadan kaldırmak istediğimiz harmonik bileşene etki etmiş sistemde farklı bir harmonik bileşen ortaya çıkarsa buna etki edemeyecek olmasıdır. Böyle bir filtre tasarımı yapılacağı zaman ortamdaki harmonik bileşen etkilerin tespiti iyi yapılmalı çok farklı harmonik bileşenlerin olmadığı tespiti halinde bu filtre tasarımı yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması sebebiyle tercih edilmelidir.

5.2. PARALEL PASİF FİLTRE TASARIMI

Bu bölümde örnek bir endüstriyel tesis için tek ayarlı paralel pasif devre tasarımı yapılacaktır. Tesisimizin toplam aktif gücü 10 KW olarak belirlenmiş tesisimizin güç katsayısı 0,11 olarak kabul edilmiş, ulaşılmak istenen hedef güç katsayısı ise 0,82 olarak baz alınacaktır. Endüstriyel tesisimizde 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşenlerin olduğu varsayılmıştır. Tek ayarlı paralel pasif filtre tasarımı yapacağımız örnek tesisimiz Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Paralel pasif filtre tasarımı yapacağımız örnek tesis.

Paralel harmonik pasif filtre tasarımı yapılırken genliği yüksek olan harmonik bileşenler için paralel kol tasarımları yapılmalı, genliği çok yüksek olmayan harmonik bileşenler için sadece harmonik etkiyi azaltacak tek bir paralel kol tasarımı yapılması uygun olacaktır. Tek ayarlı paralel pasif filtre tasarımı yapılırken $X_L=X_C$ eşitliği sağlanması gerekmektedir. Tasarlayacağımız tek ayarlı paralel pasif filtredeki kapasite temel şebeke frekansı ve harmonik bileşen dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi yaratacağından ve aynı zamanda harmonik filtremiz kapasitif reaktif gücü de sağlayacağından filtre tasarımımızı yapmadan önce ilk olarak sistemimizin reaktif gücünü belirlememiz gerekecektir. Sistemin reaktif gücü belirlemek için;

$$Q=P.(\tan\theta_1-\tan\theta_2) \quad (5.1)$$

eşitliği kullanılacaktır. Bu eşitlikte;

Q : Sistemimizin istemiş olduğumuz güç katsayısına ulaşması için gerekli kondansatör gücü (Var)

P : Sistemimizin toplam aktif gücü (W)

$\tan\theta_1$: Kompanzasyon yapılmadan önceki güç açısının tanjantı

$\tan\theta_2$: Kompanzasyon yapıldıktan sonraki güç açısının tanjantı

5.1'deki eşitlik kullanılarak örnek tesisimiz için gerekli reaktif güç hesabı yapıldığında gerekli olan kompanzasyon gücü 82 kVar çıkmaktadır.

Gerekli olan kompanzasyon gücü hesaplandıktan sonra ise sisteme bağlanması gerekli olan kondansatörün kapasitif reaktansını belirlememiz gerekmektedir. Sisteme bağlayacağımız kondansatörün kapasitif reaktansını ise;

$$X_C = \frac{U^2}{Q} \quad (5.2)$$

eşitliği ile bulabiliriz. Bu eşitlikte;

X_C : Sistemimize bağlayacağımız kondansatör reaktansı (Ω)

- U :Sistem gerilimi
Q :Kompanzasyon gücü

Kapasitif reaktans değerimizi tespit ettikten sonra bu değer örnek tesisimizde var olan 4 harmonik merteye için ayrı ayrı olarak tasarlayacağımız filtre üzerinden geçecek akımlara göre dağıtılacaktır. Daha sonra ise X_C değerlerine karşılık olarak gelen X_L değerleri bulunacaktır. Kondansatör kapasitesini hesaplamak için;

$$C=C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_n=\frac{I}{2.\pi.f.X_C} \quad (5.3)$$

Bobin endüktansını hesaplamak için ise;

$$L=\frac{I}{4.\pi^2.fn^2.C_n} \quad (5.4)$$

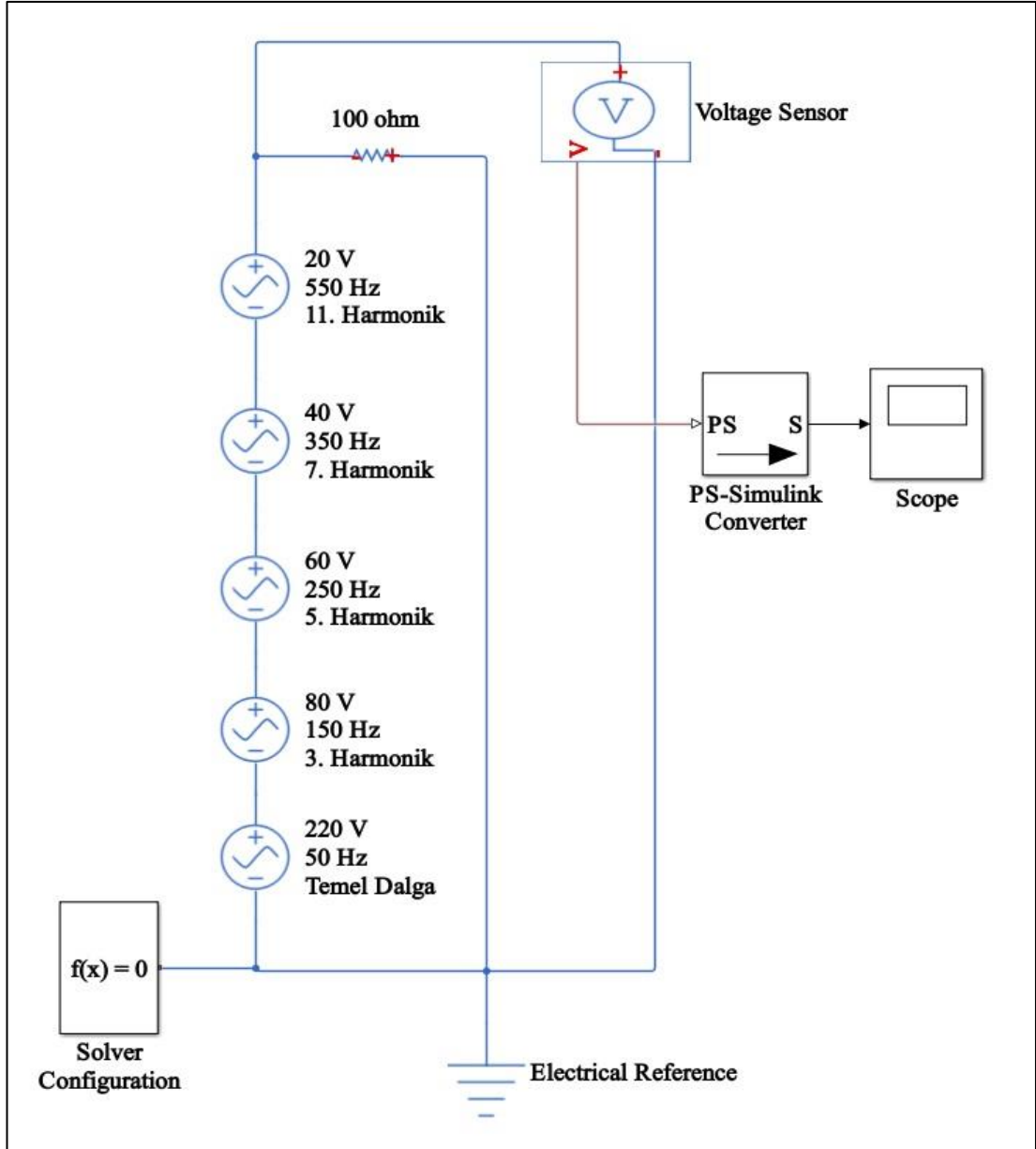
eşitliği kullanılacaktır. Filtre tasarımıımızda kullanacağımız direnç değerininin tespiti ise kalite faktörüne bağlıdır. Direnç değerini hesaplamak için;

$$Q=\frac{\sqrt{L.C}}{R} \quad (5.5)$$

eşitliği kullanılacaktır. Bu eşitlikte;

- Q :Kalite faktörü
R :Filtre tasarımıımızda kullanacağımız direnç değeri
L :Filtre tasarımıımızda kullanacağımız bobin değeri
C :Filtre tasarımıımızda kullanacağımız kondansatör değeri

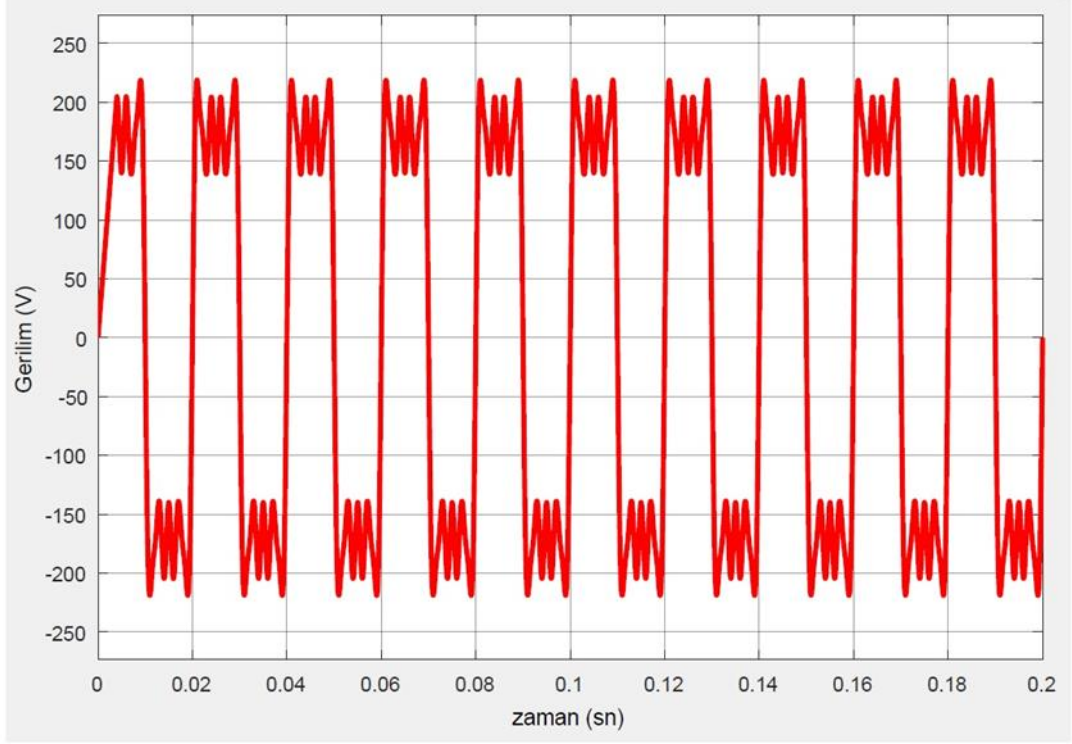
Direnç değeri hesaplanırken kalite faktörü $60 < Q < 100$ aralığında bir değer seçilerek hesaplama yapılabilir. 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşen etkilerinin görüldüğünü varsaymış olduğumuz örnek tesisimizin MATLAB programı ile oluşturmuş olduğumuz devre yapısı Şekil 5.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Matlab ile oluşturduğumuz 3.,5.,7. ve 11. Harmonikleri içeren devre yapısı.

Şekil 5.10'dan anlaşılacağı üzere 220 volt 50 Hz temel şebeke frekansı üzerine genliği 80 volt frekansı 150 Hz olan 3 gerilim harmoniği, genliği 60 volt frekansı 250 Hz olan 5. Gerilim harmoniği, genliği 40 volt frekansı 350 Hz olan 7. Gerilim harmoniği ve genliği 20 volt frekansı 550 Hz olan 11. gerilim harmoniği etki etmiştir. Bu harmonik bileşenlerin etkisi sonucunda sinüsoidal bir şekli olan temel dalga bozularak sinüsoidallikten uzaklaşmış bir hal alacaktır. 3., 5., 7. ve 11.

harmonik bileşenlerin etkisi sonucunda bozulan ve sinüsoidallikten uzaklaşmış olan dalga şekli Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Harmonik bileşenlerin etkileri sonucunda bozulan dalga şekli.

Bozulan sinyali tekrardan sinüsoidal hale dönüştürmek için filtre tasarımı yapılması gerekmektedir. Tasarlayacağımız paralel tek ayarlı pasif filtre ayarlanmış olduğumuz frekans değerinde düşük empedans gösterecek ve harmonik bileşenlerin toprağa akmasını sağlayacaktır. Öncelikle sistemimizde genliği en yüksek olan 3. harmonik bileşen için filtre tasarımı yapılacak ve sistemdeki etkisi gözlemlenecektir. Daha sonra ise sistemimizde bulunan her bir harmonik bileşen için tasarım yapılacaktır. 3. harmonik bileşen için hesaplamalar şu şekilde yapılacaktır;

5.2’deki eşitlik kullanılarak

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{82000} = 0,590 \Omega \quad (5.6)$$

5.3’deki eşitlik kullanılarak

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,590} = 0,005397 \text{ F} \quad (5.7)$$

$$C = C_3 = 0,005397 \text{ F} \quad (5.8)$$

5.4'deki eşitlik kullanılarak

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (150)^2 \cdot (0,005397)} = 0,0002088 \text{ H} \quad (5.9)$$

sonuçları ortaya çıkmaktadır. Kalite faktörünü 70 olarak kabul edip eşitlik 5.5'i kullandığımızda ise ;

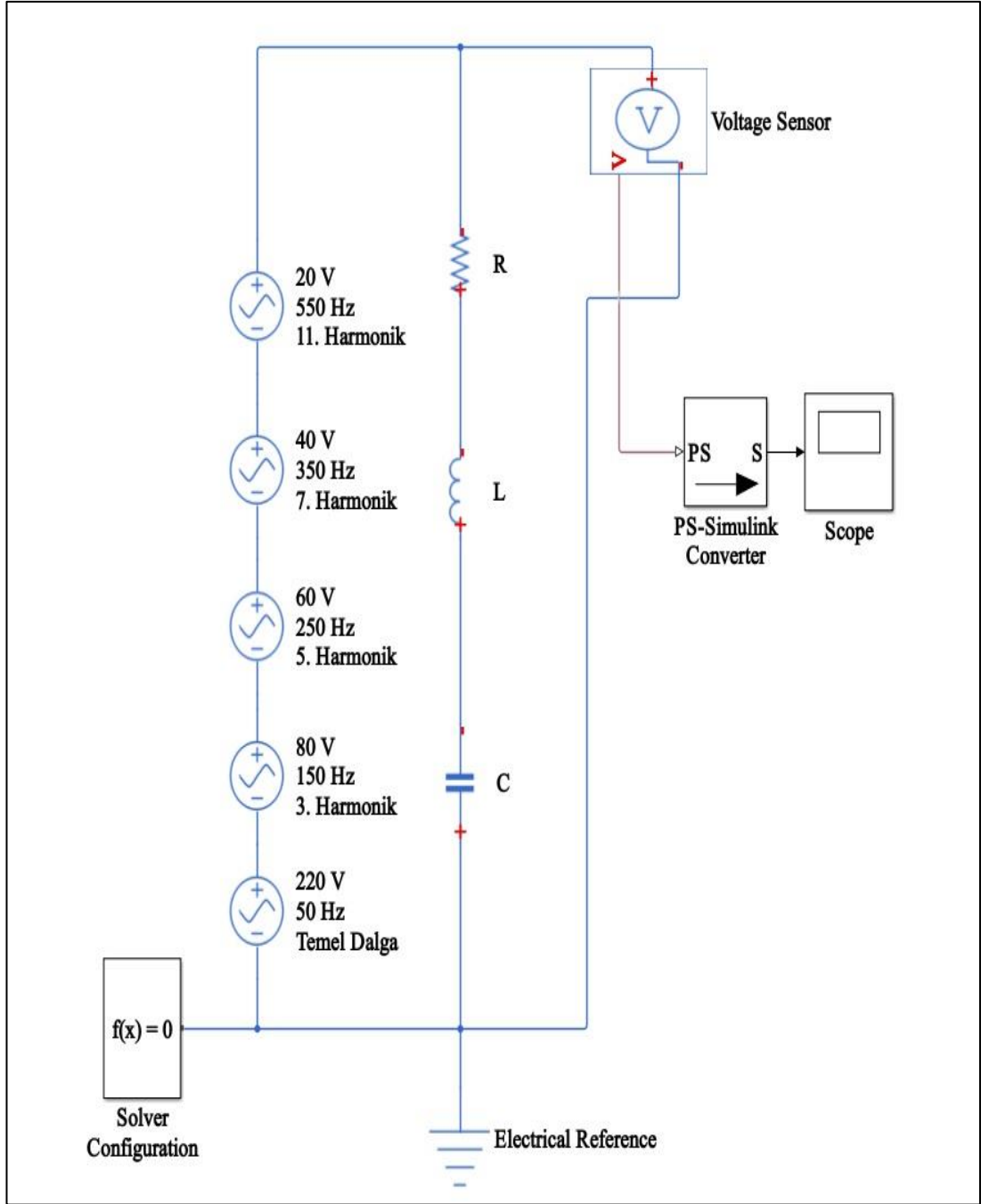
$$Q = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{R} = 1,51 \times 10^{-5} \quad (5.10)$$

sonucu ortaya çıkmaktadır. Hesaplamalar sonucu filtre tasarımımda kullanacağımız direnç kondansatör ve bobin değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Ortaya çıkan bu değerlere göre sistemimizde bulunan 3. harmonik bileşen için yapmış olduğumuz filtre tasarımının MATLAB programı ile oluşturduğumuz devre yapısı şekil 5.12'de gösterilmiştir.

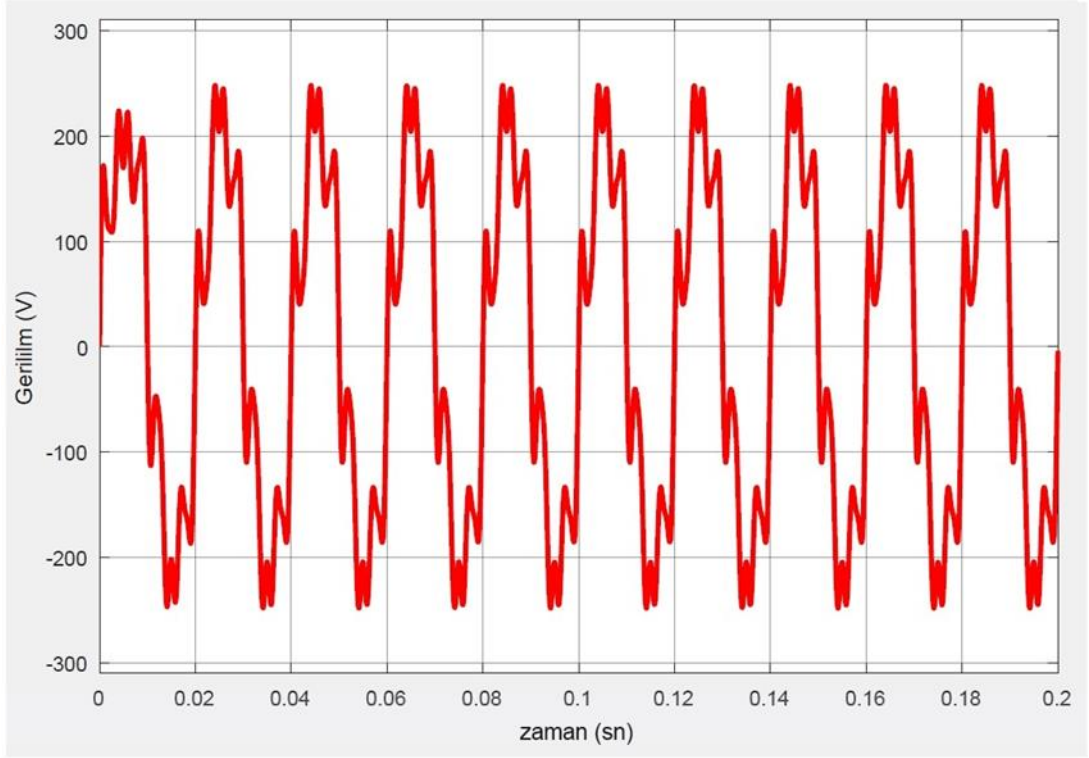
Çizelge 5.1. Filtre tasarımında kullanılacak değerler.

R3 (Ω)	L3 (H)	C3 (F)
1,51 x 10⁻⁵	0,0002088	0,005397



Şekil 5.12. 3. harmonik bileşen için filtre tasarımı.

Genliği en büyük olan 3. harmonik bileşen için yapmış olduğumuz filtre tasarımını simüle ettiğimizde ortaya çıkan dalga şekli ise Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. 3.Harmonik bileşen için yapmış olduğumuz filtre tasarımından sonra oluşan sinyal şekli.

Şekil 5.13'den anlaşılacağı üzere 3. harmonik bileşen için yapılan tek ayarlı paralel pasif filtre tasarımı yeterli olmamıştır. Bu sebeple sisteme bulunan ve tespit ettiğimiz tüm harmonik bileşen frekansları için filtre tasarımı yapmak gerekecektir.

5.2'deki eşitlik kullanılarak

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{82000} = 0,590 \Omega \quad (5.11)$$

kapasitif reaktans değeri hesaplanmıştır.

Eşitlik 5.3 kullanılarak

$$C = \frac{I}{2.\pi.f.X_C} = \frac{I}{2.\pi.50.0,590} = 0,005397 F \quad (5.12)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_{11} = 1,34 \times 10^{-3} F \quad (5.13)$$

filtre tasarımında kullanacağımız kondansatör değeri hesaplanmıştır.

Eşitlik 5.4 kullanılarak

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_3)^2.C_3} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,34 \times 10^{-3})^2} = 8,4 \times 10^{-4} \text{ H} \quad (5.14)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_5)^2.C_5} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,34 \times 10^{-3})^2} = 3,02 \times 10^{-4} \text{ H} \quad (5.15)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_7)^2.C_7} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,34 \times 10^{-3})^2} = 1,54 \times 10^{-4} \text{ H} \quad (5.16)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f_{11})^2.C_{11}} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,34 \times 10^{-3})^2} = 6,25 \times 10^{-5} \text{ H} \quad (5.17)$$

paralel filtre tasarımındaki paralel kollarda kullanacağımız bobin değerleri hesaplanmıştır. Paralel kollarda kullanacağımız direnç değerleri ise kalite faktörü 70 kabul edilip eşitlik 5.5 kullanılarak hesaplanırsa;

$$Q = \frac{\sqrt{L_3.C_3}}{R_3} \quad R_3 = 1,51 \times 10^{-5} \Omega \quad (5.18)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_5.C_5}}{R_5} \quad R_{11} = 9,09 \times 10^{-6} \Omega \quad (5.19)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_7.C_7}}{R_7} \quad R_7 = 6,49 \times 10^{-6} \Omega \quad (5.20)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_{11}.C_{11}}}{R_{11}} \quad R_{11} = 4,13 \times 10^{-6} \Omega \quad (5.21)$$

Hesaplamalar sonucunda tek ayarlı paralel pasif filtre tasarımında kullanacağımız kondansatör değerleri çizelge 5.2'de, bobin değerleri çizelge 5.3'de ve direnç değerleri çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Hesaplanan kondansatör değerleri.

C3 (F)	C5 (F)	C7 (F)	C11 (F)
$1,34 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$

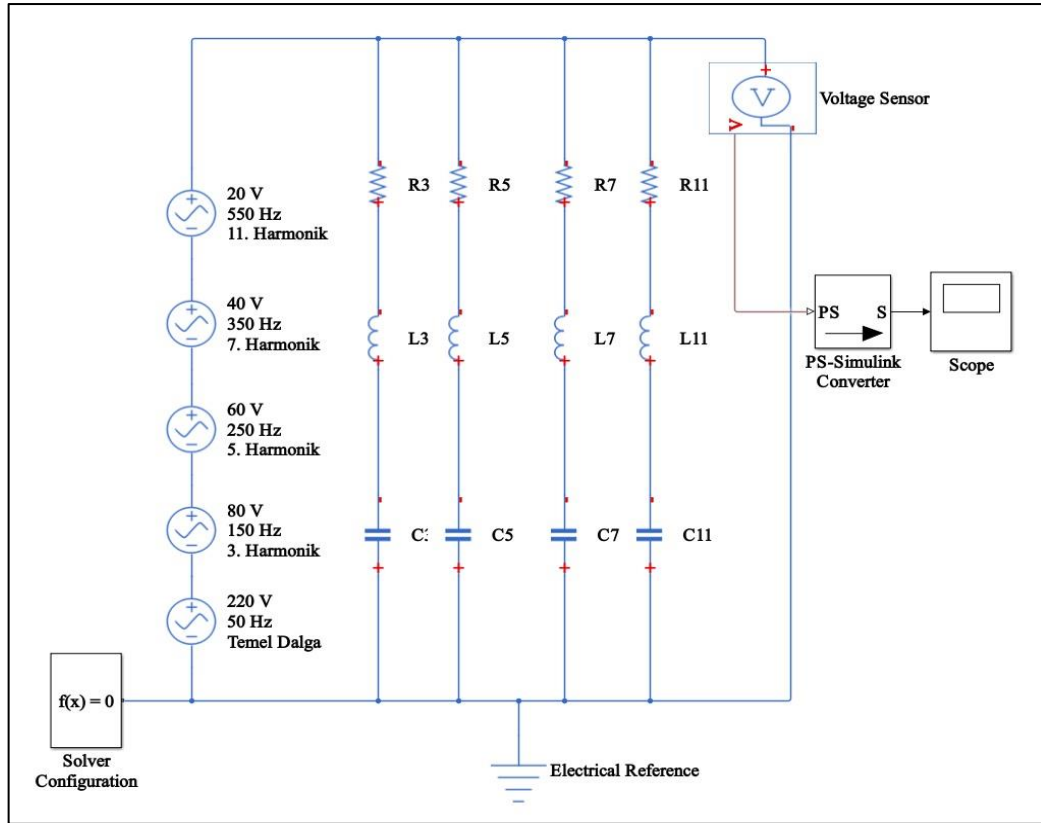
Çizelge 5.3. Hesaplanan bobin değerleri.

L3 (H)	L5 (H)	L7 (H)	L11 (H)
$8,4 \times 10^{-4}$	$3,02 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-5}$

Çizelge 5.4. Hesaplanan direnç değerleri.

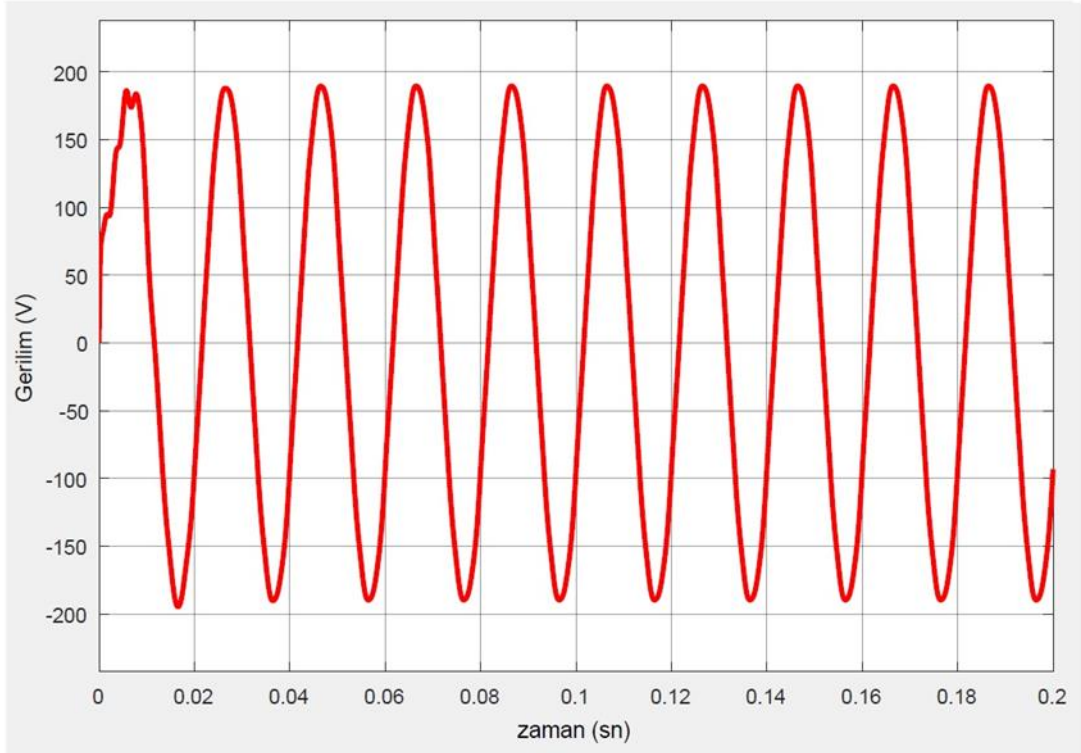
R3 Ω	R5 Ω	R7 Ω	R11 Ω
$1,51 \times 10^{-5}$	$9,09 \times 10^{-6}$	$6,49 \times 10^{-6}$	$4,13 \times 10^{-6}$

Ortaya çıkan bu değerlere göre sistemimizde bulunan 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşenleri ortadan kaldırmak için yapmış olduğumuz filtre tasarımının MATLAB programı ile oluşturduğumuz devre yapısı şekil 5.14'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Sistemde bulunan 3., 5., 7. ve 11. harmonikler için filtre tasarımı.

Şekil 5.14'deki esaslara göre gerçekleştirdiğimiz filtre tasarımı sonucunda devrenin simülasyonunu gerçekleştirdiğimizde oluşan sinyal görüntüsü ise Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Sinyal görüntüsünden de anlaşılacağı üzere harmonik bileşenlerin etkileri sebebiyle Şekil 5.11'deki gibi bozulan sinyal filtre tasarımı sonucunda Şekil 5.15'deki gibi sinüsoidalliğe yakın bir hal almıştır.



Şekil 5.15. Filtre tasarımı sonucunda oluşan sinyal.

Deney çalışmalarında tasarlamış olduğumuz paralel pasif filtre harmonik kaynağına paralel bir şekilde bağlanmıştır. Ortadan kaldırmak istemiş olduğumuz harmonik frekansında düşük empedans göstererek harmonik bileşenlerin toprağa akması sağlanmıştır. İlk olarak genliği en yüksek olan 3. harmonik bileşen için tek ayarlı pasif filtre tasarımı yapılsa da sistemde bulunan diğer harmonik bileşenlerinde etkisiyle bu filtre çalışmasının tam olarak başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra ise sistemde tespit etmiş olduğumuz tüm harmonik bileşenler için tasarım yapılmış ve sinyalin sinüsoidal haline yaklaştığı görülmüştür. Sistemde tespit edemediğimiz yüksek genlikli farklı bir harmonik bileşen olması halinde filtre

çalışmamızın tam olarak başarılı olamayacağı anlaşılmıştır. Paralel pasif filtrenin dezavantajı ayarlamış olduğumuz frekans değerindeki harmonik bileşenleri ortadan kaldırırken daha farklı bir harmonik bileşen ortaya çıkması durumunda bunlar üzerinde herhangi bir etkisi olmayacağı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Ülkemizde ve dünyada nüfusun ve sanayileşmenin hızla artmasıyla paralel olarak elektrik tüketimi de hızla artmış ve elektrik enerjisi artık vazgeçilemez bir enerji kaynağı haline dönüşmüştür. Kullanıcı çeşitliliğinin artması her geçen gün farklılaşan çok çeşitli yük şekillerini de ortaya çıkarmaktadır. Elektrik enerjisini tüketen kullanıcılar doğal olarak bu enerjinin kaliteli olmasını beklemektedir. Kaliteli bir elektrik enerjisinden temel kasıt ise frekansın 50 Hz olması, akım ve gerilim dalga şekillerinin ise tam sinüsoidal olmasıdır. Ancak sistemde nonlineer yük içeren kullanıcıların sayısının zamanla artması akım ve gerilimin dalga şekillerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bu da kullanıcıların güç kayıplarına ve zaman zamanda şebekeden beslenen cihazlarda arıza ve problemlere yol açmaktadır.

Elektrik enerjisinin kalitesini bozan temel faktörlerden biri olan ve bu tez çalışmasında da etkilerinden ve korunma yollarından bahsetmiş olduğumuz harmonikler temel sinüsoidal bir kaynaktan nonlineer yüklerin beslenmesi sonucu ve nonsinüsoidal bir kaynaktan lineer veya nonlineer yüklerin beslenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışması ile sistemimizde meydana gelen harmoniklerin nasıl ortaya çıktığı, harmoniklerin sistemimizde bulunan ekipmanlara nasıl etkide bulunduğu, harmonikleri analiz yöntemlerinin neler olduğu üzerinde durulmuş, ayrıca harmonikleri ortadan kaldırma yöntemlerinden biri olan seri ve paralel pasif filtre tasarımı yapılarak aynı sistemin filtresiz ve filtreli halleri MATLAB programı yardımıyla simüle edilmiştir.

MATLAB programı ile yapmış olduğumuz simüle çalışmalarında güç sistemlerinde en çok zarar veren 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşenlerin etkileri sonucunda temel şebeke sinyalinin sinüsoidallikten ne kadar uzaklaştığı yapmış olduğumuz pasif filtre tasarımlarıyla ise bozulan bu sinyali tekrardan sinüsoidal haline ne derece de

ulaştırabildiğimiz grafikler ile gözlemlenmiştir. Pasif filtre tasarımı yapmamızdaki amaç öncelikle yatırım ve işletme maliyetlerinin aktif ve hibrit filtrelere göre daha ucuz olması, teorik olarak pasif filtrelerde frekans sınırlaması olmadığından sönümlemek istemiş olduğumuz harmonik bileşen frekansına ayarlayabiliriz, ayrıca pasif filtreler daha yüksek akımlara dayanabilirler ve iyi bir kararlılığa sahiptirler.

Her geçen gün artan yük çeşitleri elektrik güç kalitesi problemlerinden biri olan harmoniklerin daha iyi analiz edilmesi gerektiği sonucunu doğurmuştur. Simüle çalışmalarında gözlemlediğimiz üzere harmonikli bir sistemde gerilim sinyali sinüsoidallikten uzaklaşmış olması bir tesis içerisinde aynı kaynaktan beslenen tüm cihazlarda harmonik etkilerin görülmesine sebep olacaktır. Bu sebeple doğrusal olmayan yükler içeren tesislerin ilk kuruluş aşamasında harmonik bileşenlerin etkileri için tasarım aşamasında önlemler alınmalı, harmonik analizleri yapılmalı, harmonikler harmonik üreten kaynağın yakınında yok edilmeye çalışılmalıdır. Harmonik bileşenler için tedbirler alınmaz ise ortaya çıkabilecek harmonik problemler hakkında kullanıcılar iyi aydınlatılmalı, yüksek güçteki kullanıcıların filtre kullanması teşvik edilmelidir. Harmonik bileşenler etkisiyle tesis de meydana gelen arızalar sonucu ortaya çıkan üretim kayıpların ekonomik analizleri de yapılarak filtre kullanımının her ne kadar kurulum maliyetleri de olsa uzun vadede tesisleri ekonomik olarak da kâra geçirdiği konusunda kullanıcılar bilinçlendirilmelidir.

Son zamanlarda dünyada ve ülkemizde de her geçen gün yaygınlaşmaya başlayan elektrikli araç kullanımı elektrik şebekelerinde yüklerin artışına sebep olmaktadır. Elektrikli araçların şarj istasyonları tasarlanırken harmonik bileşenlerin etkileri hesaba katılmalı elektrik şebekelerinde meydana gelecek ekstra yük artışları sebebiyle ortaya çıkabilecek elektrik güç kalitesi problemleri iyi analiz edilmelidir. Kurulacak olan elektrikli araç şarj istasyonlarının kurulu gücüne göre elektrik şebekelerinin güç artışları ve iyileştirilmeleri yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Sucu, Ö., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-19 (2003).
2. Başman, F., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonik ve Filtreleme”, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Sakarya, 2-46 (2006).
3. Özkol, S., “Orta Gerilim Şebekelerinde Kısa Süreli Gerilim Düşümlerine Karşı Önlemler” Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 6-10 (2019)
4. Mantaş, C. A., Yalman, Y., Tekşut, B. Ve Bayındır, K., Ç. “Türkiye Elektrik İletim Şebekesinde Güç Kalitesi Parametrelerinin Yönetmelik ve Standartlar Işığında Yıllara Göre Değerlendirilmesi”, *Güç Sistemleri Konferansı*, Ankara, 121-123 (2003).
5. Efe, S., B., “Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Malatya, 2 (2006).
6. Dandan, T., “Güç Sistemlerinde Harmonik Harmoniklerin Etkisi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sakarya, 130 (2003).
7. Baş, Z., “Güç Sistemlerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmonik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 19 (2014).
8. Şenyurt, Ö., “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Yüksek Lisans Semineri, *Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 19-24 (2005).
9. Bilge, M., “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sütçü İmam Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, 5 (2008).
10. Arifoğlu, U., “Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi”, İstanbul, 305-381 (2002).
11. Ay, S., “Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı”, *Kaynak Elektrik Dergisi*, Malatya, 81-88 (1996).
12. Grady, W., M., and Santosa, S., “Understanding Power System Harmonics”, USA, 37-44 (2001).

13. Demircioğlu, E., H., “Sinüsoidal Olmayan Şartlarda Transformatör Yükleme Kapasitesini Maksimize Etmek İçin Pasif Harmonik Filtre Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 3 (2018).
14. Kürker, F., Taşaltın, R., “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Adıyaman, 21-38 (2016).
15. Şahin, M., Oğuz, Y., Tuğcu H., Z., “Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi”, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Erzincan, 212 (2014).
16. Kürker F., “Lineer Olmayan Yüklerin Sebep Olduğu Harmoniklerin ve Fazlar Arası Güç Dengesizliğinin Nötr Akımına Etkisi” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Iğdır, 1459
17. Yıldız, Ş., N., “Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Elektrik Enerjisinde Kalitenin Yükseltilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 22-23 (2006).
18. Demirtaş, M., “Güç Elektronik Devrelerinde Harmonikler ve Filtreler”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 2 (1996).
19. Korurek, M., Yazgan, E., “Tıp Elektronik”, İstanbul, 55 (1996).
20. Tutkun N., Şimşir, M., “SDGM Gerilim Dalga Şeklindeki Toplam Harmonik Distorsiyon Miktarının Genetik Optimizasyon Tekniği ile Azaltılması”, *Enerji Verimliliği Kongresi*, 10-14 (2007).
21. Con, İ., “Medaya Sektöründe Elektrik Enerji Kalitesinin Harmonik Yönünden İncelenmesi ve Çözüm Önerileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 29-51 (2010).
22. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, "Elektrik Şebeke Yönetmeliği", <https://www.epdk.gov.tr> (2022).
23. Şerbetçi, M., B., “Harmonik Problemi Olan Tesislerde Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 37-38 (2019).
24. İlğın, M., “Reaktif Gücün ve Harmoniklerin Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 50-55 (2019).
25. Tekev, S., “Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin ve Araharmiklerin Bilgisayar Destekli Modellemesi ve Simülasyonu ”, Yüksek Lisans Tezi, *Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Bitlis, 34-38 (2021).

26. Koçak, Ç., “Doğrusal Olmayan Yükleri Besleyen Rüzgar Türbinlerinde Harmoniklerin Filtrelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 35-36 (2018).
27. Rüstemli S., Cengiz M.S., Dinçer F., “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu”, **Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, Zonguldak, 32 (2013)
28. Kürker, F., “Enerji Sistemlerinde Harmonik Analizi ve Harmonik Azaltma Teknikleri”, Doktora Tezi, **Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Şanlıurfa, 96-97 (2017).
29. El-Habrouk, M., Darwish, K., M., Metha, P., “Active power filters: A review, Electric Power Applications”, **IEE Proceedings**, 403-413 (2000).
30. Li, D., Tian, J., “A Novel Active Power Filter for the Voltage-Source Type Harmonic Source, Electrical Machines and Systems”, **International Conference**, Wuhan, 2077-2080 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Ümit GÖK ilk öğrenimini Zonguldak'ta lise öğrenimini ise Karabük 75. Yıl Anadolu Lisesinde tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümüne başladı ve 2015 yılında mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2023 yılında tamamladı. Özel sektörde çeşitli firmalarda bakım mühendisliği yaptı. 2018 yılında Karabük Gençlik ve Spor İl Müdürlüğünde göreve başladı ve halen görevini sürdürmektedir.