

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLERİN VE ARAHARMONİKLERİN BİLGİSAYAR
DESTEKLİ MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Sinan TEKEV

MAYIS 2021

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLERİN VE ARAHARMONİKLERİN BİLGİSAYAR
DESTEKLİ MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Hazırlayan
Sinan TEKEV

Danışman
Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Doç. Dr. Yakup ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Serhat Berat EFE

MAYIS 2021

ONAY

Sinan TEKEV tarafından hazırlanan “**Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin ve Araharmiklerin Bilgisayar Destekli Modellemesi ve Simülasyonu**” adlı tez çalışması 17/05/2021 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

(Danışman)

Doç. Dr. Yakup ŞAHİN

(Üye)

Dr. Öğr. Üyesi Serhat Berat EFE

(Üye)

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../2021 gün ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN
Enstitü Müdürü

BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYAN

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin ve Araharmiklerin Bilgisayar Destekli Modellemesi ve Simülasyonu**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 17/05/2021

Sinan TEKEV

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLERİN VE ARAHARMONİKLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Sinan TEKEV

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

Mayıs 2021, 78 sayfa

Elektrik enerjisinin talebinde meydana gelen artış ile birlikte, daha güvenilir ve daha kaliteli enerjiye ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu kavram elektrik mühendisliği alanında “güç kalitesi” başlığı ile yerini almıştır. Günümüzde sanayide kullanılan güç elektroniği elemanları, transformatörler, ark fırınları, konverterler vb. harmonik yayan elemanlar güç kalitesinin bozulmasına sebep olmuş ve sonuç olarak da harmoniklerden kurtulma yollarına bizi sevk etmiştir. Kaliteli elektrik enerjisinin sağlanabilmesi için enerjinin devamlılığı, gerilimin ve frekansın stabillliği, güç faktörünün 1’e yakınlığı, faz gerilimleri dengesi ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belli değerlerde kalması gibi bazı kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılan bu tez çalışmasında, güç sistemindeki harmonik ve araharmoniklerin analizi yapılabilmesi için ve sistemde oluşan etkinin görülebilmesi amacı ile MATLAB/Simulink programında seri aktif güç filtresi, farklı nonlinear yüklerle karşı modüle edilip simülasyonu yapılmıştır. Sistemdeki harmonikler ve araharmoniklerin yok edilmesinin ve filtrelemeye karşı vermiş oldukları tepkinin görülebilmesi için FFT analiz programı ile sonuçlar gösterilmiştir. Nonlinear yükleri olan güç sistemindeki harmonik ve araharmoniklerin filtrelemeden önce ve filtrelemeden sonraki oluşturduğu sonuçlar analiz edilmiş ve incelenmiştir. İnceleme sonucunda alınabilecek önlemler ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Güç Sistemleri, Harmonikler, Araharmonikler, Filtreleme

ABSTRACT

COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF HARMONICS AND INTERHARMONICS IN POWER SYSTEMS

Sinan TEKEV

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate Education Institute
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

May 2021, 78 pages

With the increasing demand for electrical energy, the need for more reliable and quality energy has started. This concept has taken its place in the field of electrical engineering with the title of "power quality". Today, harmonic emitting elements such as power electronics, transformers, arc furnaces and converters used in industry have caused the deterioration of power quality and as a result, they have led us to get rid of harmonics. In order to provide quality electrical energy, some criteria such as continuity of energy, stability of voltage and frequency, proximity of power factor to 1, balance of phase voltages and remaining harmonic amounts in voltage should be taken into consideration.

In this thesis study, in order to analyze the harmonics and interharmonics in the power system and to see the effect on the system, the serial active power filter was modulated and simulated against different nonlinear loads in the MATLAB/Simulink program. In order to eliminate the harmonics and interharmonics in the system and to see their response to filtering, the results are shown with the FFT analysis program. The results of harmonics and interharmonics in the power system with nonlinear loads before and after filtering have been analyzed and examined. As a result of the examination, suggestions were made regarding the measures to be taken.

Keywords: Power Systems, Harmonics, Interharmonics, Filtering

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince beni yönlendiren ve yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı sayın Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca katkılarından dolayı tüm Anabilim Dalı Öğretim üyelerine de teşekkür ederim. Yetişmemde en büyük pay sahibi olan, hayatım boyunca göstermiş oldukları sabır ve fedakarlıkları için aileme teşekkür etmeyi bir vazife olarak görüyorum.



ÖNSÖZ

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç elektriğin bulunmasından itibaren sürekli artış yaşamış olup yaşam kalitesinin sürekli yükseliyor olması, sürekli teknolojinin ilerlemesi elektrik enerjisine olan talebin vazgeçilemez hale gelmesine neden olmuştur. Nitekim ülkelerin gelişmişlik düzeyini artan teknoloji kullanımına paralel olarak bir parçasını yansıtan birey başına tüketilen enerji miktarı olmuştur. Bu arz-talep yükselişi, enerjinin daha güvenilir ve daha kaliteli olması yönünde bir ihtiyaç doğurmuştur. Bu konu, “güç kalitesi” olarak ismini almış olup üzerine yapıla gelen çalışmalarla önemini korumuş olup kendisinden söz ettirmiştir.

Güvenli ve kaliteli elektrik enerjisinin sağlanabilmesi için; enerjinin devamlılığı, gerilim ve frekans stabilliği, güç faktörünün 1’e yakınlığı, faz gerilim dengesi ve lineer olmayan yüklerden meydana gelen harmonik miktarlarının istenen seviyelerde kalması gibi bir takım sorunların göz önüne alınıp çözülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Mevcut durumda endüstriyel ortamda bulunan güç elektroniği elemanları, transformatörler, motorlar, ark fırınları, dönüştürücüler vb. nonlinear yüklerden meydana gelen harmonikler güç kalitesini düşürür. Bu sorunlar bizi harmoniklerden ve araharmoniklerden kurtulmak için detaylı bir analiz yapmaya yönlendirmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında bir güç sistemindeki farklı tiplerde olan nonlinear yükler için harmonikler ve araharmonikler kıyaslanıp incelenmiştir. Alınabilecek önlemler sunulmuştur. Güç sisteminde harmonik ve araharmonikteki meydana gelen sonucu görmek için MATLAB/Simulink programıyla modüle edilip, simülasyonu yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, farklı tip yüke sahip güç sistemi üzerindeki harmonik ve araharmoniklerin sonuçlarının analiz edilip neler yapılabilirliğinin incelenmesidir. Nitekim sadece güç elektroniği cihazları, dönüştürücüler ve yüksek güç indüksiyonu motorlar gibi harmonik kaynaklı yüklere bakıp harmoniklerin analizinin yapılması, güçteki akım ve gerilimin ideal dalga şeklinin bozulmasındaki etkilerinin incelenmesi için yeterli olmayacağından dolayı farklı yüklerdeki güç sistemi için detaylı bir analiz yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	i
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ixi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ixii
SİMGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi	7
1.2. Kaliteli Elektrik Enerjisi	8
1.3. Harmoniklerin Tanımlamaları ve Analizi	8
1.3.1. Harmonikli Sistemlerde Tanımlamalar	9
1.3.2. Devre Büyüklüklerinin Tanımı	9
1.3.3. Harmonikli Büyüklüklerin Tanımı	11
1.3.4.1. Toplam Harmonik Distorsiyonu	11
1.3.4.2. Distorsiyon Faktörü	12
1.3.4.3. Tepe Faktörü (Crest factor, CF).....	12
1.3.4.4. K-Faktörü.....	12
1.3.4.5. Harmonik Faktörü.....	12
1.3.4.6. Toplam Talep Distorsiyonu	13
1.3.5. Harmoniklerin Analizi	13
1.3.6. Fourier Dönüşümü	13
1.3.7. Ayrık Fourier Dönüşümü.....	14
1.3.7.1. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT).....	14
1.3.8. Fourier Serilerinin İfade Biçimleri	15
1.4. Harmoniklerin Kaynakları ve Etkileri	16
1.4.1. Harmonik Kaynakları	16
1.4.1.1. Tek Fazlı Yükler	16
1.4.1.2. Anahtarlama Güç Kaynakları (Switched Mode Power Supplies: SMPS).....	16

1.4.1.3. Tek Fazlı UPS Üniteleri.....	17
1.4.1.4. Flouresan Aydınlatma Balastlar.....	17
1.4.1.5. Üç Fazlı Yükler.....	18
1.4.1.6. Başlıca Harmonik Kaynakları.....	18
1.4.1.7. Konverterler	19
1.4.1.8. Transformatörler	20
1.4.1.9. Generatörler	20
1.4.1.10. Ark Fırınları	20
1.4.1.11. Gaz Deşarjı Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları.....	21
1.4.1.12. Statik VAR kompanzatörler.....	21
1.4.1.13. Fotovoltaik sistemler.....	21
1.4.1.14. Bilgisayarlar.....	21
1.4.1.15. Elektronik Balastlar	22
1.5. Harmoniklerin Etkileri	22
1.5.1. Tesisat İçindeki Harmonik Problemler	24
1.5.1.1. Harmonik Akımların Neden Olduğu Problemler.....	25
1.5.1.2. Harmonik Gerilimlerin Yol Açtığı Problemler.....	27
1.6. Harmoniklerin Filtrelenmesi.....	29
1.6.1. Pasif Filtreler	31
1.6.2. Seri Pasif Filtreler	31
1.6.3. Parelel (Şönt) Pasif Filtreler.....	32
1.6.3.1. Tek Ayarlı Filtreler	33
1.6.3.2. Çift Ayarlı Filtre	36
1.6.3.3. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler	36
1.6.4. Aktif Filtreler	38
1.6.4.1. Parelel Aktif Güç Filtresi	40
1.6.4.2. Seri Aktif Güç Filtresi.....	40
1.6.4.3. Hibrit Aktif Güç Filtresi	41
1.6.4.4. Aktif Güç Filtrelerini Kontrol Prensibine Göre Sınıflandırma	42
1.6.5. Aktif güç filtre ile pasif güç filtresi karşılaştırılması	43
2. MATERYAL VE YÖNTEM	45
2.1. Modellemesi Yapılan Sistem	45
2.2. MATLAB/Simulink.....	45

2.3. Seri Aktif Güç Filtresi Blok Şeması	45
2.4. Nonlineer Yükteki Parametre Seçimi	46
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	52
3.1. Örnek Sistem Modellemesi	52
3.2. Seri Aktif Güç Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	53
3.2.1. Endüktif Yükte Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	53
3.2.2. Kapasitif Yükte Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	56
3.3. Seri Aktif Güç Filtreli Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	59
3.3.1. Endüktif Yükte Filtreli Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	59
3.3.2. Kapasitif Yükte Filtreli Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar	62
3.4. Sistem Çalışma Esnasındaki Harmonik ve Araharmoliklerin Tespiti ve Eliminasyonu	65
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
5. KAYNAKLAR	73
EKLER	77
ÖZGEÇMİŞ	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Harmoniklerin etkileri ve izin verilen sınırları	29
1.2. Pasif ve aktif güç filtre karşılaştırılması	44
3.1. Sistem module edilirken SAGF parametreleri.....	52
3.2. Filtreden önceki endüktif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi	66
3.3. Filtreden sonraki endüktif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi	67
3.4. Filtreden önceki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi.....	67
3.5. Filtreden sonraki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi	68
3.6. Farklı yüklere karşı sistemin Gerilim ve THD değerleri	68
3.7. Endüktif yükün SAGF'a karşı vermiş olduğu sonuç değerleri	69
3.8. Kapasitif yükün SAGF'a karşı vermiş olduğu sonuç değerleri.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
1.1. A, B, C fazlarına ait saf sinüs biçimli gerilim işareti.....	7
1.2. Harmoniksiz ve harmonikli V gerilimi.....	8
1.3. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi.....	9
1.4. Harmonik bileşen içeren akım işareti	10
1.5. Nonlineer olmayan yükler ile harmonik kaynakları	19
1.6. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin akım ve harmonik spektrumu	22
1.7. Lineer ve nonlineer yüklerden sonraki akım ve gerilim işareti	24
1.8. Nötr iletkenindeki 3.harmonik akımları	25
1.9. Çeşitli harmonik bileşenlerin gösterildiği işaret.....	30
1.10. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece.....	31
1.11. Bir devrede seri filtrenin kullanımı	32
1.12. Bir devrede paralel filtrenin kullanımı	33
1.13. Band geçiren filtre (Tek ayarlı filtre)	33
1.14. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece, (d) C Tipi	36
1.15. ω açısız frekansının fonksiyonu olarak X_L , X_C reaktansları ve Z 'nin değişimi	37
1.16. Aktif güç filtresine ait blok şeması.....	39
1.17. Aktif güç filtre çalışma prensibi	39
1.18. Paralel aktif güç filtresi.....	40
1.19. Seri aktif güç filtresi	41
1.20. Hibrit aktif güç filtresi	42
1.21. Açık çevrim aktif filtre kontrol sistemi	43
1.22. Kapalı çevrim aktif filtre kontrol sistemi	43
2.1. Seri aktif güç filtre tetikleme blok şeması.....	46
2.2. Seri aktif güç filtre İç yapı blok şeması.....	46
2.3. Güç Dörtüzlüsü.....	48
2.4. 3 fazlı aktif güç filtresi temel kontrol blokları.....	50
2.5. Nonlineer endüktif yük Matlab/Simulink Şeması	50
2.6. Nonlineer kapasitif yük Matlab/Simulink Şeması.....	51
3.1. Güç Sistemi Matlab/Simulink Şeması	53

SEKİL**Sayfa**

3.2. Nonlinearer endüktif yüklü filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması.....	54
3.3. Endüktif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri	54
3.4. Endüktif yüklü filtresiz sistemin FFT sistem genlik analiz diyagramı.....	55
3.5. Endüktif yüklü filtresiz sistemin FFT sistem genlik spektrumu.....	56
3.6. Nonlinearer kapasitif yüklü filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması	57
3.7. Kapasitif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri	57
3.8. Kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistem genlik analiz diyagramı	58
3.9. Kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistem genlik spektrumu.....	59
3.10. SAGF filtreli endüktif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması.....	60
3.11. Endüktif yüklü filtreli sisteme ait gerilim dalga verileri	60
3.12. Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik analiz diyagramı.....	61
3.13. Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik spektrumu.....	62
3.14. SAGF_filtreli kapasitif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması	63
3.15. Kapasitif yüklü filtreli sisteme ait gerilim dalga verileri.....	63
3.16. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik analiz diyagramı	64
3.17. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik spektrumu	64
3.18. Farklı yükteki güç sistemindeki akım dalga verileri	65

SİMGELER DİZİNİ

n	Harmonik bileşen
k	Herhangi pozitif tamsayı
p	Darbe sayısı
t	Zaman
I_1	Temel Bileşen Akımı
I_n	Harmonik Bileşen Akımı
V_1	Temel Bileşen Gerilimi
V_n	Harmonik Bileşen Gerilimi
THD_I	Akım İçin Toplam Harmonik Distorsiyon
THD_V	Gerilim İçin İçin Toplam Harmonik Distorsiyon
h	Harmonik derecesi
X_C	Kapasitif Reaktans
X_L	Endüktif Reaktans
R	Direnç, Ohmik Reaktans
Q_C	Kapasitör Büyüklüğü
Q	Kalite Faktörü
ω	Açısal frekans
f	Frekans
L	Endüktans
C	Kapasitans
X_n	Karakteristik Reaktans
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
D	Distorsiyon Gücü

KISALTMALAR DİZİNİ

SMPS	Anahtarlanabilir Güç Kaynakları
CFL	Kompakt Flouresan Lamba
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı
HVDC	Doğru Akım ile Enerji Nakli
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
CAD/CAM	Terminallerinde Hafızaların Silinmesi
RCCB	Artık Miknatısiyet Akım Devre Kesicileri
MCB	Minyatür Devre Kesicileri
PFC	Güç Faktörü Düzeltme
EMI	Elektromanyetik Gürültü, Bozucu Etki
FHT	Hızlı Hartley Dönüşümü
AGF	Aktif Güç Filtresi
SAGF	Seri Aktif Güç Filtresi
PAGF	Paralel Aktif Güç Filtresi
PPF	Paralel Pasif Güç Filtresi
PAGS	Paralel Aktif Güç Süzgeç
PPS	Paralel Pasif Süzgeç
SGDA	Sinüzoidal Darbe Genişlik Ayarı
DFT	Ayrık Fourier Dönüşüm
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
DF	Distorsiyon Faktörü
CF	Tepe Faktörü

1. GİRİŞ

Güç sistemlerindeki doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması sonucu güç sistemleri harmoniği alanına ilgiyi artırmıştır. Doğrusal olmayan yükler sinüzoidal kaynak tarafından beslenir. Öte yandan, çekilen akımlar harmonikler ihtiva etmekte olup, harmonikler aşırı ısınmalara ve izolasyon bozulmalarına yol açabilmektedir. Harmonik rezonansı, sistemde son derece büyük sorunlara neden olabilir. Bu sorunların tespit edilmesi bakımından, güç sistemlerinin modellenmesi ve analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır [1].

Daha güvenli ve yüksek kaliteli elektrik enerjisi için sağlanması lazım olan bu gereklilikler, elektrik enerjisinin üretiminde, iletiminde ve dağıtımında, muhakkak dikkate alınmalıdır. Bir elektrik güç sisteminin, güvenilir ve arzu edilebilir biçimde faaliyet gösterebilmesi adına, sistemin tasarım ve işletim aşamalarında göz önünde bulundurulması gereken bir takım etkenler söz konusudur. Güç kalitesinde belirleyici olan parametrelerden nonlinear karakteristikli elemanların meydana getirdiği harmonikler de, bu etkenlerden biridir [2].

Harmonikler, üretilen enerjinin kalitesinde önemli bir etkidir. Akım ve gerilim dalga biçiminin sinüs dalga biçiminden uzaklaşması şeklinde tanımlanabilecek olan harmonikler, nonlinear elemana sinüzoidal bir kaynağın uygulanması yoluyla ya da nonsinüzoidal bir kaynaktan beslenen lineer veya nonlinear elemanlar tarafından oluşturulur [3].

Yapılan bu tez çalışmasında farklı tipte yüklere sahip bir güç sistemi için harmoniklerin ve araharmoniklerin kıyaslanıp incelenmesi yapılmış olup alınabilecek önlemler planlanmıştır. Güç sisteminde meydana gelen sonucu görmek için ve harmonik ve araharmoniğin gösterilebilmesi için MATLAB/Simulink programıyla modüle edilip, simülasyonu yapılarak belirtilmiştir. Bu çalışmada amaç, güç sistemi üzerindeki harmonik ve araharmoniğin sonuçlarının analiz edilip neler yapılabilirliğinin incelenerek ilgili önerilerde bulunulmasıdır.

Güç Kalitesi için yapılan harmonik analiz çalışmalarının yaygınlaşması ile birlikte literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Rüstemli vd. [4] Harmonikleri azaltmanın veya yok etmenin en önemli ve faydalı yöntemi harmonik filtreler kullanmaktır. Çalışmalarında Türkiye'nin doğusunda yer alan Van şehrinde bulunan iki farklı fabrikada, Zera MT310'un güç analizörü yardımıyla ölçümleri gerçekleştirilen (harmonikler, anlık elektriksel değerler, akım ve gerilim dalga şekilleri) gibi çeşitli parametrelerin farklı tarihlerde olmak üzere detaylı bir incelemesi yapılmıştır. Bu ölçümler ile bazı güç eksiklikleri tespit edilip incelenmiştir. Bunun için fabrikalarda kullanılmak üzere Matlab/Simulink yazılımı yardımıyla tek ayarlı pasif filtre tasarlaması yapılmıştır.

Rüstemli vd. [5] bu çalışmada, pasif filtre sisteminin yapısı ve uygulama şekilleri hakkında bilgiler verilmiştir. Enerjide harmoniklerin filtrelemesinde kullanılan (endüktans bağlı kompanzasyon sistemi) sistemleri verilmiştir. Dağıtım sisteminin çeşitli noktalarında harmonik analizörü Simplorer Simulation Center 6.0 (SSC 6.0) programı ile ölçüm yapılmıştır. Enerji sisteminin güç elektroniği uygulamalarında başarılı sonuçları elde edilmiştir. Simülasyonda bu sistem üzerinde pasif filtreleme uygulanarak, filtrenin bu sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar üzerinde analizler yapılmıştır.

Efe [6] Elektrik güç sistemlerinde ve endüstriyel ortamlardaki güç kalitesinin bozunumunda en büyük paya sahip harmonikler incelenmiştir. PSPICE ve MATLAB programlarından yararlanılarak tasarımları yapılan pasif filtrenin 6-darbeli güç elektroniği çeviricisi üzerindeki yine aynı platformlar altında oluşturulan aktif güç filtrenin 12-darbeli güç elektroniği çeviricisi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Efe [7] Harmoniklerle ilgili tanımlamalar yapılarak, sistem ile ilgili bilgi verilip nasıl ve neden oluştuklarını, elektrik enerjisi, güç sistemleri üzerindeki etkilerini ve filtrelemede hangi yöntemlerin kullanıldığı incelenmiştir. Sonrasında, örnek olarak bir elektrik enerji tesisi MATLAB/Simulink programı kullanılarak modellenmiş, pasif filtrelerin sistem üzerindeki etkisinin analizi yapılmıştır.

Efe vd. [8] yaptıkları çalışmada halihazırda kurulu olan gerçek yatay eksenli rüzgar türbiniyle ölçümü alınan veriler kullanılarak analiz çalışması yapılmıştır. Harmonik bozulmadaki bu değerlerden çeşitli frekanslar değerlerinde seviyeler belirlenmiştir. İnceleme sonuçlarını tartışılır ve kaliteli bir enerji üretimi için olası çözümleriyle detaylandırılıp sunulmuştur.

Rüstemli vd. [9] ZERA MT 310 sinyal analizörü kullanılarak güç kayıplarındaki parametreleri (gerilim dalga şekilleri, harmonikler) tespit edilmiştir. Güçteki bu istenmeyen kayıpların sebeplerini araştırılmıştır. Simplorer 6.0 program ile seri aktif filtrenin modellemesi yapılarak incelenmiştir. Bununla birlikte güçteki gerilim azalımı ve kayıplarının da aynı program ile analizi yapılmıştır.

Tabak vd. [10] kalitenin elektrik enerjisi sistemleri bakımından önemi anlatılmıştır. Bununla ilişkili olarak, enerji kalitesi tanımlanmıştır. Enerjinin kalitesi için önerilerde bulunarak, kalite üzerinde bozucu rol oynayan etkileri açıklanmıştır. Bu etkilerin ortadan kaldırılması adına yapılması gerekenler anlatılmıştır.

Güven vd. [11] Yalova Üniversitesi merkez kampüsünde tüketilen elektrik enerjisinin kalitesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, merkez kampüs'ün çeşitli noktalarındaki güç dağıtım merkezlerine güç kalitesi analizörü bağlanarak, güç kalitesi analizörüyle sisteme ait gerilim, akım, güç ve frekans gibi parametreler ve bunların yanında sistemde gerçekleşen güç kalitesi

olayları ölçülmüş, ardından dijital ortama aktararak incelenmiştir. Harmonik ölçümleri sonucunda ulaşılan veriler doğrultusunda güç kalitesi sorunlarının nedenleri araştırılarak çözüm önerilerinde bulunulmuştur.

Kesler vd. [12] Endüstriyel uygulamalarda, otomotiv sektöründe ve laboratuvar prototip geliştirmelerde oldukça sık kullanılan, düşük maliyetli yeni bir Sayısal İşaret İşlemci (DSP-Digital Signal Processor) uygulama geliştirme kartı tasarımı hakkında bilgi verilmiş olup hızlı Hartley dönüşümü (FHT-Fast Hartley Transform) yöntemi kullanılarak güç sistemlerinde harmonik analizin nasıl gerçekleştirileceği araştırılmıştır.

Dağ vd. [13] çalışmalarında öncelikli olarak 2 uçlu empedans tabanlı arıza yer tespiti yöntemini örnekleyerek harmonik kaynak yeri tespit etme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda, harmonik kaynağı ile ölçüm alınan noktalardan biri arasındaki mesafe bir kıstas olarak kullanılmış ve bir harmonik kaynağın yeri tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında, empedans devreleri yaklaşımına dayalı bir harmonik kaynağın yerini tespit etme ve özgün ölçü aletlerini en verimli şekilde yerleştirme yöntemi (ÖEYY) geliştirilmiştir. 30-baralı IEEE test sistemiyle gerçekleştirilen Monte Carlo benzetimleri, harmonik empedansları değiştiğinde dahi bu yaklaşımın geçerliliği ve performansı doğrulanmaktadır.

Şahin [14] Harmonik kaynaklar, harmoniklerin güç sistemlerindeki etkileri ve harmoniklerin süzülmesine ilişkin bilgi vermiştir. Harmonik analizi için geliştirilmiş olan algoritma ve akış diyagramı ile kullanılan yazılım açıklanmıştır. Bu algoritma ve yazılım örneklenmiş gerilim ve akım değerleri üzerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak 3 faza ait gerilim ve akım için harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları, THD, DF, P, Q, S, D ve CF gibi bir harmonik analizi için gereken elektriksel parametreler ile tanımlar hesaplanarak, ihtiyaç duyulan grafikler çizdirmiştir. Sistemde, AC gerilim dalgalanması düzenlenmiş ve üretilen güç ile yük arasındaki denge yönetimi sağlanmıştır. Tasarlanan sistem simülasyon ortamında analiz edilmiştir.

Şahin [15] çalışmasında harmoniklerin yeraltı güç kabloları üzerine etkilerinin tespit edilmesi ve harmonik etkilerinin düşürülmesi adına önerilerde bulunmuştur. Bu noktada bir OG sistemde harmonik ölçümü yapılarak, elde edilen değerler doğrultusunda bir MATLAB/SIMULINK modeli oluşturulmuştur. Bu modelden elde edilen sonuçların analizi yapılmıştır. Modelde, ölçüm yapılan tesiste kullanılan kablo ile aynı kablo kullanılmıştır. Sonuç olarak sistemdeki harmoniklerin kablodaki kayıp gücü, buna bağlı olarak sıcaklığı arttırdığı görülmüştür. Bu sıcaklık artışlarının da kabloda ilave ömür kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Bu kayba uğramamak için kapasitenin azaltılması veya tesis şeklinin harmonikli ortam göz önüne alınarak tasarlanması önerilmiştir.

Aydemir [16] tek fazlı yarım köprü eviricide seçilmiş harmoniklerin azaltılması konusunu araştırmıştır. Çalışmayı temelde iki bölüm oluşturmuştur. İlk bölümde Walsh fonksiyonlarından yararlanarak hesaplanan tetikleme açılarının uygulandığı evirici modeli, Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuştur. Bunun dışında, kullanılan Walsh fonksiyonları yöntemi Sinüzoidal Darbe Genişlik Ayarı (SDGA) yöntemiyle de karşılaştırılmıştır.

Eroğlu [17] enerji kalitesine ilişkin problemlerle ilgili harmoniklerin temel bilgileri verilerek neden ve nasıl oluştuklarını, analiz yöntemlerini, elektrik enerji sistemlerindeki etkilerini, standartları ve filtreleme yöntemleri ele alınmıştır. Sonrasında bir elektrik dağıtım şebekesinde yapılan ölçümler incelenmiş ve harmoniklerin bu dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Analizinde Matlab/Simulink kullanılmıştır. Kontrolörün iyi performans gösterdiği ve aynı zamanda akünün ömrünü uzattığı belirtilmiştir.

Mutlu [18] DSP tabanlı, gerilim beslemeli PAGF gerçekleştirilmiş ve akım kontrolü için yüke adaptif histerezis band yöntemi sunulmuştur. PAGF Matlab/Simulink programı kullanılarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlarla, PAGF'nin performansı incelenmiştir.

Erişti [19] veri madenciliğinin kümeleme tekniklerinden k-means algoritması'nı kullanarak güç kalitesindeki harmonik bozulmaları analiz etmiştir. Harmonik veriler, elektrik dağıtım sistemine yerleştirilen bir güç kalitesi analizörü ile belli aralıklarla elde edilmiştir. Farklı seviyelerdeki harmonik bileşenleri için k-means kümeleme yaklaşımı uygulanmıştır. Algoritma çıkışında, harmonik verilerin zamansal değişim süreçleri ve bu süreçlerdeki harmonik değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda gerçekleştirilen kümeleme yaklaşımı ile, elektrik dağıtım sistemlerindeki olumsuz etkileri oluşturan harmoniklerin zamansal değişim süreçlerine ilişkin önemli bilgiler elde edilmiştir. Kurulu sistemin laboratuvar ölçeğinde olduğu ve yükseltilebilir olduğu belirtilmiştir.

Küçükilhan [20] fotovoltaik sistemle şebeke arasındaki senkronizasyon sürecinin ve fotovoltaik sistemdeki inverterden kaynaklanan harmonik etkisinin gözlemlenebilmesi adına MATLAB/Simulink'den yararlanarak şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem modellenmiştir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu çalışmayla, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin daha verimli biçimde faaliyet göstermesi, harmoniklerin minimuma indirilmesi ve fotovoltaik sistemle şebekenin beraber çalışma sürecinin simülasyon ortamında gösterilmesi amaçlanmıştır.

Keçecioğlu [21] bir GES'in şebekeye bağlandığı noktanın OG tarafından bir şebeke analizörü aracılığıyla ölçümünü gerçekleştirmiş ve elde edilen verileri harmonik bozulma ve fliker bakımından analiz etmiştir. Analiz neticesinde, şebekede mevcut olan tekil harmoniklerin sınır değerlerinin altında olduğu, akıma ait THB'nin belirli zamanlarda kısa süre için sınır değerlerinin üzerine çıktığı ve gerilime ait THB'nin gün boyunca sınır değerini aştığı

gözlemlenmiştir. Fliker şiddetinin ise genellikle sınır değerlerinin içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Germenç [22] elektrik güç sistemlerinde zaman içerisinde değişim gösteren sinyaller için temel frekans tespitiyle harmonik ve araharmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları kestirimini kapsayan, çok fonksiyonlu bir sistem yapısı geliştirmiştir. Bu sistem, basit ve açık bir yapıya sahip olup, başarımı artıracak müdahaleler ile harmonik bileşenlerinin yanında, bu bileşenlerin hangi zaman aralıklarında ve ne oranda aktif olduklarına dair bilgi verilmektedir.

Akçay [23] dengesiz yükler için seri aktif güç filtresinin tasarımı araştırılmıştır. SAGF'nin devrede aktif olduğu ve olmadığı durumlar özel olarak çalışılarak devrenin oluşturduğu THB verileri incelemiştir. Bu aktif yöntemin hedefi, oluşan harmoniğe eşit ölçüde ve zıt fazda harmonik gerilim üreterek harmoniğin yok edilmesidir. Histerezis bant kontrol yöntemi ile de anahtarlama devre elemanlarının kontrolü yapılmıştır.

Gezegin vd. [24] araştırdıkları makale çalışmasında; tepkin güç kompanzasyonu ve harmonik süzmede, pasif süzgeç, sade ve hibrit PAPS 'i simülasyon ile sonuçlanmıştır. Sade PAPS'nin PPS ile birleşimi neticesinde oluşan hibrit PAPS'lerin kVA oranı düşürülerek maliyetin azaltılması, güç kompanzasyonu ve harmoniklerin süzülmesindeki başarımları incelenmiştir.

Gencer vd. [25] güç sistemlerindeki aydınlatma aygıtlarından kaynaklanan harmonik bozulmaların ve çeşitli tipteki aydınlatma aygıtlarının tek tek ve bir arada yenilenebilir enerji sisteminin ekonomik analizini amaçlamışlardır. HOMER yazılımı kullanmaları durumunda yarattığı bozulmaları incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda, çalışma kapsamında, enerji analizörü aracılığıyla edinilen ölçüm sonuçlarına bakılarak lambaların modelleri EMTP/ATP programı ile oluşturulmuştur.

İnan vd. [26] çalışmalarında, dağıtım transformatörlerinin Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplarının harmonik olayına etkilerini tanımlayıp, nonlinear yük kompozisyonu ile bir OG/AG sistem içinde farklı durumlar için MATLAB/Simulink kullanarak modellenmiş ve bu etkilerin nasıl ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Kürker vd. [27] çalışmalarında, lazer torna tezgahı bulunan bir tesiste, CNC dik torna makinası bulunan bir tesiste ve endüksiyon eritme ocağı bulunan bir tesiste sisteme ait akım, gerilim, güç vb. parametreleri güç analizörü ile kaydetmişlerdir. Toplanan verileri dijital ortama aktararak güç analizini gerçekleştirmişlerdir. İlgili analizler neticesinde, akım ve gerilim harmonikleri incelenerek, akım ve gerilim harmoniklerinin sistemde ne ölçüde kayba yol açtığı hesaplanmıştır.

Bayrak [28] elektrik güç sistemlerinde gerçekleşen kısa devre, açma-kapama olayları ve alanları büyük yük değişimlerinin şebeke gerilimine etkileri ile özellikle son yıllarda sayıları ve kullanımları artan güç elektroniği devrelerinin şebeke akım ve geriliminde ortaya çıkan dalga şekli bozukluklarını, bilgisayar yardımı ile inceleyerek şebekede diğer tüketicilere olan etkilerini açıklamıştır. Öte yandan, söz konusu bozucu etkilerin enerji kalitesine olan etkisiyle standartlara uygunluğunu araştırmış, ilgili etkilerin minimuma indirgenmesi adına bir takım çözüm yöntemleri verilmiştir.

Yaşa [29] çalışmasında, bir 3 faz AC frekans konvertörünün oluşturduğu harmoniklerin frekans konvertörü yapısına ve filtreleme tipine göre nasıl değişiklik gösterdiği incelenmiştir. Farklı yük ve uygulama tiplerine bakılarak, akım harmonik bozulması (%THB_I) değerlerini karşılaştırmıştır.

Cengiz [30] çalışmasında harmoniklere ilişkin temel bilgilere yer vererek, harmoniklerin neden ve nasıl oluştuklarına, analiz yöntemlerine, elektrik enerji sistemlerine olan etkilerine, standartlara ve filtreleme yöntemlerine değinmiştir. Ardından bir elektrik dağıtım şebekesinde yapılan ölçümleri incelemiş ve harmoniklerin mevcut dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini yorumlayarak aktif filtre ile pasif filtre çözümleri simülasyon çalışmalarıyla karşılaştırmıştır. Farklı güç değerlerinde pasif filtre ve paralel aktif güç filtresi için Simplorer 6.0 programı kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bayhan vd. [31] güç sistemlerindeki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozuklukları, ayırık dalgacık dönüşümü yardımı ile tespit etmeye çalışmıştır. Harmonikler, çentik etkisi, gürültü, anlık olaylar gibi akım ve gerilimde yaşanan dalga şekli bozuklukları Matlab/Simulink kullanılarak tasarlanan çeşitli güç sistemlerinde benzetim tekniğiyle elde edilmiştir. Tasarlanan benzetim sistemleri aracılığıyla elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri sabit diskte saklanmış olup, Matlab'da hazırlanan yazılım aracılığıyla dalga şekli bozuklukları türlerine göre iki ya da üç'üncü seviyede db4 dalgacığı ile ayrıştırılmış ve analizi edilmiştir.

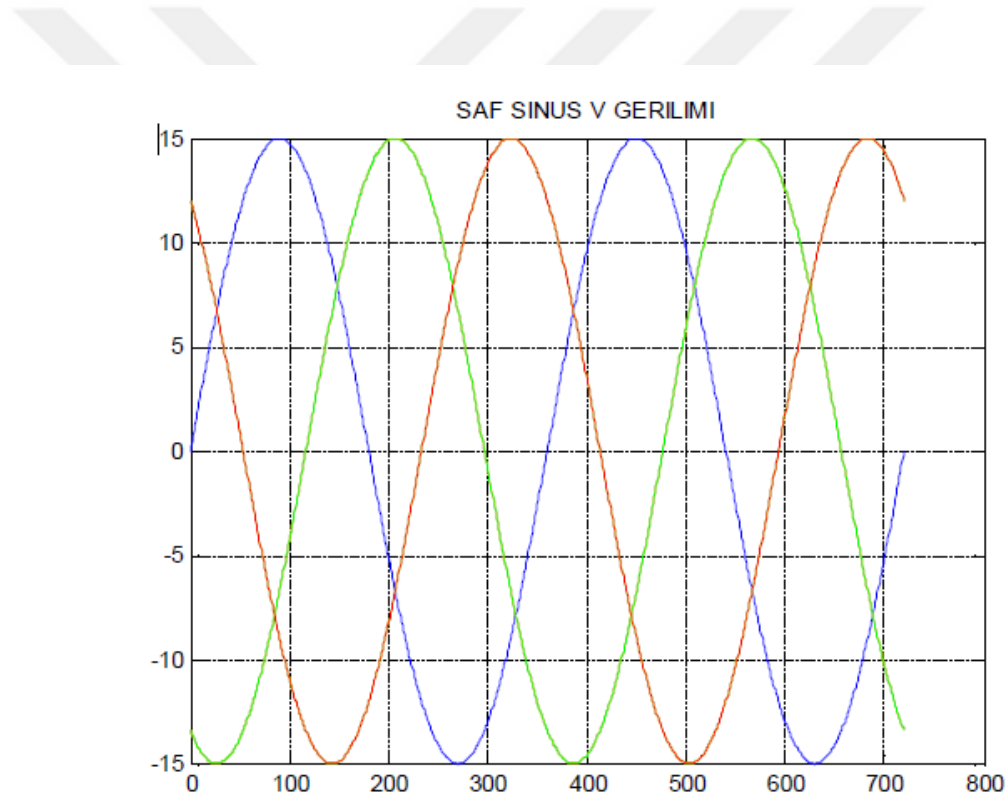
Kulu [32] tarafından yapılan çalışmada Fourier dönüşümü, Ayırık hartley dönüşümü, çoklu işaret sınıflandırması, eğim düşüm tabanlı adaptif filtreler gibi çeşitli yöntemleri araştırmış, matematiksel altyapıları irdelemiş, prensiplerine göre sınıflanmıştır. Sunulan yöntemler birleştirilerek, MATLAB programında harmonik kestirimi uygulaması oluşturmuştur. Ayrıca incelenen yöntemler, güç kalitesi parametrelerine göre test edilmiş ve performans değerlendirmesi yapmak amacıyla karşılaştırılmıştır.

Okuducu [33] elektrik güç kalitesine etki eden unsurları incelemiş, güç kalitesizliklerini sınıflandırmış, güç kalitesini tanımlamak ve boyutlandırmak için kullanılan formülasyonları tanıtmış ve güç kalitesizliğinin sistem üzerindeki olumsuz etkileri anlatmıştır. Bir Fabrikayı baz

olarak güç kalitesizliğine neden olan harmonikleri tespit etmiştir. MATLAB Simülasyon programı kullanarak tek ayarlı bir pasif filtre tasarlamış ve filtrenin etkilerini gözlemlemiştir. Daha kaliteli enerji için çözüm önerileri geliştirilmiştir.

1.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi

Elektrik enerjisi vazgeçilmez bir enerji kaynağı olup; elektriği üreten, ileten ve dağıtan kurum ve kuruluşların görevi; tüketicilere kesintisiz, ucuz ve kaliteli bir elektrik hizmeti ulaştırmaktır. Güç kalitesi kavramı ile sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüzoidal biçimli uç gerilimi amaçlanmaktadır. Şekil 1.1’de saf sinus biçimli gerilim ifadesinin A, B, C fazlarının gerilim işaretine yer verilmektedir.



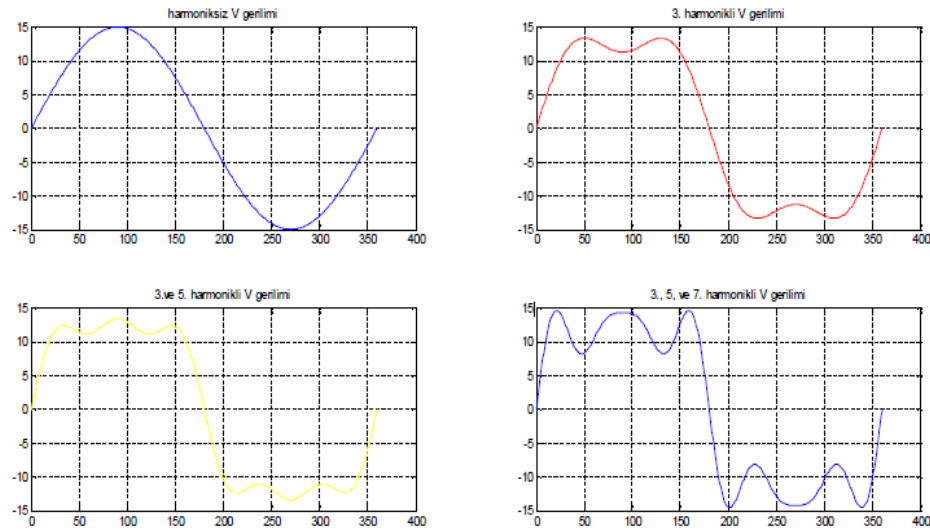
Şekil 1.1. A, B, C fazlarına ait saf sinüs biçimli gerilim işareti

Fakat bu tip enerji, uygulamada bazı zorlukları beraberinde getirebilmektedir. Güç sistemine bağlı kimi elemanlar ve bunların sebep olduğu olaylar nedeniyle tam sinüzoidal değişimden sapmalar yaşanabilmektedir. Tam sinüzoidalden sapma, çoğunlukla harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkmasıdır. Manyetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlikler, bu duruma yol açan etkenlerin başında gelmektedir.

1.2. Kaliteli Elektrik Enerjisi

Şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansın anma değerlerinin korunması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminde bulunmasıdır. Bu tanımın tersi olarak, gerilimin genliğinin değişmesi, kesintiler, frekans değişimleri, gerilimin doğru bileşen içermemesi, gerilim darbeleri, dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması, üç faz dengesizlikleri enerji kalitesizliği anlamına gelmektedir. Enerji kalitesi sıklıkla yük tarafından bozulmaktadır. V-I karakteristiği nonlineer yükler şebekeden sinüs olmayan akımlar çeker. Bu akımlar şebekede sinüs olmayan gerilim düşümlerine yol açarak besleme noktasındaki gerilimin dalga şeklinde bozukluğa sebep olur. Şebeke trafosunun doyuma girmesi, güç kaynaklarının şebekeye bağlanması veya yıldırım düşmesi yine bozucu etkiler arasında yer almaktadır.

Harmonikler, gerilim ve akım dalga biçiminin sinüs biçiminden uzaklaşması şeklinde tanımlanabilir. Güç elektroniği devreleri ve doyma/ark prensibiyle çalışan elektromekanik cihazlardan kaynaklanır. Şekil 1.2’de harmoniksiz ve harmonikli V gerilimi gösterilmiştir [34].

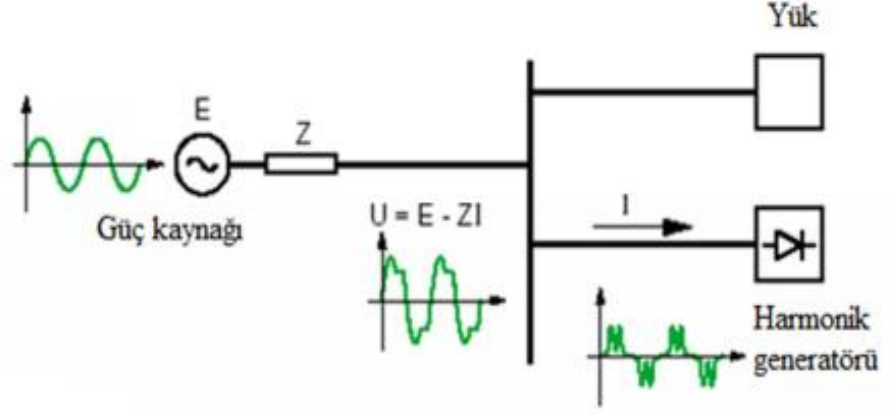


Şekil 1.2. Harmoniksiz ve harmonikli gerilimler

1.3. Harmoniklerin Analizi ve Tanımlamaları

Yarı iletken elemanların doğası gereği ve sanayide kullanılan bazı non-lineer yüklerin (ark fırınları, transformatör vb.) etkileriyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla beraber sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından

oluşmaktadır. Temel dalga haricindeki sinüzoidal dalgalar, “HARMONİK” olarak adlandırılır. Nonlineer bir yükün yol açtığı harmonik bozulma devresi şekil 1.3’de yer verilmiştir [37].



Şekil 1.3. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi

1.3.1. Harmonikli Sistemlerde Tanımlamalar

Güç sistemlerinde harmonik etkilerin gün geçtikçe artıyor olması; bu etkilerin asgari düzeye indirgenmesi ve sınıflandırılması bakımından rahatlık sağlaması için genel tanım büyüklüklerinin verilmesini ortaya çıkarmıştır.

1.3.2. Devre Büyüklüklerinin Tanımı

Harmonik bileşenleri içeren akım ve gerilimin ani değerleri,

$$\dot{I}(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.1)$$

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (1.2)$$

Şeklinde ifade edilir. Akım ve gerilimin n. harmonik için etkin değerleri sırasıyla

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

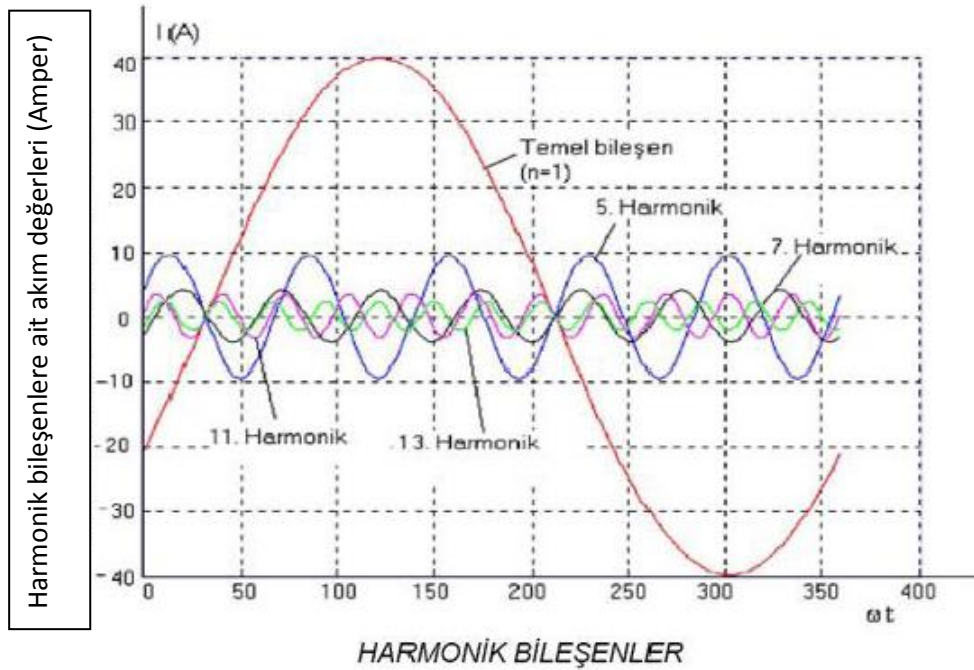
$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

ile belirlenir. Akım ve gerilimin etkin değerleri sırasıyla

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots I_n^2} \quad (1.5)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots V_n^2} \quad (1.6)$$

ifadeleri ile belirtilir. Yukarıda yer verilen eşitliklerde I_0 ve V_0 akım ve gerilimin doğru bileşeni, n değeri harmonik mertebesini I_{mn} ve V_{mn} , n . harmonik akım ve gerilimin tepe değerlerini ifade etmektedir. ϕ_n , n . harmonik akımının faz açısını, δ_n n . harmonik gerilimin faz açısını ifade eder. Harmonik bileşen içeren akım işareti şekil 1.4'de gösterilmiştir [36].



Şekil 1.4. Harmonik bileşen içeren akım işareti [36]

Böyle büyüklüklerin söz konusu olduğu devrede aktif güç ifadesi,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\delta_n - \phi_n) \quad (1.7)$$

İle reaktif güç ise

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin(\delta_n - \phi_n) \quad (1.8)$$

denklemleri ile tanımlanır. Görünür güç,

$$S=VI=\sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (1.9)$$

eşitliğiyle belirtilir.

Harmonikli güç sistemlerinde tanımlanan bir diğer büyüklük distorsiyon gücüdür.

$$S^2 = D^2 + P^2 + Q^2 \quad \text{ifadesinden distorsiyon gücü} \quad (1.10)$$

$$D=\sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.11)$$

olarak belirtilir.

1.3.3. Harmonikli Büyüklüklerin Tanımı

Bu büyüklükler enerji kalitesiyle ilgilidir. Değerlerinin düşük olduğu ölçüde, enerji tesisindeki akım ve gerilim değerleri sinüs eğrisine o ölçüde yakın olacaktır. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik söz konusu olmayacağından, yani harmoniklerin değerleri matematiksel ifade ile 0 olacağından dolayı, bu büyüklüklerin değerleri de 0'a eşit olacaktır.

1.3.4.1. Toplam Harmonik Distorsiyonu

Ana bileşene göre harmonik bileşenlerin seviyesinin tespit edilmesinde yararlanılır. Harmonik bozulmanın derecesini ifade eder. Hem gerilim, hem akım için geçerlidir. Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu,

$$THD_v = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.12)$$

eşitliği ile ifade edilir. Akım için toplam harmonik distorsiyonu

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.13)$$

şeklindedir.

1.3.4.2. Distorsiyon Faktörü

Gerilim ve akımın harmonik içermesi durumunda efektif değerlerinin tespit edilmesi amacıyla kullanılır. Bu faktörler;

$$DF_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.14)$$

$$DF_V = \frac{1}{V} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.15)$$

olarak ifade edilir.

1.3.4.3. Tepe Faktörü (Crest factor, CF)

CF, nonsinüzoidal işaretin tepe değeriyle temel bileşenin efektif değeri arasında bir değer alır. Harmonik bileşenlerin ortaya konmasını sağlar ve

$$CF = \frac{\text{dalganın tepe değeri}}{\text{dalganın etkin değeri}} \quad (1.16)$$

eşitliği ile ifade edilir.

1.3.4.4. K-Faktörü

Kuru tip transformatörlerin K faktörü, nonlinear yüklenen ve çoğunlukla 500 KVA'dan düşük transformatörlerde yüklenme kapasitesinin bir kıstasıdır. Bu faktör imalatçılar tarafından

$$K_{\text{faktörü}} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 (pu) n^2 \quad (1.17)$$

olarak ifade edilir. Burada I_n birim değer olarak transformatörün akım bileşenidir.

1.3.4.5. Harmonik Faktörü

Harmonik faktörü her harmonik bileşenin seviyesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Örneğin akım için,

$$HF_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.18)$$

olarak ifade edilir.

Burada;

I_n = n. harmonik akımına ait efektif değeri, I_1 akımının temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

1.3.4.6. Toplam Talep Distorsiyonu

Toplam talep distorsiyonu çekilen yük akımına ait distorsiyonun tespit edilmesinde kullanılır. Toplam talep distorsiyonu (TTD)

$$THD = \frac{(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2)^{1/2}}{I_L} \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada I_n harmonik akımını, I_L ise 12 ay süresince talep edilen azami akımların aritmetik ortalamasını gösterir.

1.3.5. Harmoniklerin Analizi

Harmoniklerin analizi, periyodik dalganın bir doğru bileşeniyle bir temel frekanslı saf sinüs dalgası ve frekansları farklı saf sinüs dalgaların toplamından oluştuğunu göstermektedir. Bu şekilde nonsinüzoidal dalgaların “harmonik spektrumu” tespit edilmeye çalışılır [35].

1.3.6. Fourier Dönüşümü

Bir $f(t)$ fonksiyonunun fourier dönüşümü,

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.20)$$

$$f(t) = F_{max} \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1.21)$$

eşitliği ile ifade edilir ve $F(w)$, ters fourier dönüşümü

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{-j\omega t} dt \quad (1.22)$$

olarak tanımlanır. Fourier dönüşümünün avantajı, zaman ve frekans domeninde fonksiyonu veya dalga biçimini incelemesidir. Herhangi bir periyodik nonsinüzoidal dalganın periyodu içerisinde

güç anahtarı veya güç diyotu iletimdedir. Genel olarak, anahtar iletimde iken bobinde biriken enerji, diyot iletimde iken çıkışa aktarılmaktadır. Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde yarı iletken güç elemanı olarak genellikle; yüksek güç ve düşük frekanslarda frekans spektrumunun saptanmasında, frekans domeni analizi algoritması, en çok ayrık fourier transformasyonu veya hızlı fourier transformasyonuna dayanılmaktadır.

1.3.7. Ayrık Fourier Dönüşümü

Frekans domeni spektrumu ve zaman domeni fonksiyonunun her ikisi de her periyotta N adet örnekleme ile periyodik olarak örneklendiğinde, (x) ve (y) eşitlikleri ayrık fourier dönüşüm (DFT) çifti olarak adlandırılmakta olup, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \quad (1.23)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \quad (1.24)$$

Bu noktada k, n=0,1,...,N-1, $\Delta\Omega=\frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T=\frac{T}{N}$ ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda daima elde edilebildiğinden, DFT harmonik ölçümlerinde sıklıkla başvurulur. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin, sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerin zaman domeni serisi olarak gösterilir [35].

1.3.7.1. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Hızlı Fourier Dönüşümü, Ayrık Fourier Dönüşümü'nü kolaylaştırmak için geliştirilmiş olup; $W=e^{\frac{-2j\pi}{N}}$ denklemi ile elde edilen $[W^{kn}]$ matrisindeki elemanların benzerliğinden faydalanılmaktadır. Hızlı Fourier transformunda, örnek sayılarının 2'nin tam katı olması gerekmektedir. Yani, dalga'nın periyodu 2'nin tam katı olduğunda kullanılabilir. Burada işlem sayısı ($N\log_2(N)$) mertebesine düşmektedir. Hızlı Fourier transformunun çözümünde matematiksel bir alitmadan yararlanılır. Söz konusu algoritmanın uygulanmasında takip edilecek sıra önem taşır. Her bir işle "kelebek" olarak adlandırılır ve bu işlemler özel entegre devreler yoluyla uygulanır. Bu transformlardan başka Chirp Z Transformu'ndan, Nyquist Frekansı'ndan ve pencere fonksiyonlarından faydalanılarak, örnekleme ve dönüşümler

yapılmaktadır. Yukarıdaki anlatılan algoritmalarla yararlanılarak paket programlar geliştirilmiştir [35].

1.3.8. Fourier Serilerinin İfade Biçimleri

Sinüzoidal olmayan periyodik bir işaretin fourier analizi sonrasında zaman domeni denklemi aşağıdakilerden herhangi biri ile gösterilebilir;

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (1.25)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (1.26)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nt + \phi_n) \quad (1.27)$$

Bu denklemlerde;

$n=1,2,3,\dots$ (pozitif tamsayı) harmonik mertebesi

t =bağımsız değişken, t yerine ωt de kullanılmaktadır.

A_0 =sabit terim

Diğer katsayılar fonksiyonun harmonik katsayıları denir.

$C_1 \sin(t + \omega t)$ terimi, $f(t)$ fonksiyonunun birinci harmoniği ya da temel dalga olarak adlandırılır (elektrik devrelerinin temel bileşeni). Bu durumda aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$C_1 = (A_1^2 + B_1^2)^{1/2} \quad (1.28)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{B_1}{A_1} \quad (1.29)$$

$$C_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2} \quad (1.30)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad (1.31)$$

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier serileri açılımının genel ifadesi şu şekildedir:

$$\begin{aligned} f(t) = & A_0 + A_1 \sin(t) + A_2 \sin(2t) + \dots + A_n \sin(nt) \\ & + B_1 \cos(t) + B_2 \cos(2t) + \dots + B_n \cos(nt) \end{aligned} \quad (1.32)$$

Buradaki katsayılar;

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (1.33)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nt) dt \quad (1.34)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (1.35)$$

eşitlikleri ile belirlenir.

1.4. Harmonik Kaynakları ve Etkileri

1.4.1. Harmonik Kaynakları

Harmonikler genel olarak lineer olmayan elemanların sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonik içeren akım ya da gerilimin sistemde dolaşması sinüzoidal dalganın bozulması demektir. Yani, sisteme harmonik yayılması ile güç kalitesi düşer ve devredeki elemanlar zarar görür. Bunun yanında, güç kalitesinde düşüş yaşanması tüketiciyi de olumsuz etkileyecektir. Harmonik oluşturan elemanlar kullanıldığı besleme durumuna göre tek fazlı ve üç fazlı olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir.

1.4.1.1. Tek Fazlı Yükler

1.4.1.2. Anahtarlanabilir Güç Kaynakları

Modern elektronik ünitelerinin birçoğunda anahtarlanabilir güç kaynaklarından (SMPS) yararlanılmaktadır. Modern elektronik ünitelerinde, eski ünitelerden farklı olarak, geleneksel ağırlıkların önemli ölçüde azaltılması yanında hemen hemen istenilen her formda imal edilebilmeleri bu ünitelerin avantajları olarak ifade edilebilir.

Bu sistemlerin dezavantajı ise; elektrik kaynağından sürekli akım çekmek yerine, darbeler halinde büyük miktarlarda yüksek frekans bileşenli, üçüncü ve beşinci harmonikler içeren akım çekilmesidir. Hatlarda ve nötr-toprak bağlantılarındaki yüksek frekans bileşenlerini

süzme k üzere besleme girişinde basit bir filtre kullanılmaktadır. Ancak, girişe geri dönen harmonik akımlara karşı bu filtrenin etkisi olmamaktadır [39].

1.4.1.3. Tek Fazlı UPS  niteleri

Anahtarlanabilir güç kaynaklarına (SMPS)  ok yakın özellikler taşımaktadır. Yakın zamanlarda, büyük g   kullanılan tesislerde ‘düzeltilmiş g   faktörü’ konusuna gittikçe artan bir ilgi gösterilmektedir. Yaklaşımın amacı; besleme yüküne direnç niteliği kazandırarak giriş akımını, sinüs eğrisi şekline ve uygulanan gerilim ile aynı faza getirmektir. Bu yaklaşım, girişe yerleştirilen bir filtre yardımı ile sinüs eğrisine yakın bir şekilde ve yüksek frekanslı üçgen dalga şeklinde akım elde edilerek gerçekleştirilmektedir. Bir hayli karmaşık olması nedeniyle bu yaklaşım, endüstriyel ve ticari tesislerin büyük bölümünde kullanılan nisbeten ucuz ünitelere henüz uygulanamamaktadır [39].

1.4.1.4. Flouresan Aydınlatma Balastlar

Elektronik aydınlatma balastları, verimliliklerinin daha yüksek olduğu düşünülerek son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektronik balastların verimliliği iyi kaliteli manyetik balasttan çok az daha yüksektir. Aslında, flouresan lambaların verimliliği kullanılan elektronik balasttan değil, yüksek frekanstan kaynaklanmaktadır. Lambadaki akımın geri besleme kontrolü nedeniyle ışık seviyesinin uzun süre devam etmesi önemli bir avantaj gibi görülmekle birlikte bu uygulama lambanın toplam kullanım verimliliğini artırmaz, tam tersine azaltır. Akım harmoniklerinin oluşması bu lambaların en büyük dezavantajıdır. ‘G  -faktörü düzeltilmiş’ olarak nitelenen tipler harmonik problemleri azaltılmış güçlü lambalardır, fakat fiyatları daha yüksektir. Küçük tip lambalar ise genel olarak düzeltilmiş özelliğine sahip değildirler.

Tungsten filamanlı lambalar yerine kullanılmak üzere piyasada satılmakta olan kompakt flouresan lambalarda (CFL), 8 mm çaplı bükülmüş bir flouresan tüpünü kontrol eden bağlantı kutusunun içine yerleştirilmiş minyatür bir balast bulunmaktadır. Örneğin, 60 watlık bir filaman lambanın yerine kullanılan 11 watlık bir CFL lambanın ömrü yaklaşık 8000 saattir. Bu lambaların meskenlerde ve özellikle otellerde yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte çok ciddi harmonik problemleri de ortaya çıkmaya başlamıştır [39].

1.4.1.5. Üç Fazlı Yükler

Değişken hız kontrolörü, UPS üniteleri ve DA dönüştürücülerinde genellikle üç-faz köprü sistemi esas alınır ve DA çıkışında, her bir yarı periyotta (her fazın yarı devir sürecinde) altı darbe olduğundan bu sistemler ‘altı-darbeleri köprü’ olarak tanımlanmaktadır.

Altı darbeleri köprü, altının katlarının her birinde bir fazla ve bir eksik olmak üzere $6n \pm 1$ harmonikler üretir. Teorik olarak, her bir harmoniğin genliği harmonik numarasının tersidir; örneğin, beşinci harmonik %20, onbirinci harmonik %9 vb. olacaktır.

Harmoniklerin genliği oniki darbeleri bir köprü kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir. Bu, aralarında 30 derece faz farkı olan bir yıldız ve bir üçgen transformatör sargısından beslenen iki adet altı faz köprü demektir. $6n$ harmoniklerin ortadan kaldırılması teorik bazda mümkün olmakla birlikte, uygulamada harmoniklerin önlenmesi veya hangi ölçüde önlenilebileceği, dönüştürücülerin tipik olarak 20 ile 50 arasında bir faktör kullanılarak uygun duruma getirilmesine bağlı olmaktadır. $12n$ harmoniklerde değişiklik olmaz. Bu şekilde, toplam harmonik akım azaltılmakta ve aynı zamanda kalan yüksek harmonikler de kolaylıkla filtre edilebilmektedir.

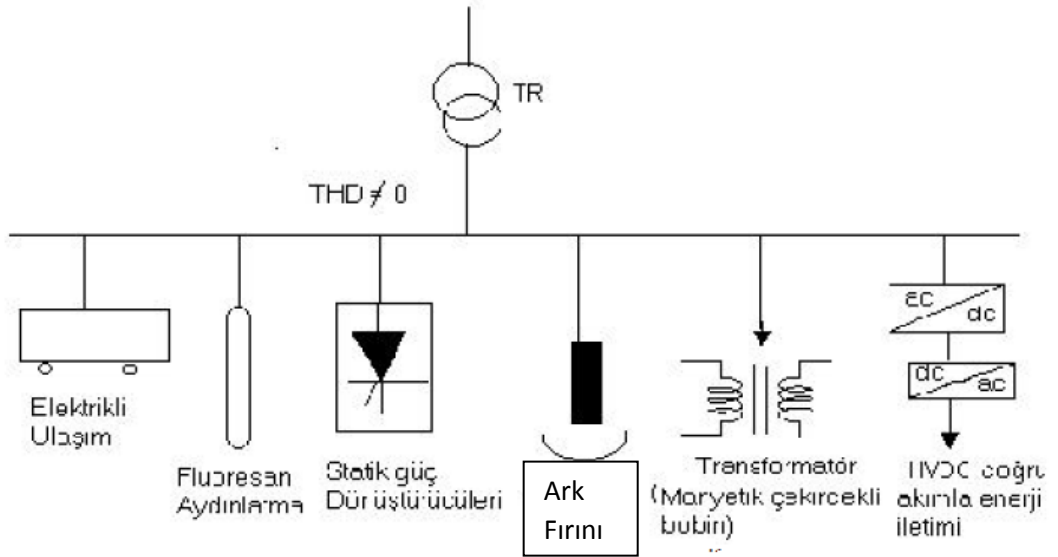
Donanım imalatçıları, örneğin filtre veya şok bobinleri kullanarak harmonik akım şiddetini azaltma yönünde çalışmalar yapmaktadırlar. Geçmişte, bazı imalatçıların bu çalışmalara dayanarak ‘G5/3’ standardına uyumlu donanımlar ürettikleri bilinmektedir. Ancak; G5/3 standardı, tesisatın tümüne uygulanan bir planlama standardıdır ve tesisatta yer alan her türlü donanıma ait bilgilere dayandırılmadıkça standart uyumundan söz edilemez. Daha ileri aşamada, faz farkı 15 derece olan paralel bağlı 12 darbeleri iki ünite ile darbe sayısı 24’e yükseltilecek, toplam harmonik akım yaklaşık %4.5’e kadar düşürülebilir. Oldukça karmaşık olan bu kontrol sisteminin maliyeti de yüksek olacağından ancak zorunlu hallerde kullanılması söz konusudur.

Ayrıca endüstride harmonik meydana getiren devre elemanları ayrı bir şekilde aşağıda açıklanmış ve yaydıkları harmonik derecesi belirtilmiştir [39].

1.4.1.6. Başlıca Harmonik Kaynakları

Aşağıda şebekedeki başlıca harmonik kaynaklardan bahsedilmektedir. Bu şebeke elemanlarının gerilimi ve akımı arasındaki bağlantının nonlineerliği, harmonik oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Manyetik devrelerin aşırı doyması, elektrik arklarındaki ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması nonlineer olaylardır. Şekil 1.5’te harmonik kaynakların bir kısmı görülmektedir. Bu nonlineer elemanlar;

- Döner makineler
- Transformatörler,
- Güç elektroniği elemanları,
- Doğru akım ile enerji nakli,
- Statik VAR generatörleri,
- Ark fırınları,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Fotovoltaik sistemler
- Konverterlerdir.
- Elektronik balastlar,
- Gaz deşarjlı aydınlatma, halinde örneklendirilebilir.



Şekil 1.5. Nonlineer olmayan yükler ile harmonik kaynakları [36]

1.4.1.7. Konverterler

3 ve tek fazlı hat komitasyonlu konverterler enerji sistemlerindeki en mühim harmonik kaynaklarından olup; DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler, hat komitasyonlu konverterler üzerinden beslenmektedir. Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin kullanım alanlarından biri de elektrikli demiryolu ulaşım sistemidir. Konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga şeklinin içerdiği darbe

sayısı üzerinden tanımlanır. Genellikle konverterler tarafından üretilen harmonik bileşikler $n=kp\pm 1$ şeklinde ifade edilmektedir. $k=1,2,3,\dots$ değerlerinde olup tam sayıları $p=6,12,\dots$ olmak üzere darbe sayısını ifade etmektedir. Darbe sayısının artması, düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasının önüne geçmektedir [35].

1.4.1.8. Transformatörler

Transformatörler enerji sistemine bağlanan başlıca elemanlardan biri olup, harmoniklerin ortaya çıkmasına yol açarlar. Transformatörlerin mıknatıslanma niteliğinden kaynaklı olarak harmonik bileşenler transformatörün bağlantı ucuna, yıldız noktasının topraklanıp, topraklanmamasına bağlı biçimde değişiklik göstermektedir. Transformatörlerin yük durumuna bağlı olarak ise harmonik genliklerinin değişimi söz konusudur. Daima enerji altında bulunan bu elemanlar, harmonik kaynağı olarak sistemde harmonik akımları dolaştırarak harmonik distorsiyonuna sebep olurlar [35].

1.4.1.9. Generatörler

Generatörler en doğal harmonik üreticileridir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özellikleri çıkık kutbun alan şeklinde, manyetik direncin oluklara bağlı oluşundan, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlarla sık sık ve simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargılarından kaylanmaktadır. Dönen makinalar, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretmektedir [35].

1.4.1.10. Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumlarıyla enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından olup, önemli bir yer tutmaktadır. Yüksek gerilim iletim şebekesine doğrudan bağlanan anma gücü MW mertebesine sahiptirler ve elektriksel ark oluşumu prensibiyle çalışırlar. Elektrik arkının akım gerilim karakteristiğinin nonlineer olması sebebiyle, ark fırınları harmonik üretmektedir [35].

1.4.1.11. Gaz Deşarjı Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüpün içindeki gazın deşarjı esasına dayalı olarak geliştirilmiş olan aydınlatma elemanları nonlinear akım gerilim karakteristiğine sahiptirler ve bu nedenle harmonik üretirler. Bu tip lambalar üretim sırasında negatif direnç karakteristiği sergilerler. Bina ve  evre aydınlatmalarında sıklıkla tercih edilen flouresan lambaların üretim tesislerinde, tek harmoniklerin seviyesi sistemi önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle 3. harmonik ve 3. harmoniğin katları mertebesinde bulunan harmonik akım bileşenleri, 3 fazlı 4 iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına yol açar [35].

1.4.1.12. Statik VAR kompanzatörler

Reaktif güç kontrolü amacıyla güç sistemlerinde kullanılan, tristör kontrollü reaktör içeren statik var kompanzat rleri, sahip oldukları nonlinear elemanlar nedeniyle lineer olmayan u  karakteristiğindedir. Statik var kompanzatörler dolayısıyla bağlı oldukları güç sisteminde non-sinüzoidal büyüklüklere sebep olurlar [35].

1.4.1.13. Fotovoltaik sistemler

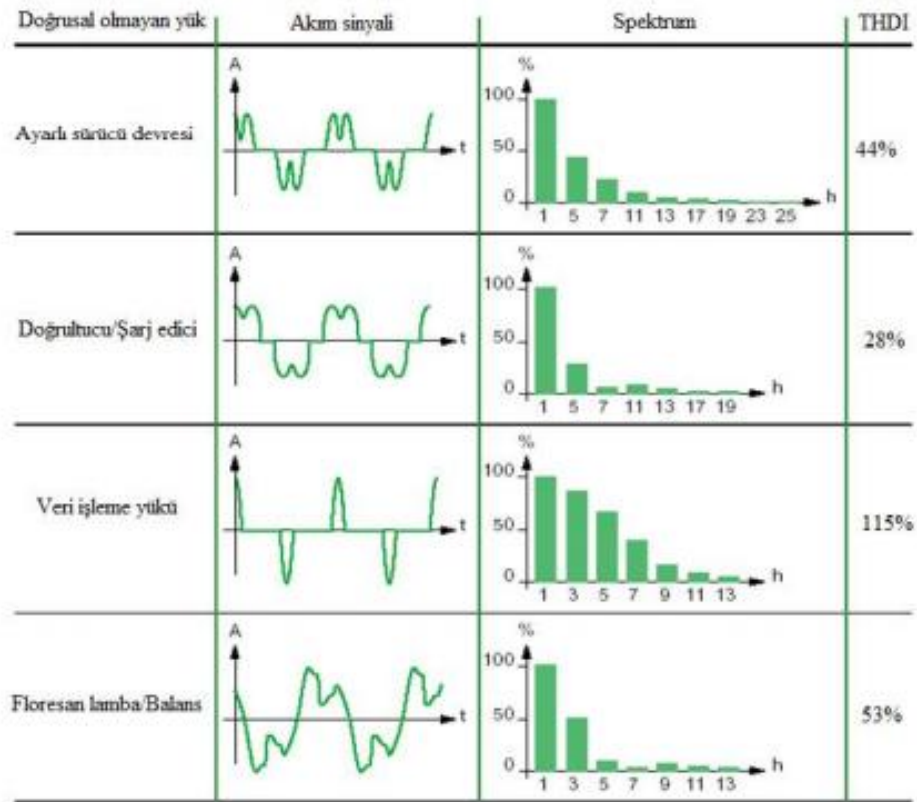
Fotovoltaik sistemler harmonik üretme açısından genellikle konverterlerden kaynaklı harmonik etkinliğe sahiptir. Fotovoltaik sistemler, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmede konverterlerden yararlanırlar. Bundan dolayı dönüşüm sırasında yarı iletken elemanlar harmoniklere yol açabilmektedir [35].

1.4.1.14. Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri, sadece bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp, eş zamanlı olarak etki kaynağı olma özelliği taşırlar. Bilgisayarların sahip olduğu nonlinear yük karakteristikleri, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin fazla yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere sebep olabilmektedirler [35].

1.4.1.15. Elektronik Balastlar

Hayatımızın her safhasına gittikçe daha belirgin bir şekilde entegre olan elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına yol açmaktadır. Aydınlatmada yararlanılan elamanlar da, elektronik balastlar da harmonik üretirler. 3.,5.,7. ve 9. bileşenler, filtresiz kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en aktif harmonik bileşenlerdir. 13. harmonikten sonra temel bileşeni $1/3$ 'den küçük değerdeki harmonik bileşenlere sahiptir. Şekil 1.6'da harmonik kaynaklı yüklerin akım ve harmonik spektrumu karakteristikleri verilmiştir [37].



Şekil 1.6. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin akım ve harmonik spektrumu karakteristikleri [37]

1.5. Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler; genellikle nonlineer elemanlar ve nonsinüzoidal kaynaklardan birinin ya da her ikisinin de sistemde mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde mevcut olması sinüzoidal dalgaının bozulmasına yol açacaktır. Bu bozulan dalgalara, nonsinüzoidal dalga adı verilmektedir.

Harmonikler güç sistemlerinde; rezonans olayları, ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, güç faktörünün değişmesi gibi teknik ve ekonomik sorunlara sebep olur. Sinüzoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli akım çekmesi, bu alıcının yapısının gerektirdiği bir durumdur. Bu; alıcının nominal çalışması esnasında harmonik meydana getirerek akım çekmesi demektir. Harmonik üreten bu alıcıların dışında, lineer karakteristikte olmalarına karşın harmonikli akımlara yol açan alıcılar da mevcuttur. Bu da, alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüzoidal oluşundan kaynaklanmakta olan bir durumdur. Alternatif akım üretimi esnasında alternatörlerde alınan iyileştirici önlemlerle, elektrik enerjisinin sinüzoidale mümkün olduğunca yaklaştırılması sağlanmaktadır. Ancak, aynı şebekeye bağlı diğer nonlineer yükler, lineer bir alıcıya etki edebilmektedir [38].

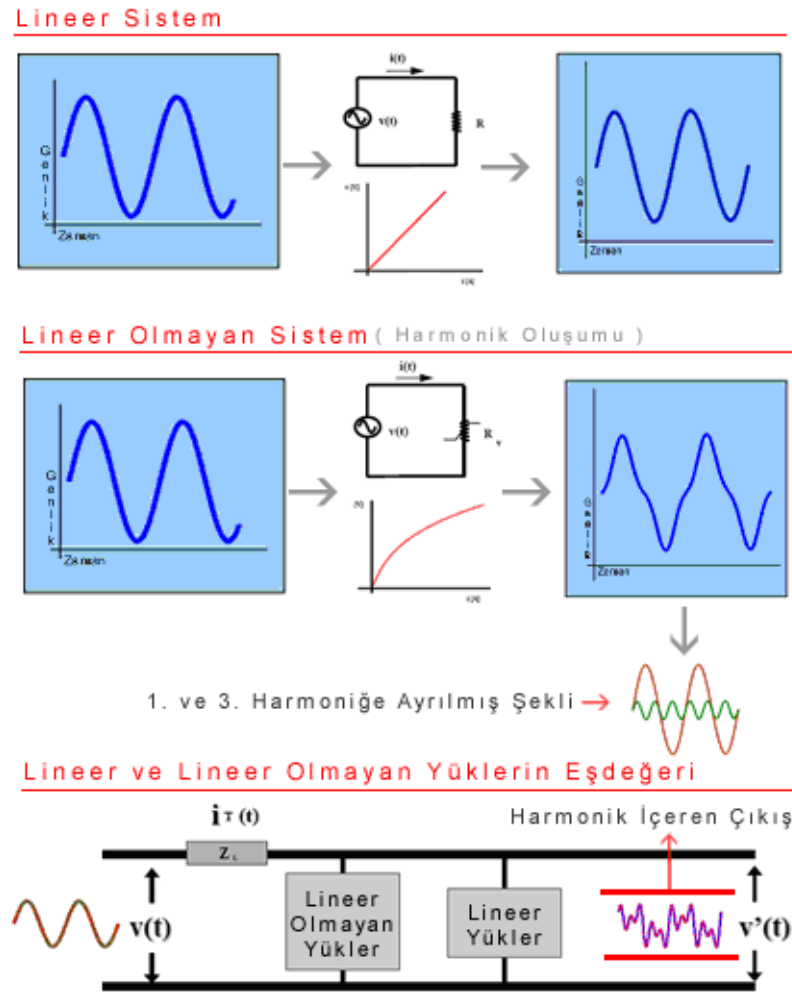
Enerji sistemlerinde, harmonikler nedeniyle gerilim ve akım dalga şekillerinde yaşanan bozulmalar birçok farklı soruna sebebiyet vermektedir. Bu sorunlar ;

- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerdeki kaybın artışı,
- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Gerilim düşümünde artış,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma sebebiyle hasar görmesi,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü gibi yerlerde ortaya çıkan çalışma bozuklukları,
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın yol açtığı aşırı gerilimler ve akımlar,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın ortaya çıkması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçümler,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Ateşleme devrelerinin anormal çalışması,
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması,
- Makinelerde mekanik titreşimler (vibrasyon),
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
- Mikro bilgi işlemciler üzerinde hatalı çalışma,
- Elektronik kart arızaları,
- Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınma,
- CAD/CAM terminallerinde hafıza silinmesi,
- Kesici ve şalterlerde açmalar,
- Kompanzasyon sigortalarının atması,
- Güç kondansatörlerinde güç kayıpları, delinmeler ve patlamalar,

- Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması,
- Enerji kayıpları şeklinde sıralanabilir [35].

1.5.1. Tesisat İçindeki Harmonik Problemler

Harmonikler tesisat içerisinde bazı problemlere neden olurlar. Harmoniklerin neden olduğu problem alanları aşağıda belirtilmiştir. Bu problem alanlarını harmonik akımların ve harmonik gerilimlerin neden olduğu problemler olarak iki grupta toplayabiliriz. Aşağıda bu problemlerden bahsedilmiştir. Şekil 1.7’de sistem içerisindeki lineer ve nonlinear yüklerden sonraki akım gerilim işareti ve harmonik bileşenlerine ayrılmış işaret verilmiştir [38].

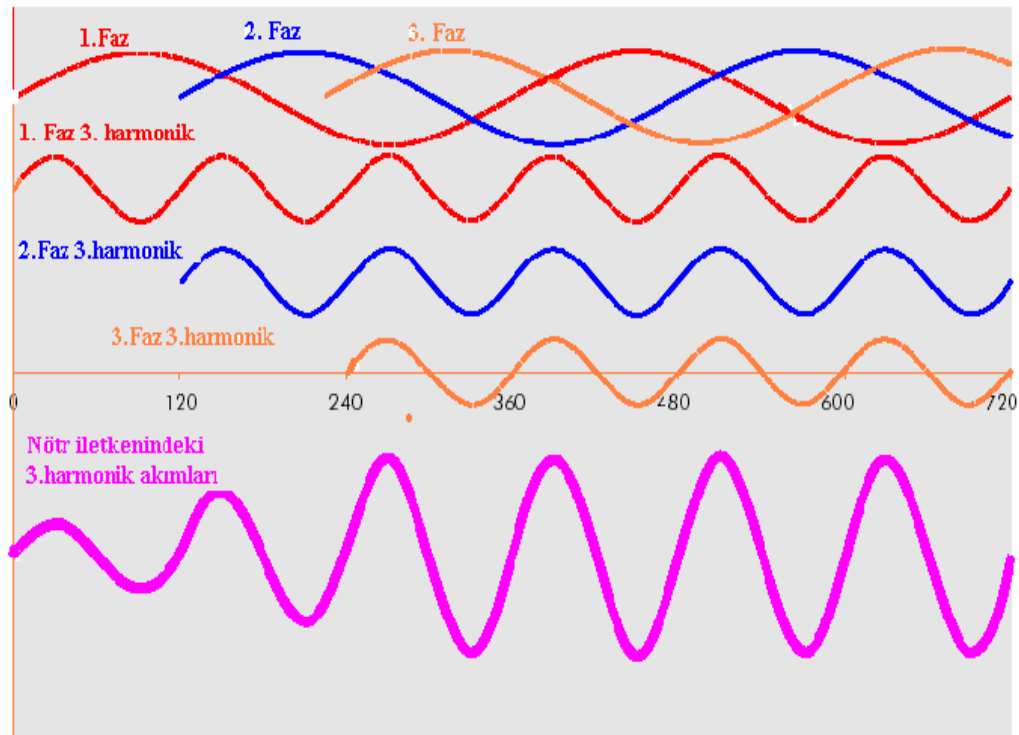


Şekil 1.7. Lineer ve nonlinear yüklerden sonraki akım ve gerilim işareti [38]

1.5.1.1. Harmonik Akımların Neden Olduğu Problemler

Harmonik akımları güç sistemlerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olurlar. Aşağıda bu etkilerden bahsedilmiştir.

- **Nötr İletkende Aşırı Isınma:** Üç-fazlı bir sistemde gerilim dalga şekli her bir fazdan nötr yıldız noktasına 120° 'lik bir açı değişimi yapar ve her faz eşit yüklendiğinde nötr'deki akım bileşkesi sıfıra eşit olur. Fazlar dengeli yüklenmediğinde nötrden yalnızca denge dışı kadar net akım geçer. Eskiden, tesisatçılar (standarlara dayanarak) yarım-ölçüde nötr iletken kullanarak bu olgudan avantaj sağlıyorlardı. Fakat, şebeke akımlarının birbirlerini dengelemesine karşın harmonik akımlar birbirini dengelememekte ve hatta temel harmoniğin 3 katının tek sayılı çarpanları olan harmonik akımlar 'üçlü-n' harmonikleri şeklinde nötrde birleşmektedir. Bu durum da, nötr iletkenin aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Şekil 1.8'de nötr iletkenindeki 3. harmonik akımları gösterilmiştir [40].



Şekil 1.8. Nötr iletkenindeki 3. harmonik akımları [40]

- **Transformatörlerdeki Etkiler:** Transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, girdap akımı kayıplarıdır, normalde tam yükte %10 oranında olan kayıplar harmonik

numarasının karesiyle orantılı olarak yükselir. Uygulamada, IT donanımlarını besleyen tam yükteki bir transformatörün toplam kayıpları, eşdeğerdeki doğrusal yüklerin beslenmesinde meydana gelen toplam kayıplardan iki kat daha fazladır. Bu durum çok daha yüksek çalışma sıcaklığı ve daha kısa bir ömürle sonuçlanır. Hatta söz konusu şartlar altında çalışan bir transformatörün yaklaşık 40 yıl civarında olan kullanım ömrü 40 güne düşebilmektedir. Neyseki, tam yükte çalışan transformatör çok azdır, yine de tesis seçiminde bu konunun dikkate alınması son derece önemlidir. İkinci etki üçlü-n harmonikleri ile ilgilidir. Üçlü-n harmonikleri üçgen sargıya geldiklerinde tamamı aynı fazda olduklarından sargı içerisinde dolanırlar. Etkin biçimde absorbe olmuşlardır ve besleme devresine ulaşmazlar. Bundan dolayı, üçgen sargılı transformatörler izole özellikli transformatörler olarak faydalıdırlar. Fakat, üçlü-n niteliğine sahip olmayan diğer harmoniklerin tümü için durum böyle olmayıp bu harmonikler devreye yayılır. Transformatörlerin anma değerlerinin tespit edilmesinde, sirkülasyon akımları dikkate alınmalıdır [39].

- **Devre Kesicilerinde İstenilmeyen Açılmalar:** Artık mıknatısiyet akım devre kesicileri (Residual current circuit breakers: RCCB), faz ve nötr iletkenlerdeki akımları toplayarak anma değerinin üstünde bir sonuç elde edilmesi durumunda harekete geçer ve gücü yükten ayırır. Harmoniklerin bulunduğu sistemlerde ‘istenmeyen devre açılmaları’ iki sebepten kaynaklıdır. İlki; elektromekanik olarak faaliyet gösteren bir RCCB cihazında yüksek frekanslı bileşenlerin hatalı toplanması halinde cihazın devreyi kesebilmesidir. İkincisi; harmonik üreten bir cihaz eş zamanlı olarak gürültü üretir ve söz konusu gürültünün cihazın güç kaynağı ile bağlantı noktasında filtre edilmesi gerekir. Bu maksat doğrultusunda kullanılan filtrelerde normal olarak faz ve nötrden toprağa bağlı bir kondansatör bulunur ve bir miktar akım toprağa geçer. Toprağa kaçan bu akımın, standartlara göre 3.5 mA’dan az olması gerekir ve genel olarak da çok daha düşüktür. Söz konusu cihazın başka bir devreye bağlı olması halinde kaçak akım miktarı yeterli düzeye yükselerek RCCB’yi açabilir. Bu sorunun en kolay çözümü, her biri daha az yükleri besleyen daha çok sayıda devreler kullanmaktır. Minyatür devre kesicilerindeki (Miniature circuit breakers: MCB) ‘istenilmeyen devre açılmaları’ genellikle, harmonik akımları hesaba katmadan yapılan akım hesaplamaları veya basit ölçümler nedeniyle gerçekte devrelerden daha fazla akım geçtiği için ortaya çıkmaktadır. Portatif ölçü aletlerinin birçoğu gerçek etkin değerleri göstermez ve sinüs eğrisi biçiminde olmayandır.

- **Güç Faktörü Düzeltme Kondansatörlerinin Aşırı Yüklenmesi:** Endüksiyon motorları gibi endüktif yükler tarafından çekilen geri fazlı akımı dengelemek için ileri fazlı faz açısında akım çekmek üzere güç faktörü düzeltme (PFC) kondansatörleri kullanılmaktadır.

Frekans yükseldikçe PFC kondansatör empedansı azalmakta, genelde endüktif olan kaynak empedansı artmaktadır. Dolayısıyla, kondansatörün çok yüksek harmonik akımlar taşıması kaçınılmazdır ve tasarımda harmonikler için özel önlemler alınmamışsa olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir. Çok daha ciddi potansiyel bir problem ise; kondansatör ile besleme sistemindeki kaçak empedansın, harmonik frekansların birinde veya birine yakın olarak rezonansa geçmesidir. Böyle bir durumda, kapasitör sisteminin çökmesine yol açabilecek kadar yüksek gerilim ve akımlar oluşabilir.

Devreye, bileşimi en küçük harmonikte endüktif olacak şekilde, bir endüktans ile kondansatör bağlanarak rezonans önlenir. Bu şekilde, kondansatörden geçebilecek harmonik akım da sınırlandırılmış olur. Endüktörün fiziksel boyutları, özellikle düşük düzeydeki harmoniklerin mevcut olması halinde problem oluşturabilir [39].

- **Deri Olayı:** Alternatif akım, iletkenlerin dış yüzeyinden geçme eğilimindedir. Yüzey etkisi olarak bilinen bu özellik yüksek frekanslarda daha belirgin olarak kendini gösterir. Güç besleme frekanslarında yüzey etkisi çok zayıf olduğundan normal olarak ihmal edilmektedir, fakat frekans yaklaşık 350 Hz üzerine çıktığında (yedinci harmonik ve üstü) önemli olmaya başlar, daha fazla kayıp ve ısınmaya neden olur. Harmonik akımların mevcut olduğu durumlarda tasarımcıların deri olayını dikkate almaları ve buna göre kablo değerlendirmeleri yapmaları gerekmektedir. Problemin önlenmesine yardımcı olmak üzere çok damarlı kablolar veya izole edilmiş baralar kullanılabilir. Harmonik frekanslarda baraların tesbit düzenlerinde mekanik rezonans meydana gelmemesi için tasarımcıların bu konu üzerinde önemle durmaları gerekir [39].

1.5.1.2. Harmonik Gerilimlerin Yol Açtığı Problemler

Besleme sisteminin kaynak empedansı olması nedeniyle harmonik yük akımları, gerilim dalga şeklindeki harmonik gerilim bozulmalarının artmasına neden olur ('düz tepe' oluşmasının kaynağı da budur). Burada empedansın iki elemanı bulunmaktadır; bunlardan biri ortak birleşme noktasından gelen dahili kablo devresine aittir, diğeri ise ortak birleşme noktasında bulunan beslemeye ait eleman, yani lokal besleme transformatörüdür.

Doğrusal olmayan yükün çektiği bozulmuş akım, kablo empedansında bozulmuş bir gerilim düşümü meydana getirir. Söz konusu bozulmuş gerilim dalga şekli aynı devreye bağlı

doğrusal olanlar dahil diğer yüklerin tamamına yayılarak, sistemde harmonik akım dolaşımına yol açmaktadır.

Çözüm için, harmonik üreten yüklerin beslendiği devrelerin, harmoniklere karşı hassas yüklerin beslendiği devrelerden ayrılması gereklidir. Bununla ilgili, ortak birleşme noktasından gelen ayrı ayrı devreler lineer ve nonlineer yükleri beslemekte, bundan dolayı nonlineer yükün yol açtığı gerilim bozulması lineer yük devresine etki etmektedir [36].

Enerji kesilmesi halinde bir UPS veya bir yedek generatör devreye girdiği zaman elektrik kaynağına ait empedanstan kaynaklanan gerilim bozulma şiddetinin çok daha büyük olacağı göz önünde tutulmalıdır. Aşağıda harmonik gerilimlerin şebekede neden oldukları etkilerden bahsedilmektedir.

- **Asenkron Motorlardaki Etkileri:** Harmonik gerilim bozulması girdap akım kayıplarının yükselmesine neden olur. Ayrıca, statorda oluşan harmonik alanlar ilave kayıpların meydana gelmesine yol açar ve bu alanların herbiri motoru ileri veya geri farklı hızda dönmeye zorlar. Kayıpların yükselmesinin diğer bir nedeni de rotorda oluşan yüksek frekanslı akımlardır. Harmonik gerilim bozulmasının mevcut olduğu durumlarda ilave kayıpları göz önüne almak üzere anma değerleri yeniden belirlenmelidir [39].
- **Sıfırlama Sorunu:** Elektronik kontrolörlerin birçoğunda gerilimin sıfır volt olduğu an tesbit edilerek sistemin devreye alınması sağlanmaktadır. Bunun nedeni, sıfır gerilimde endüktif yüklerin devreye alınması sırasında geçici etkilerin oluşmamasıdır. Bu şekilde, elektromanyetik gürültü, bozucu etki (EMI) ve yarı iletken anahtarlama aygıtlarındaki zorlanmaları azaltabilmektedir. Besleme devresinde harmoniklerin ve geçici etkilerin mevcut olması halinde sıfırlama sırasında gerilim değişmesi hızlanmakta, sıfırlamanın tesbiti zorlaşmakta ve hatalı operasyonlar meydana gelmektedir. Herbir yarım periyottaki gerilim sıfırlaması birden fazla olabilir [39]. Harmoniklerin etkileri ve izin verilen sınırları çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Harmoniklerin etkileri ve izin verilen sınırları

Cihaz	Etkileri	Limitleri
Güç Kondansatörleri	Aşırı ısınma, erken eskime (bozulma), rezonans.	MV'de 12 saat/gün için veya AG'de 8 saat/gün için ($THD_I < \%83$)'de $I < 1.3$ veya $U < 1.1U_n$)
Motorlar	Kayıplar ve aşırı ısınma, tam yükte kullanılacak kapasitenin düşmesi, darbe torku (titreşimler, mekanik stres), gürültü kirliliği.	$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / h} \leq \%2$
Devre Kesiciler	İstenmeyen açılma (aşırı gerilim tepe değerleri vb.)	$\frac{U_h}{U_1} \leq \%6$ ila 12
Kablolar	Ek iletken iç direnç kayıpları (üçüncü harmonik akımları mevcutsa özellikle nötr iletkeninde)	$THD \leq \%10$ $U_h/U_1 \leq \%7$
Bilgisayarlar	Çalışma problemleri	$U_h/U_1 \leq \%5$

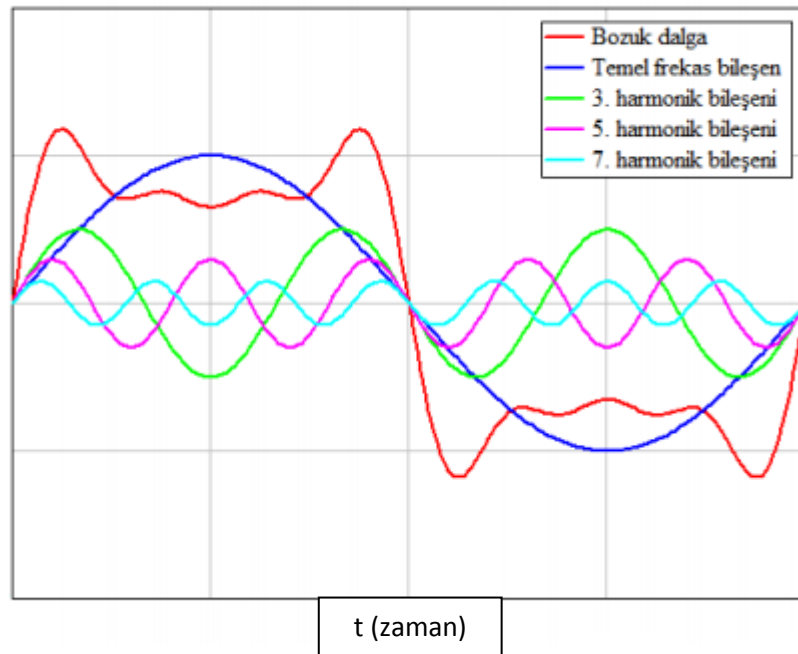
- **Besleme Devresini Etkileyen Harmonik Problemler:** Besleme devresinden harmonik akım çekilmesi halinde akım ve kaynak empedansı ile orantılı olarak ortak birleşme noktasında (PCC) harmonik gerilim düşümünde bir artış meydana gelir. Genel olarak besleme devresi endüktif özellik taşıdığından frekans yükseldikçe kaynak empedansı da yükselir. Doğal olarak, sistemden beslenen başka kullanıcıların çektiği harmonik akımlar ve bu kullanıcılara ait transformatörlerin de etkisi ile PCC noktasındaki gerilimde bozulma meydana gelecektir, diğer bir ifade ile herbir kullanıcıdan kaynaklanan ilave bir katkı söz konusudur. Kullanıcıların sistemi kirlitmelerine ve birbirlerine zarar verecek etki yaratmalarına izin verilmesi düşünülemez, bu nedenle ülkelerin çoğunda elektrik dağıtımını yapan kuruluşlar çekilecek harmonik akım miktarını sınırlayan kurallar koymuşlardır [39].

1.6. Harmoniklerin Filtrelenmesi

Endüsrileşmenin bir sonucu olarak elektrik şebekelerinde meydana gelen kirlenme kaçınılmaz bir durumdur. Enerji kalitesi üzerinde belirleyici rol oynayan başlıca faktörler; gerilim değişimleri, kesintiler ve temel frekans dışındaki frekansları (harmonikleri) üreten tüketicilerdir. Harmoniklerden kaynaklı olası zararlı etkilerin önüne geçilmesi yalnızca tasarım

aşamasında alınacak önlemlerle mümkün olabilmektedir. Harmonik akımların şebekeye geçmesini engellemek adına ek devrelere gereksinim duyulmaktadır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devreler, ‘harmonik filtresi’ olarak adlandırılır. Harmonik filtreler, bir veya daha fazla frekanstaki akımın veya gerilimlerin yani harmoniklerin etkisini azaltmayı amaçlar. Bu filtrelerin görevi, kısaca; harmonik üreten bir cihazın beslediği yükün gerilim dalgalarını düzelterek, AC sisteme katılan istenmedik harmonik bileşenlerin önüne geçmek ve radyo frekans girişimlerini elemektir [42, 44, 45].

Motor hız kontrol cihazları, temel harmoniğin %40-50’si civarında 5. (250Hz) ve 7. (350Hz) harmonik üretirler. Bununla beraber, batarya şarj cihazları yaklaşık %25-30 oranında 5. ve 7. harmoniği üretirler. Bilgisayarlar ve kompakt flouresan ampuller ise %50-100 aralığında 3., 5., 7. ve 9. harmonik üretirler. 12 darbeli hız kontrol cihazlarında ise 11. ve 12. harmonikler ağırlık gösterir. Endüstriyel tesislerde gerilimde meydana gelen bozulmanın %5’in üzerinde olmaması genellikle kabul edilir olup pasif filtreler aracılığıyla bu seviyeye inilebilir. Fakat hava alanı ve hastanelerde gerilimde meydana gelen bozulma (THD_v) %3 oranının altında olmalıdır. Bu, her zaman pasif filtre ile sağlanamayabilir. Böyle bir durumda aktif filtrelere ihtiyaç duyulur. Çeşitli harmonik bileşenlerin gösterildiği işaret Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Çeşitli harmonik bileşenlerin gösterildiği işaret

Filtrelerin görevleri genel olarak;

- Harmonik üreten bir cihazdan beslenen yükün gerilim dalgasının düzeltilmesi,

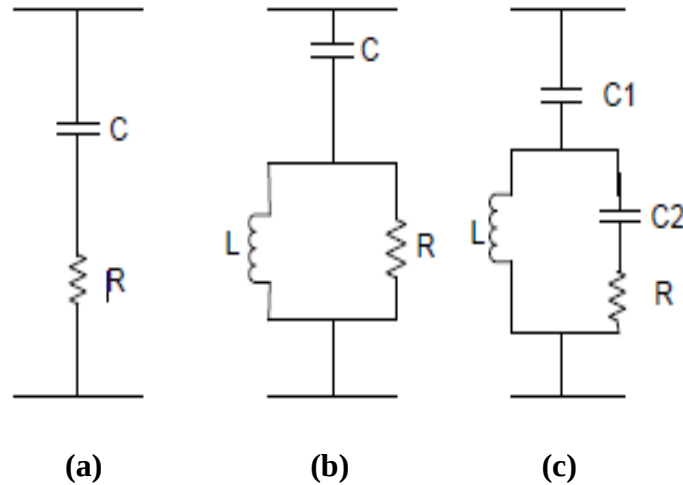
- AC sisteme enjekte edilen istenmedik harmonik bileşenlerinin önüne geçilmesi,
- Radyo frekans bileşenlerinin elimine edilmesi

şeklinde sıralanabilir.

Bu amaç için çeşitli yapı ve şekilde filtre tasarımları mümkündür. Genel manada aktif ve pasif olmak üzere iki tür filtreleme tekniği kullanılmaktadır. Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör vb. pasif elemanlardan oluşan filtrelere “pasif filtreler”, filtrelerin kontrollü akım veya gerilim değerine sahip olduğu filtrelere “aktif filtreler” denir.

1.6.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler kaynak ve yük arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki bileşenlerin yok edilmesine yönelik olarak tasarlanan ve kondansatör, endüktans ve kimi durumlarda direnç elemanlarından oluşan devrelerdir. Pasif filtreler, ortadan kaldırılmak istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerinin belirlenmesini amaçlar. Her bir harmonik için ayrı devre tasarımı yapılır. Pasif filtreler; seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere 2 ayrı bölümde incelenir. Değişik pasif filtre çeşitleri Şekil 1.10’da gösterilmiştir.

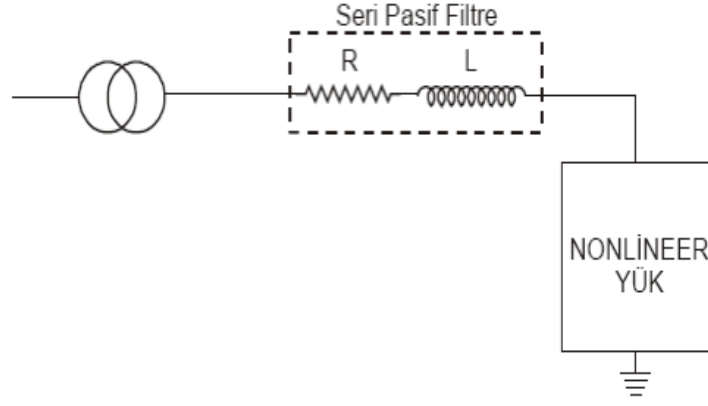


Şekil 1.10. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece

1.6.2. Seri Pasif Filtreler

Seri pasif filtreler harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanır. İstenmeyen harmonik bileşen işaretlerini geçirmemek için yüksek bir seri empedansın kullanımıyla sistemde

istenmeyen harmonik işaretlerini engeller. Yalnızca belirli frekansa sahip harmonik işaretleri engeller. Seri filtreler, filtrelerde rezonans durumu gözlenmemesine karşın, tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtım zorunlulukları mevcuttur. Şekil 1.11’de seri filtrenin devreye bağlanış şekli gösterilmiştir.

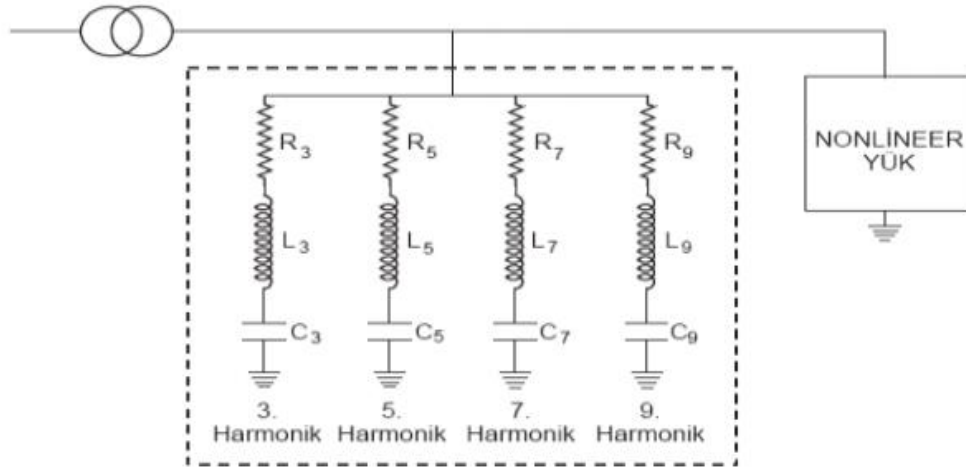


Şekil 1.11. Bir devrede seri filtrenin kullanımı [40]

Seri filtreler pratikte AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrenin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesi olup, tam hat gerilimleri için yalıtılmasının gerekmesi ve gerilim düşümüne sebebiyet vermesidir [35].

1.6.3. Parelel (Şönt) Pasif Filtreler

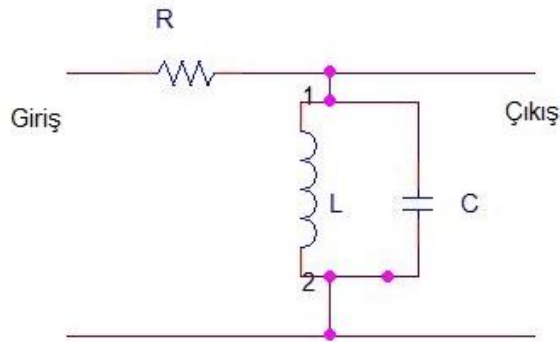
Parelel filtreler harmonik kaynağına paralel bağlanır. Parelel pasif filtreler, ortadan kaldırılmak istenen harmonik bileşen frekansı için rezonansa gelecek C ve L değerlerini hesaplayarak bu devreyi kaynağa bağlamayı amaçlar. Her bir harmonik frekansı için bu hesaplama ayrı ayrı yapılır ve oluşturulan devre kaynağına bağlanır. Bu işlem genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Bunun nedeni her harmonik için yapılması optimum bir çözüm sağlamamasıdır. Genliği düşük olan harmonik işaret frekansları için bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterlidir. Şekil 1.12’de şönt filtrenin devreye bağlanış şekli gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Bir devrede paralel filtrenin kullanımı [43]

1.6.3.1. Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı (band geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturularak bu akımın hattan sapmasını sağlarlar. Elemine edilen harmonik değerinde kapasitör ve reaktör reaktansları eşitlenir ve filtre saf rezistif empedans gösterir. Filtrenin empedansı düşük harmonikler için kapasitif, yüksek harmonikler için endüktif değer alır [13]. Şekil 1.13’de bir band geçiren filtre devresi verilmiştir. Aşağıda tek ayarlı (band geçiren) filtre tasarımına ilişkin yöntem verilmiştir.



Şekil 1.13. Band geçiren filtre (Tek ayarlı filtre)

Şekilden de görüldüğü gibi band geçiren filtre devresi endüktif, kapasitif ve rezistif yükten oluşmaktadır. Tek ayarlı filtrenin tasarım eşitlikleri aşağıdaki gibidir. Bir band geçiren filtre kullanımı en uygun filtre olup filtre kolunun empedansı şu şekildedir;

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (1.36)$$

Filtrenin ayarlandığı frekansta empedansın imajiner kısmı sıfıra eşit olup, rezonans meydana gelir. Rezonans anında empedans, R direncine eşittir. Filtrenin ayarlı olduğu rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.37)$$

ile hesaplanır. Harmonik bileşenler göz önüne alındığında n. Harmonikteki rezonans frekansındaki elemanların endüktif ve kapasitif reaktansları,

$$X_{Ln} = n\omega L \quad (1.38)$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{n\omega C} \quad (1.39)$$

şeklinde bulunur. Rezonans durumu r indisiyle ifade edilecek olursa, rezonans durumunda

$$X_{Lr} = X_{Cr} \quad (1.40)$$

olur. Rezonans olayı harmonik bileşenlerin birinde ya da bu harmonik bileşenlere yakın değerlerde gerçekleşirse harmonik akım veya gerilim değeri çok yüksek seviyelere ulaşır. Bundan dolayı filtrelerin ayarlandığı rezonans frekansı kaydırılır.

Nonlineer yükün ürettiği minimum harmonik derecesinden daha küçük bir değerde rezonans frekansı elde edilerek, harmonik yük akımının yükselmesinin önüne geçilebilir [35]. Filtredeki elemanların belirlenmesinde şu yol izlenir:

Filtreler temel frekansta reaktif güç kompanzasyonu için kullanıldığından ötürü, gerekli kondansatör kapasitesi reaktif güç eşitliği,

$$Q_c = \omega C U^2 \quad (1.41)$$

ile belirlenir. Filtreler için kullanılacak kondansatör kapasitesinin değerin tespit edilmesinde kullanılacak şönt filtre adedinden faydalanılır. Şönt filtre kolu sayısı k olmak üzere her filtre için kondansatör kapasite değeri,

$$C_r = \frac{c}{k} \quad (1.42)$$

olacaktır.

Filtrenin ayar keskinliğinin ölçüsü olarak bilinen kalite faktörü

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{X_{Cr}}{R} \quad (1.43)$$

olarak verilir. Burada X_{Lr} , X_{Cr} reaktans değerleri, rezonans frekanstaki değerlerdir. R, yalnızca endüktanstaki dirençten ibaret olup küçük bir değer taşır. Bu durumda filtrenin Q faktörünün değeri çok yüksek olacaktır ve çok keskin bir filtreleme sağlayacaktır. Eş zamanlı olarak R değeri filtredeki kayıplarla da ilişkili olduğundan Q değeri filtreleme performansı için de bir kıstastır. Genelde, seçilen bir değer olarak kullanılır.

Verilen bir kalite faktörü değeri için filtrenin endüktansı, kalite faktörü ifadesinden

$$L_r = \frac{X_{Lr}}{2\pi f_r} = \frac{R.Q}{2\pi f_r} \quad (1.44)$$

olarak hesaplanır. Aynı şekilde kondansatör değeri,

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r X_{Cr}} = \frac{1}{2\pi f_r . R . Q} \quad (1.45)$$

şeklinde hesaplanır.

Filtrenin kaynak empedansı ile etkileşime girmesi, rezonansın meydana gelmesini sağlayabilir. Bu, filtrenin ayarlandığı frekanstan daha düşük bir frekans değeridir. Kaynak özendüktansı ve L filtre endüktansı olmak üzere, rezonans frekansı

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{(L_s + L) . C}} \quad (1.46)$$

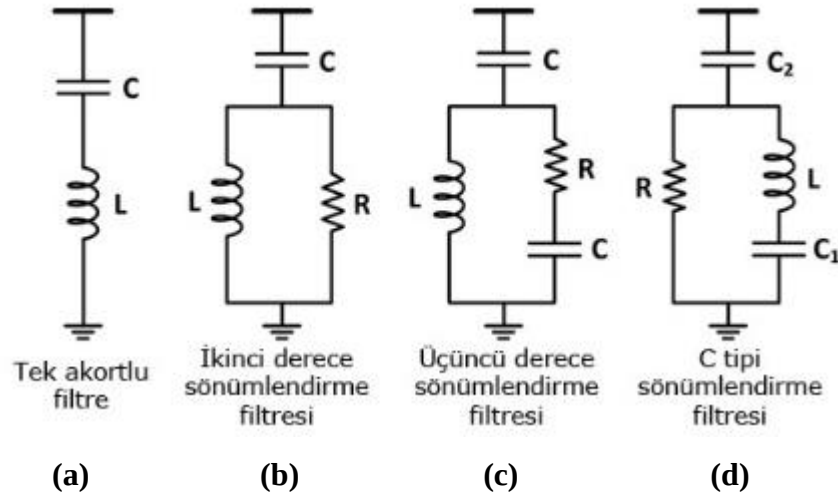
olarak bulunur. Filtrenin sistemde rezonansa geldiği bu sistem değerinin kontrol edilmesi gerekir [35].

1.6.3.2. Çift Ayarlı Filtre

İki farklı frekansa ayarlanıp, bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu frekanstaki harmonik bileşenlerin filtrelenmesini sağlarlar. Tek ayarlı filtrelerle temel frekanstaki güç kaybı azlığı, bu filtrenin başlıca özelliğidir. Endüktans sayısının ayarlanmasıyla, yüksek gerilimlerde tüm darbe gerilimleri kontrol edilir.

1.6.3.3. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Sönümlü filtreler yüksek dereceli harmonik bileşenlerini (17 ve üzeri) filtrelemek için kullanıldıklarında, yüksek geçiren filtre adını alırlar. Söz konusu durumda yüksek frekansa küçük empedans, düşük frekanslara yüksek empedans gösterirler. Sönümlü filtrenin kalite faktörü 0.5-5 aralığındadır ve düşük bir değere sahiptir. Çoğunlukla ayarlandıkları frekans rezonans, frekansından düşüktür. Şekil 1.14’de, yüksek geçiren sönümlü filtre devrelerine yer verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi temel devre elemanları band geçiren filtre ile aynıdır [35].

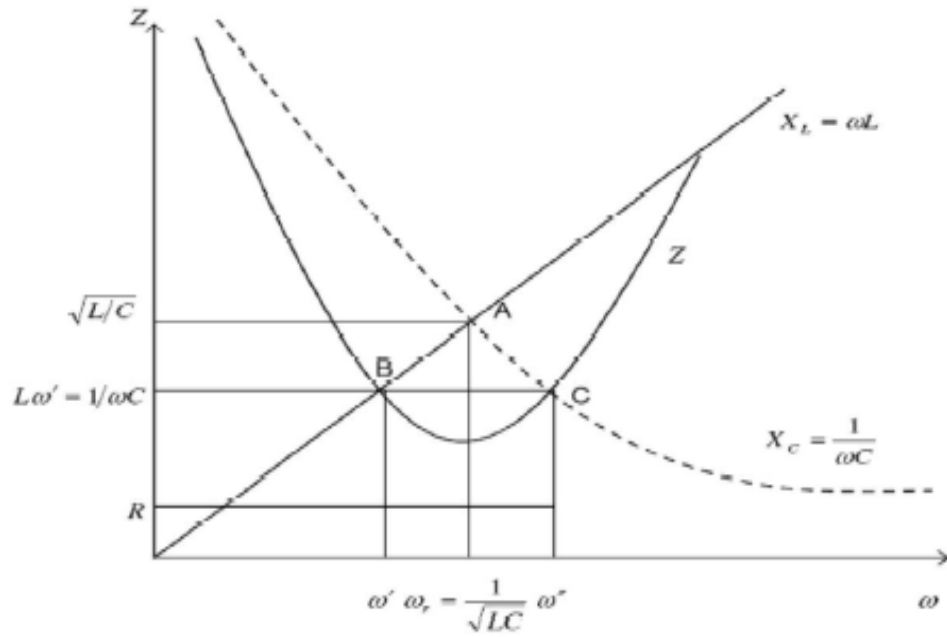


Şekil 1.14. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece, (d) C Tipi

Bu filtrelerin en önemli özellikleri şu şekildedir: kapasite kayıplarından, çalışma ve yüklenme esnasındaki ısı değişiminden etkilenmedikleri gibi frekans sapmaları da üretim toleranslarında oldukça etkilidir. Artan anahtarlama ve bakım problemleri açısından paralel

kolların ek devrelere ayrılması için ihtiyaç bulunmayıp, geniş bir frekans aralığında düşük empedans sağlamaktadırlar. Yüksek geçiren filtreler farklı mertebeler için tasarlanır. Örneğin; 2. mertebeden yüksek geçiren bir filtre temelde endüktansına paralel bir direnç eklenmiş band geçiren bir filtredir. Farklı direnç değerleri için farklı filtre cevapları söz konusudur. 2. mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatma konusunda band geçiren bir filtreden daha etkindir. Endüktif ve kapasitif elemanların seçimi, bant geçiren filtre ile aynı şekildedir. Bunların yanında, anma etkin gücüne dayanarak bir direnç değeri tanımlanır [41].

$X_L(\omega)$, $X_C(\omega)$ ve $Z(\omega)$ fonksiyonları çizilirse $Z(\omega)$ fonksiyonunun, $W_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ değerinde bir minimum noktası olduğu görülür. Şekil 1.15’de reaktans değişimlerine göre Z ’nin değişimi verilmiştir.



Şekil 1.15. ω açısal frekansının fonksiyonu olarak X_L , X_C reaktansları ve Z ’nin değişimi [41]

Bu W_r ’ye tekabül eden f_r ise kolun rezonans frekansı olup, L ve C değerlerinin değiştirilmesiyle her kol için değişik bir değere ayarlanabilmektedir. Her kol değişik harmonik frekanslarına ayarlanarak bir harmonik filtre oluşturulur [38]. Aşağıda ikinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre tasarımına ilişkin yöntem verilmiştir. Bu filtre çeşidi uygulanması en kolay olan ve en iyi filtrelemeyi sağlayan filtre tipidir.

2. dereceden sönümlü filtrenin empedansı

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (1.47)$$

olarak verilir. Filtrenin kalite faktörü de aşağıdaki gibi verilir.

$$Q = \frac{R}{(L/C)^{1/2}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (1.48)$$

$r = \frac{X_C}{X_L}$ eşitliği de, yüksek geçiren filtre için sınırlıdır. Q yüksek geçiren filtrede 0.5-2 aralığında bir değere sahiptir. Q köşe frekansında, 2'nin altında bir değer alırken, filtrelemeden daha fazla söz edilir. Daha yüksek frekanslarda filtre empedansı sürekli yükselmekte olup, Q'nun daha küçük değerleri için köşe frekansındaki değeri görülmez ve frekans yükselirken empedans neredeyse stabildir. Q seçiminde düşünülebilecek diğer faktörler şunlardır:

Arrilliaga tarafından verilen Ainsworth'un kullandığı eşitliklerde 2. dereceden sönümlü filtre için ayar frekansı ve m katsayısı tanımlanmıştır. Bu parametreler sırasıyla şu şekilde tanımlanabilir:

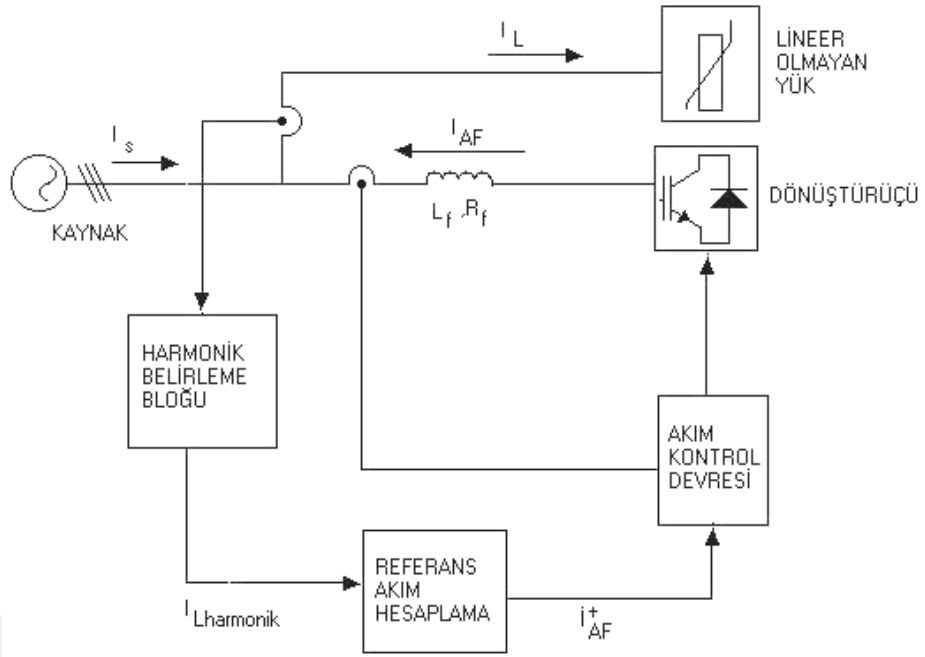
$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \quad (1.49)$$

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (1.50)$$

m tipik değerler için , 0.5-2 aralığındadır. 2. tip filtrenin admitansı, m değerinin düşüşü ile artış gösterir ve aynı şekilde köşe frekansı da artar [35].

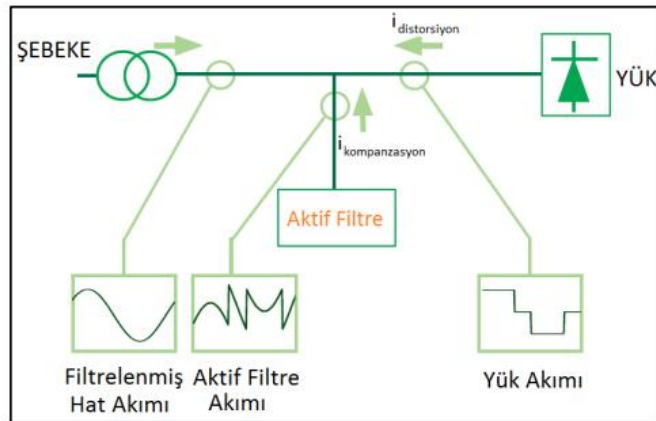
1.6.4. Aktif Filtreler

Aktif güç filtresi genel kullanım sebebi olarak, tüketicilerinin her biri için kendisinin de bir harmonik kaynak olan yüklerinin akım gerilim dengesizliğini elimine etmektir. Diğer taraftan fabrikalar için kullanılan aktif güç filtresi temelde, güç dağıtım sistemlerindeki harmonik değerleri azaltmayı ve bu şekilde gerilim harmonikleri ve gerilim dengesizliklerini ortadan kaldırmayı amaçlar [51]. Aktif filtrenin çalışma yöntemi pasif filtrenin çalışma yönteminden bütünüyle farklıdır. Aktif filtre şebekedeki harmonikleri hesaplayarak, onlara aynı genlikte ters fazda harmonik üretir. Bu şekilde güç kalitesine etki eden harmonikleri yok eder. Şekil 1.16'da bir aktif güç filtresinin blok şemasına yer verilmiştir.



Şekil 1.16. Aktif güç filtresine ait blok şeması

Aktif filtre var olan harmoniklerin ortadan kaldırılmasını sağlayacak harmoniklerin üretiminden sorumlu olup, aşırı yüklenme olasılığı taşımamaktadır. Kapasitenin üstündeki harmonikler şebekede dolaşmayı sürdürerek, aktif filtre kapasitesi mertebesinde harmoniklerin üretilmesine yani çalışmaya devam eder. Aktif güç filtrenin çalışma prensibi zaman-frekans domeninde şekildeki gibidir. Şekil 1.17’de aktif güç filtrenin çalışma prensibi gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere harmoniklerle ters fazda ve aynı genlikte işaret sisteme harmoniklerin eliminasyonu için veriliyor.

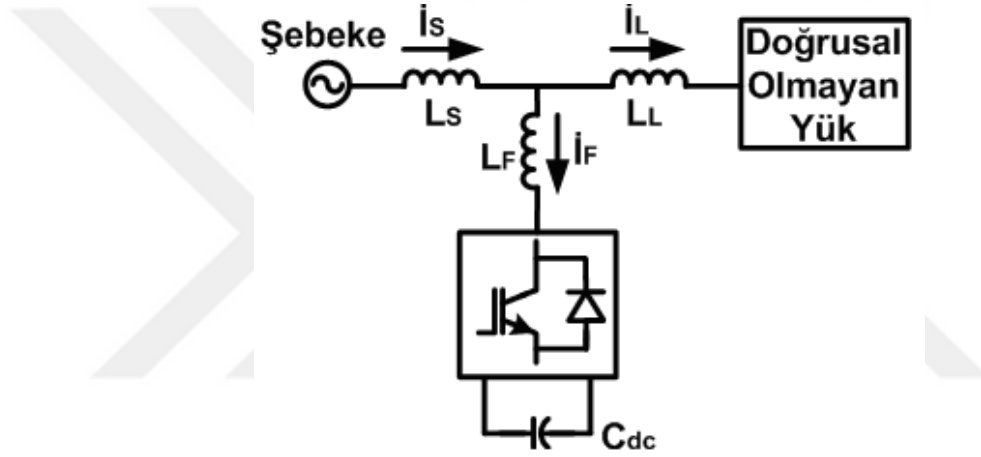


Şekil 1.17. Aktif filtrenin çalışma prensibi

Aktif filtreler yapıları bakımından; paralel, seri ve hibrit güç filtreleri olmak üzere 3 bölümde incelenir. Kontrol yöntemine göre de açık çevrim ve kapalı çevrim aktif güç kontrol sistemi olarak iki farklı bölüm altında ele alınmaktadır.

1.6.4.1. Paralel Aktif Güç Filtresi

Paralel aktif güç filtresi (PAGF), şebekeye paralel bağlanır. Filtre çeşitlerinden bu tür, sanayi işletmelerindeki en önemli ve en geniş kullanım alanına sahip yapılardır [53]. Bu filtreler harmonik akım filtrelemesi, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı dengelemesi ve nötr akım kompanzasyonu gibi akım kaynaklı harmoniklerin eliminasyonu için elverişlidir [52]. Şekil 1.18’de temel bir PAGF gösterilmektedir.



Şekil 1.18. Paralel aktif güç filtresi

Paralel aktif güç filtrelerinin dezavatajları yüksek güçlü uygulamalarda oluşmaktadır. Çünkü yüksek güç uygulamalarında, aktif filtrelerde kullanılacak yarı iletken sıkıntısı meydana gelmektedir. Bu uygulamalarda transformatörler, çoklu konvertörler veya kaskat bağlama konvertörleri PAGF ve elektrik güç şebekesi değerlerinin birleşmesi için kullanılması gerekmektedir [53].

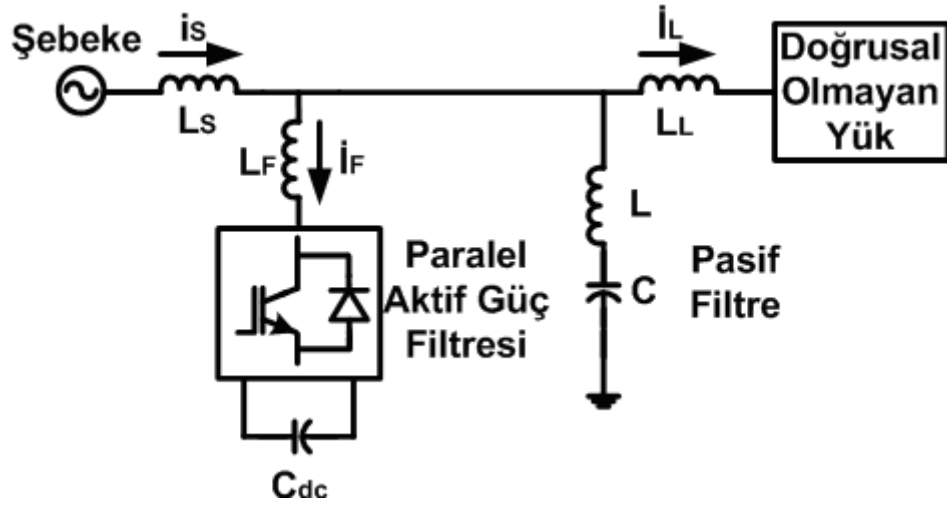
1.6.4.2. Seri Aktif Güç Filtresi

Seri aktif güç filtresi (SAGF) şebeke ile bağlantılı bir trafo üzerinden seri bağlanır. Seri aktif güç filtresi temel olarak anlık gerilim giriş çıkışıyla yük boyunca saf sinüzoidal gerilim dalga formunun stabilizasyonun sağlanmasına dayalıdır [53]. Bu filtreler gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, gerilim dengelenmesi, gerilim dalgacıklarının azalması ve

Şekil 1.19. Seri aktif güç filtresi

1.6.4.3. Hibrit Aktif Güç Filtresi

41



Şekil 1.20. Hibrit aktif güç filtresi

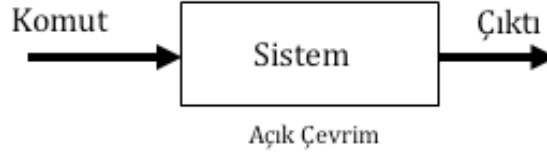
Hibrit aktif güç filtresinin tekniğindeki başlıca dezavantajı, PPF için çok sayıda güç bileşenine sahip olmasıdır. Burada, PPF sürekli sisteme bağlandıklarından lineer olmayan kaynakları önceden bilinen yükler için uygundur [53].

1.6.4.4. Aktif Güç Filtrelerini Kontrol Prensibine Göre Sınıflandırma

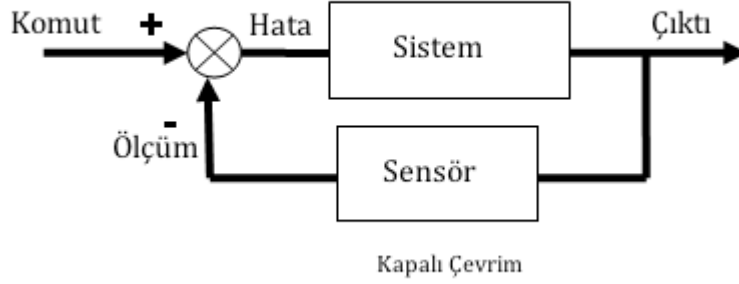
Aktif filtredeki kontrol prensibi şebekelerdeki bozulum kaynağına, ekip fiyatına ve arzu edilen düzeltme miktarına bağlıdır. Aktif filtrenin kontrol sistemi açık ve kapalı çevrim olmak üzere 2 şekilde yapılır. Şekil 1.21’de, açık çevrim kontrol sistemine yer verilmektedir. Bu sistemde harmonik akımlar aktif filtrenin yük tarafından okunur ve gerekli harmonikler aynı genliklerde ve ters fazda şebekeye aktarılır.

Şekil 1.22’de yer verilen kapalı çevrim kontrol sistemindeyse, şebeke akımının son durumu ölçülerek aktif filtre bu sonuç akımının minimum harmonik içermesine yol açacak biçimde harmonik üretir.

Tesis edilmesi daha kolay olmasına karşın, açık çevrim kontrol sistemi çok yüksek sınıflı akım sensörlerine gereksinim duyulacak olması sebebiyle verimli değildir. Kapalı çevrimdeyse, şebeke akımı ölçüldüğünden, filtreleme performansı doğrudan kontrol edilmektedir.



Şekil 1.21. Açık çevrim aktif filtre kontrol sistemi



Şekil 1.22. Kapalı çevrim aktif filtre kontrol sistemi

1.6.5. Aktif Filtre İle Pasif Filtre Karşılaştırılması

Elektrik güç sistemlerindeki nonlineer kaynak veya yüklerin sinüzoidal dalga biçimine dönüştürülebilmesi için, maliyetlerinin düşük olmasından dolayı genellikle pasif filtreler tercih edilmektedir. Fakat uygulamada pasif filtrelerden yararlanmak, çok sayıda dezavantaj barındırmaktadır. Bu dezavantajlar filtrelerdeki bobin, direnç, kondansatör elemanlarının belli bir süre içerisinde değerindeki ideal değerinden kayması neticesinde filtre ayar frekansında da kaymaların meydana gelmesi ve bunun bir sonucu olarak filtreleme işleminde azalmaların ortaya çıkmasıdır. Zaman içerisinde sistemdeki harmonik kaynaklı yüklerin artması sonucunda pasif filtrenin aşırı yüklenerek zarar göreceği ve sistemdeki elemanlar ile filtre elemanları arasında farklı harmonik frekanslarında seri ya da paralel rezonans oluşması ihtimali daha da artacaktır. Tüm bu negatif sebeplerden ötürü, ilerleyen yarı iletken teknolojileri ve kontrol sistemleri sayesinde aktif güç filtreleri geliştirilmiştir.

Elektrik güç sisteminde nonlineer yükler tarafından üretilen harmoniklerle aynı genlikte ancak ters fazda bir akımın güç sistemine enjekte edilmesi ve bu şekilde sürekliliğinin sağlanması, aktif güç filtreleriyle olmuştur. Bunu gerçekleştirebilmek için sistemdeki harmoniklerin belirlenerek, anahtarlama elemanının sürülebilmesi ve çeşitli kontrol düzenlerinin kullanılabilmesi adına güç elektroniği anahtarlama elemanları devreye alınmaktadır [54].

Sistemdeki harmoniklerin yok edilmesi için kullanılmasının yanı sıra, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim dengesizlikleri ve şebeke geriliminin regülasyonu için de seri aktif güç filtreleri kullanılırlar.

Pasif güç filtresi ve aktif güç filtre uygulamada ve maliyette kullanıcıya bazı avantaj ve dezavantajlar sunarlar. Bu avantaj ve dezavantajlar çizelge 1.2’de verilmiş ve pasif filtre ile aktif filtre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.2. Pasif ve aktif güç filtre karşılaştırılması [32]

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Harmonik Akımların Kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister.	Aynı anda birçok harmonik akımının kontrolü mümkündür.
Harmonik Frekanslarının Değişiminin Etkisi	Filtrenin etkinliği azalır.	Etkilenmez.
Akım Yükselmesi Riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.	Aşırı yüklenme riski yoktur.
Empedans Modifikasyonu Riski	Rezonans riski vardır.	Etkilenmez.
Sisteme Yeni Yük İlave Edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.	Herhangi bir probleme yol açmaz.
Sistemdeki Temel Dalga'nın Frekans Değişimi	Ayarlanması mümkün değil.	Ayar ile uyum mümkün.
Boyutlar ve Ağırlık	Harmonik genliğine ve derecesine göre çok değişken.	Oldukça küçük.
Maliyet	İlk maliyet düşük, orta vadede bakım maliyetleri yüksek.	İlk maliyet yüksek, orta vadede bakım maliyetleri düşük.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Modellemesi Yapılan Sistem

Bu bölümde, model alınan bir sistemde harmonik filtre uygulaması yapılmış ve sistem tarafından verilen cevaplar analiz edilmiştir. Simülasyonda MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Yapılan tez çalışması kapsamında, sistemde önceki bölümlerde tanımlanmış olan filtre çeşitlerinden seri aktif güç filtresinden yararlanılmıştır. Yükün fazlara dengeli bir biçimde dağıldığı kabul edilen örnek olarak alınan sistemde THD'nin düşürülmesi üzerinde durulmuştur. Sistem tasarımı için kullanılan MATLAB/Simulink programından bahsedilmesi bu noktada önem taşımaktadır. Yapılan analiz neticesinde grafikler incelenmiş, harmonik ve araharmonikler tespit edilip eliminasyonu yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak gösterilmiştir.

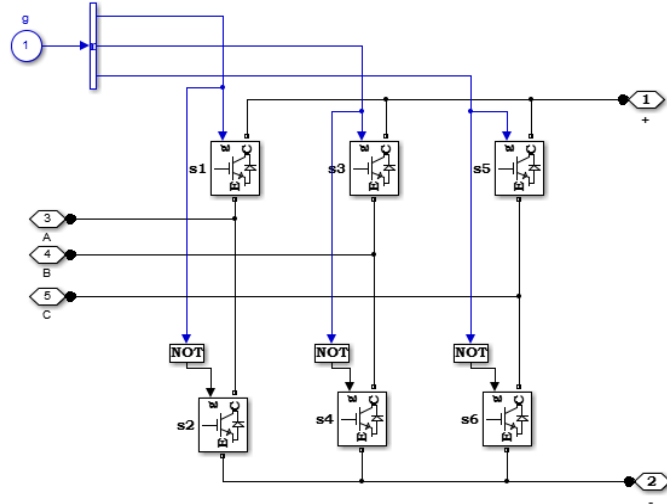
2.2. MATLAB/Simulink

Simulink, çok alanlı simülasyon ve model tabanlı tasarım için bir blok diyagram ortamıdır. Sistem düzeyinde tasarımı, simülasyonu, otomatik kod oluşturmaya ve gömülü sistemlerin sürekli test edilmesini ve doğrulanmasını destekler. Simulink, bir grafik editörü, özelleştirilebilir blok kütüphaneleri ve dinamik sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu için çözümler sağlar. Özetle, simulink ile kod yazmadan blok diyagramlar kullanılarak simülasyon yapılabilir. Simulink'in kullanıldığı alanlardan birkaçı aşağıdaki gibidir;

- Görüntü işleme uygulamaları
- Kontrol sistemleri (PID kontrolü)
- Sayısal işaret işleme.
- Elektrik devre çözümü
- Durum-uzay modelleri
- Transfer fonksiyonları

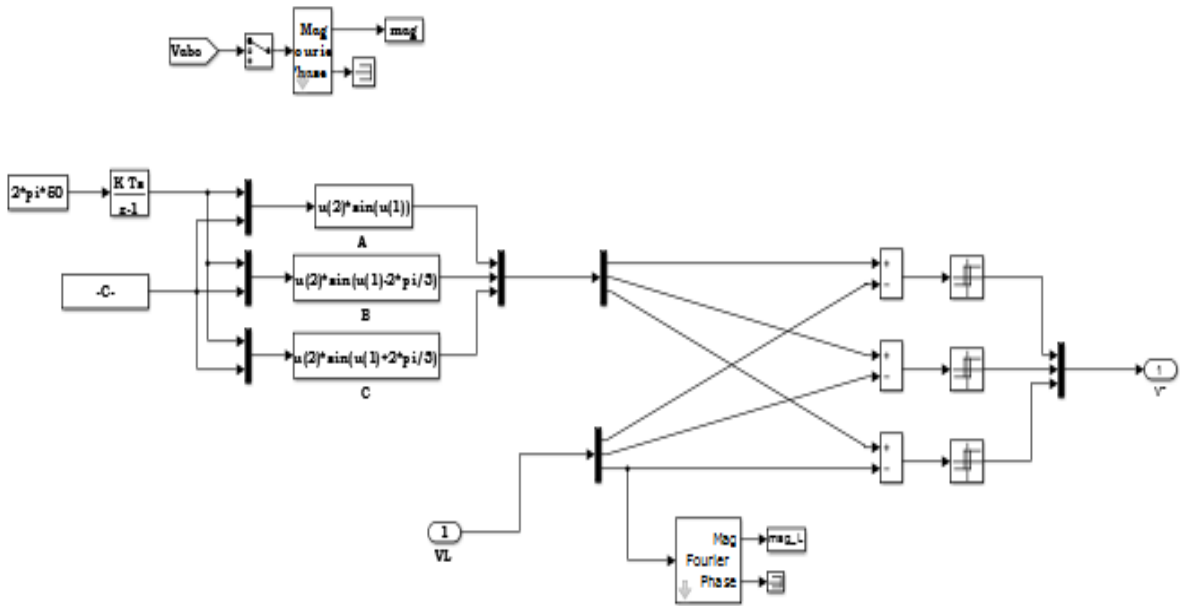
2.3. Seri Aktif Güç Filtresi Blok Şeması

Simulink ortamında kullanılan seri aktif güç filtresi, tetikleme blok şeması Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Seri aktif filtre tetikleme blok şeması

Şekil 2.2’de seri aktif güç filtrenin fourier dönüşümü simulink modellemesi ile oluşturulan iç yapısı blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.2. Seri aktif güç filtre iç yapısı blok şeması

2.4. Nonlineer Yükteki Parametre Seçimi

Seri aktif güç filtrenin ürettiği referans gerilimler aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir. Referans gerilimler aktif filtrenin ihtiyacı olan tetikleme sinyallerinin oluşturulması için

gereklidir. Anlık güç teorisine göre a-β düzleminde hesaplanan referans gerilimler daha sonra ters clarke dönüşümü ile 3 fazlı sistemdeki gerilimlere dönüştürülür.

Anlık güç eşitliği

$$P_a(t) = VI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - VI \sin \varphi \sin 2\omega t \quad (2.1)$$

ile ifade edilir [49].

Ortalama aktif güç değeri ise

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir.

a fazına ait akımın etkin değeri

$$I = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots)^{1/2} \quad (2.3)$$

eşitliği ile belirlenebilir [46].

üç faza ait görünür güç hesabı

$$S = 3VI \quad (2.4)$$

denklemleriyle tanımlanabilir [49].

Nonlineer yüklere ait reaktif ve harmonik güç hesaplamaları ise sırasıyla (2.5) ve (2.6) eşitlikleri ile tanımlanabilir [46].

$$Q = 3V I \sin \varphi \quad (2.5)$$

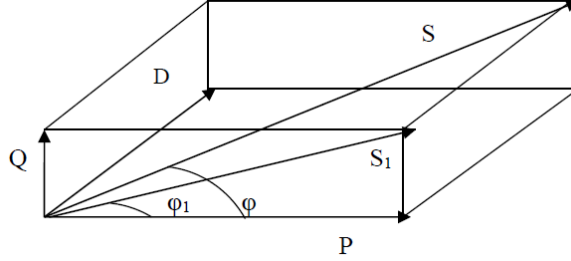
$$D = 3V (I_2^2 + I_3^2 + \dots)^{1/2} \quad (2.6)$$

Bu hesaplamaların ardından en son

$$S_2 = P_2 + Q_2 + D_2 \quad (2.7)$$

eşitliğindeki görünür güç ifadesi denklemi olarak ifade edilir [47].

Şekil 2.3 ile (2.7) eşitliğiyle güç dörtyüzlüsü verilmektedir.



Şekil 2.3. Güç Dörtyüzlüsü

Toplam güç katsayısı

$$\cos \varphi = P/S \quad (2.8)$$

Formülüyle belirlenir [49].

Clarke dönüşümü ile anlık güçler hesaplanmaktadır. Bu yöntemde üç faza ait akım ve gerilim ifadeleri cebir işlemlerle iki fazlı bir yapıya çevrilmektedir. Bu dönüşüm (2.9) ve (2.10) ile verilmektedir [49].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Anlık aktif güç eşitliğine ait ifade

$$P_3 = V_\alpha \cdot I_\alpha + V_\beta \cdot I_\beta \quad (2.11)$$

olarak belirtilir [48].

Anlık reaktif güç tanımı ise

$$Q_3 = V_\beta \times \dot{I}_\alpha - V_\alpha \times \dot{I}_\beta \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir [49].

$$\begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a & I_\beta \\ -I_\beta & I_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Şeklindeki anlık gerilim ve anlık akım değerleri yardımıyla anlık güçler belirlenir [50].

Anlık gerilimlerin elde edilişi

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a & I_\beta \\ -I_\beta & I_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ifadesiyle tanımlanır [46].

Anlık gerilimler ile referans gerilimler hesaplanmaktadır.

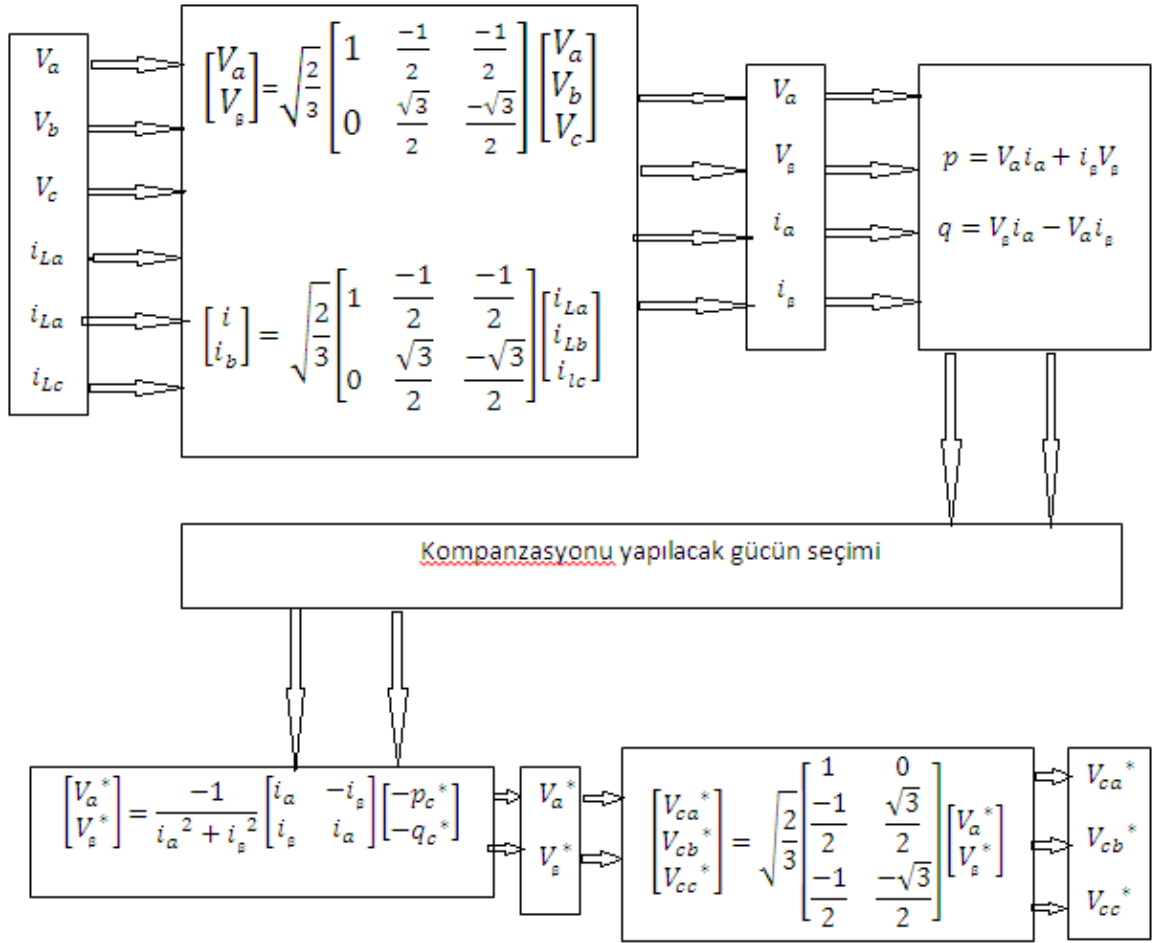
$$\begin{bmatrix} V_{ca*} \\ V_{cb*} \\ V_{cc*} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ca*} \\ V_{cb*} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

denklemlerle de elde edilen gerilimler a-β düzleminden üç fazlı V_{ca*} , V_{cb*} , V_{cc*} referans gerilimlerine dönüştürülmektedir [49].

Bu ifadeyle gerilim değerlerinin cebirsel işlemle a-β düzleminden üç fazlı V_{ca*} , V_{cb*} , V_{cc*} referans gerilimlere dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Referans gerilimleri ile seri aktif güç filtresinin ihtiyacı olan tetikleme sinyalleri üretilmektedir.

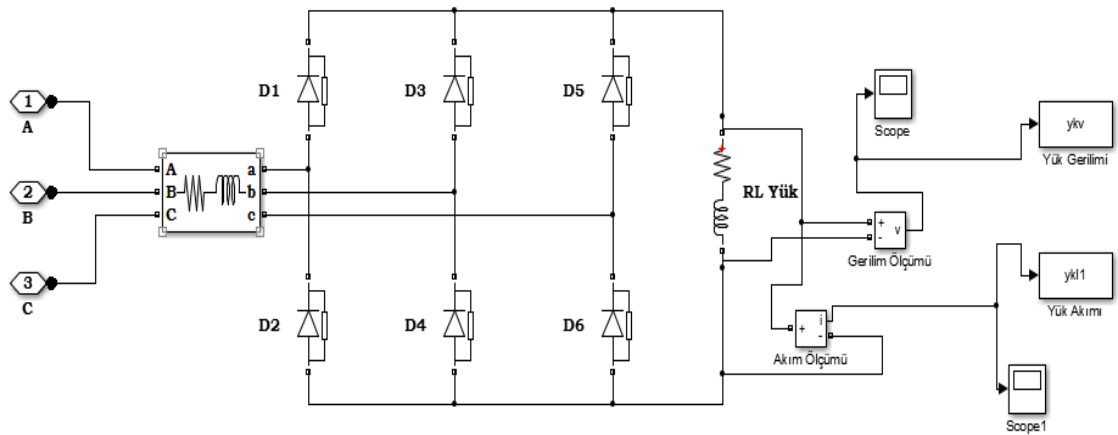
3 fazlı seri aktif güç filtresinin referans gerilimleri ile tetikleme sinyalinin üretiminin anlaşılması için p-q teorisiyle de blok diyagramlar kullanılarak güç seçimi gösterilmiştir. Eşlenik p-q teorisi kullanılarak, kompanzasyon gerilimleri, şebekeden çekilen akım ve güç bileşenlerinin nasıl belirlendiği blok diyagram ile gösterilmiştir.

Şekil 2.4'de 3 fazlı seri aktif güç filtresinin kontrol yapısına yönelik oluşturulmuş blok diyagram gösterilmiştir.



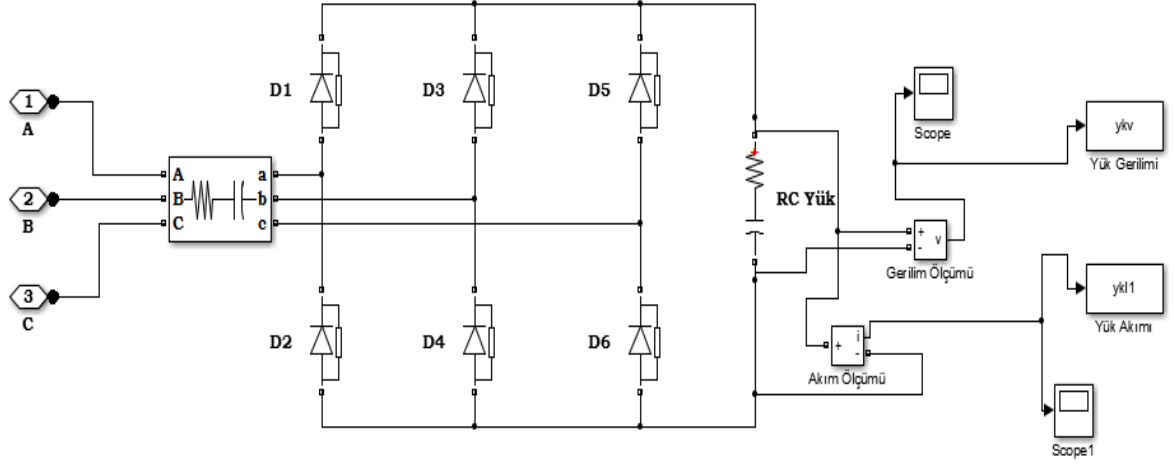
Şekil 2.4. 3 fazlı aktif güç filtresi temel kontrol blokları

Şekil 2.5’de Nonlinear endüktif yükün Matlab/Simulink blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.5. Nonlinear endüktif yük Matlab/Simulink şeması

Şekil 2.6’da Nonlinear kapasitif yükün Matlab/Simulink blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.6. Nonlinear kapasitif yük Matlab/Simulink şeması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Örnek Sistem Modellemesi

Buradaki incelemede Matlab/Simulink programında örnek alınan sistemin seri aktif güç filtre ile modellemesi ve simülasyonu yapılarak harmonik ve araharmonik bozulması incelenmiş ve eliminasyonu yapılmıştır. Çizelgeler halinde veriler sunulmuş, karşılaştırılarak sonuçlar gösterilmiştir.

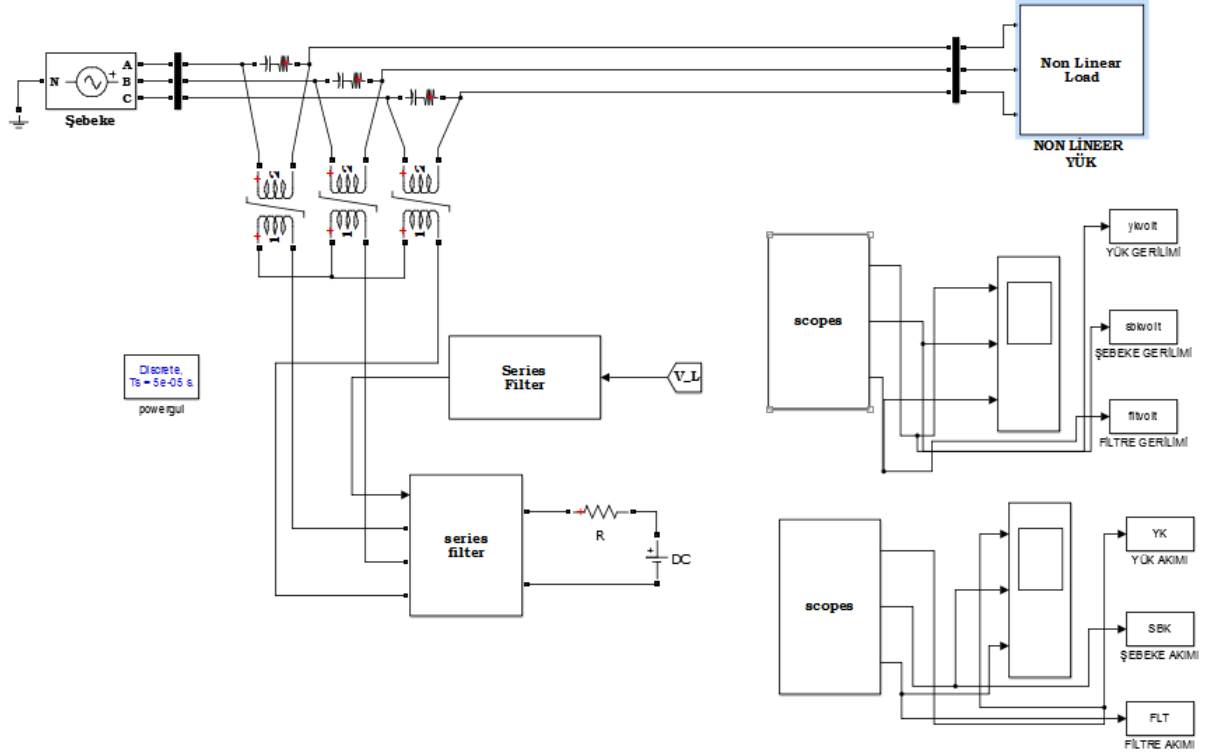
İncelenen modül yapı gerilimin üç fazlı bir dağıtım şebekesinden alındığı, fazların herbirinin 380 V AC olarak alındığı, yükün fazlara eşit olarak dağıldığı bir sistemdir. Nonlineer yükün R değeri 55 Ω , L değeri $20 \cdot 10^{-3}$ H olan bir RL yüküne karşı ve nonlineer yükün R değeri 55 Ω , C değeri $5 \cdot 10^{-6}$ uF olan bir RC yüküne karşı filtreleme yapılmıştır. Seçilen sistem parametreleri çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Harmonik ve araharmoniklere, n. harmonik gözetimi yapmadan bütün harmoniğe karşı koyma özelliği olan, 500 V DC gerilim ile beslenen seri aktif güç filtresi kullanılarak farklı yüklere karşı filtreden önce ve filtreden sonraki harmonik, araharmonik analizi incelenmiştir. Güç sisteminde seri aktif güç filtresi kullanıldığından gerilim dalgalanmalarındaki dengesizlik ve eliminasyon incelenmiştir. Akım harmoniğinin de sistemde olmamasından kaynaklı buna karşı bir değerlendirme yapılamamıştır. Sistemdeki mevcut değeri ile filtre ile çalışması grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Sistem modüle edilirken SAGF parametreleri

SAGF PARAMETRELERİ	DEĞER
Kaynak Gerilimi ve Akımı (Va, Vb, Vc, Ik)	380 V, 60A
Kaynak Frekansı	50 Hz
Kaynak Empedansı (Rk, Ck)	1 Ω ,100e-6 F
Yük Empedansı (Ry, Ly)	55 Ω , 0.20e-3 H
Yük Empedansı (Ry, Cy)	55 Ω ,5e-6 F

Sistemdeki seri aktif güç filtre için tetikleme gerilimleri ve kontrol algoritması önceki kısımda belirtilmiştir. Çalışmanın amacı harmonik ve araharmoniklerin modüle edilerek belirlenmesi ve harmoniklerin yok edilmesi olduğundan filtrenin şekil 3.1’de verilen güç sistemi MATLAB/Simülink programında sistem yükü tasarlanarak analiz için sonuçlar elde

edilmiştir. Filtrenin değişen gerilim karşısındaki tolerasyon aralığı tespit edilmiş olup analiz sonucunda istenmeyen gerilim dengesizlikleri yok edilmiştir. Şekil 3.1’de Güç sistemi Matlab/Simulink şeması verilmiştir.

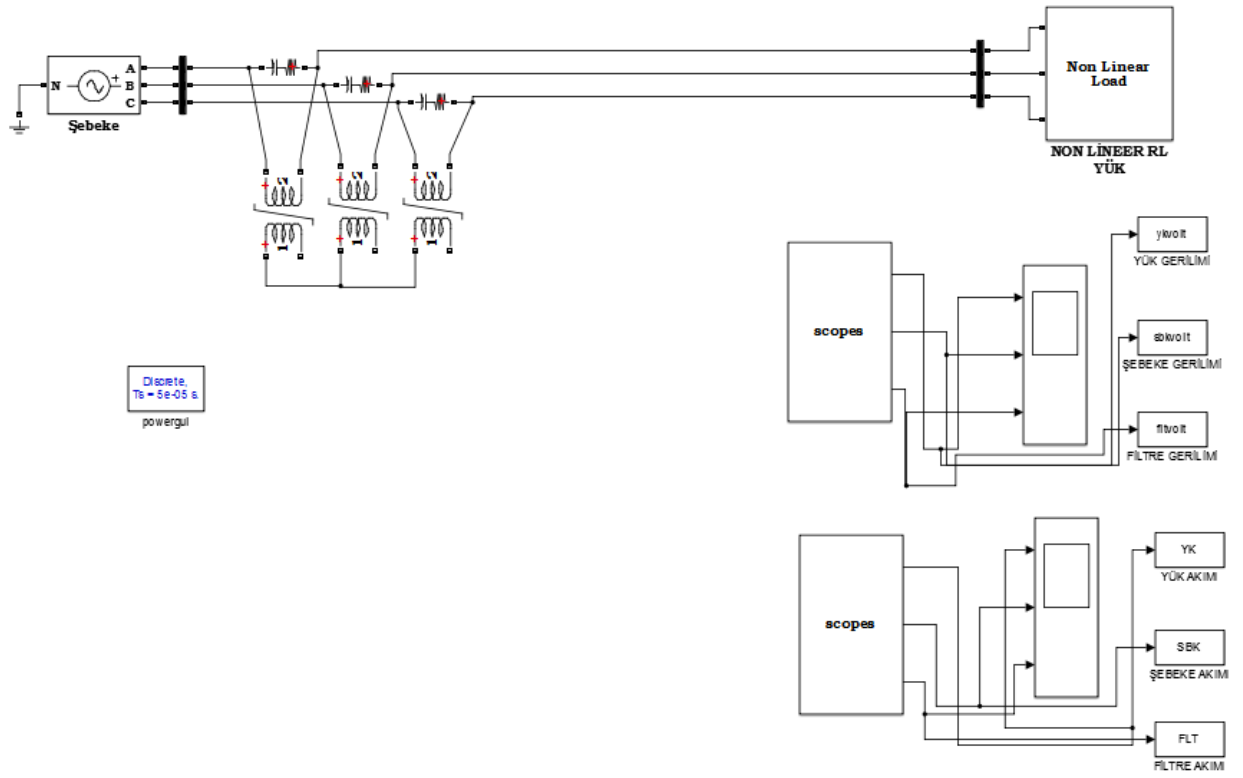


Şekil 3.1. Güç sistemi Matlab/Simulink şeması

3.2. Seri Aktif Güç Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar

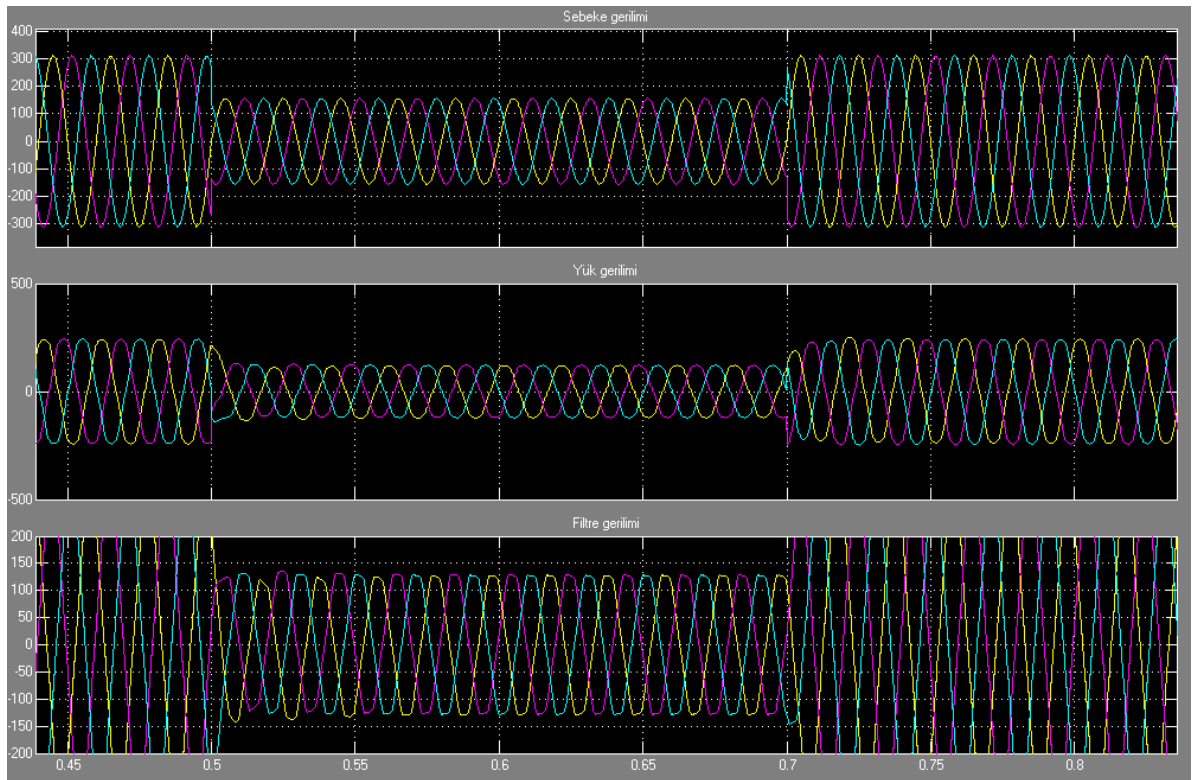
3.2.1. Endüktif Yükte Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmolik Bozulmalar

Şekil 3.2.’de Nonlineer endüktif yüklü , filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması verilmiştir.



Şekil 3.2. Nonlineer endüktif yüklü, filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması

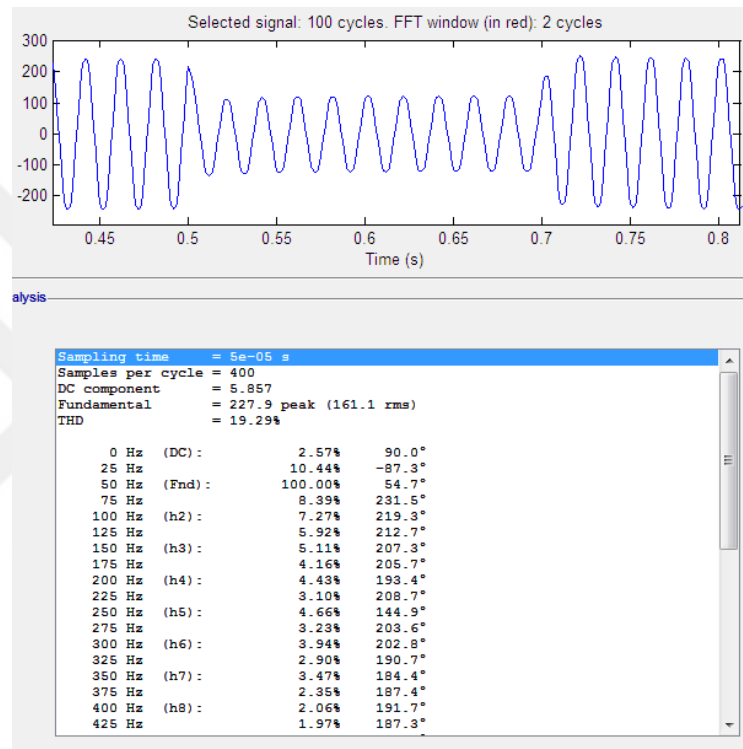
Şekil 3.3’de endüktif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri sunulmuştur.



Şekil 3.3. Endüktif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri

Şekil 3.3'e bakacak olursak yük geriliminin filtresiz sisteme ait olduğu gerilim dalga verilerinin örnek zaman olarak (0.4-0.8) t sürelerinde harmoniğe maruz kalarak genliğinin düştüğünü 250 V'tan 150 V'a düştüğü ve sinüzoidal dalga şeklini koruyamayıp, filtremizin devrede olmadığı için gerekli ters fazda sisteme akım gönderip regüle yapamadığı görülmektedir.

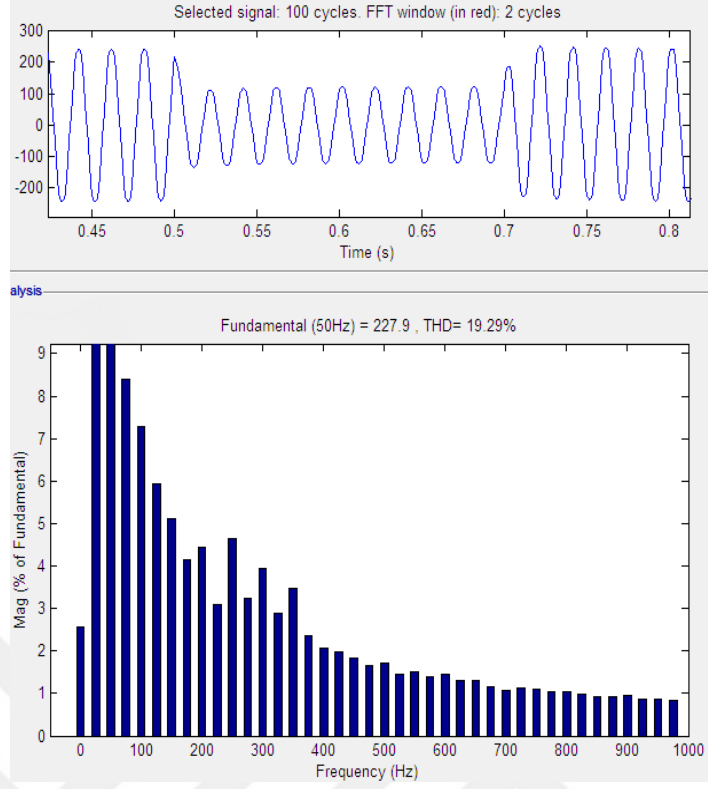
Şekil 3.4'te endüktif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi genlik analiz diyagramı sunulmuştur.



Şekil 3.4. Endüktif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi genlik analiz diyagramı

Şekil 3.4'e bakacak olursak filtrelenmemiş sistemin FFT sistemi analiz diyagramında görülen THD_v oranının %19.29'da olduğu ve n. harmoniğin dışındaki araharmoniklerinde varlığının olduğu gözükmemektedir. Sistemdeki bozulmayı gösterebilmek, harmonik ve araharmonikteki karşılaştırmayı ve harmoniklerin yok edilmesini daha iyi gösterebilmek için seri aktif güç filtresi devredeyken incelenmiş ve sonuçlar yansıtılmıştır.

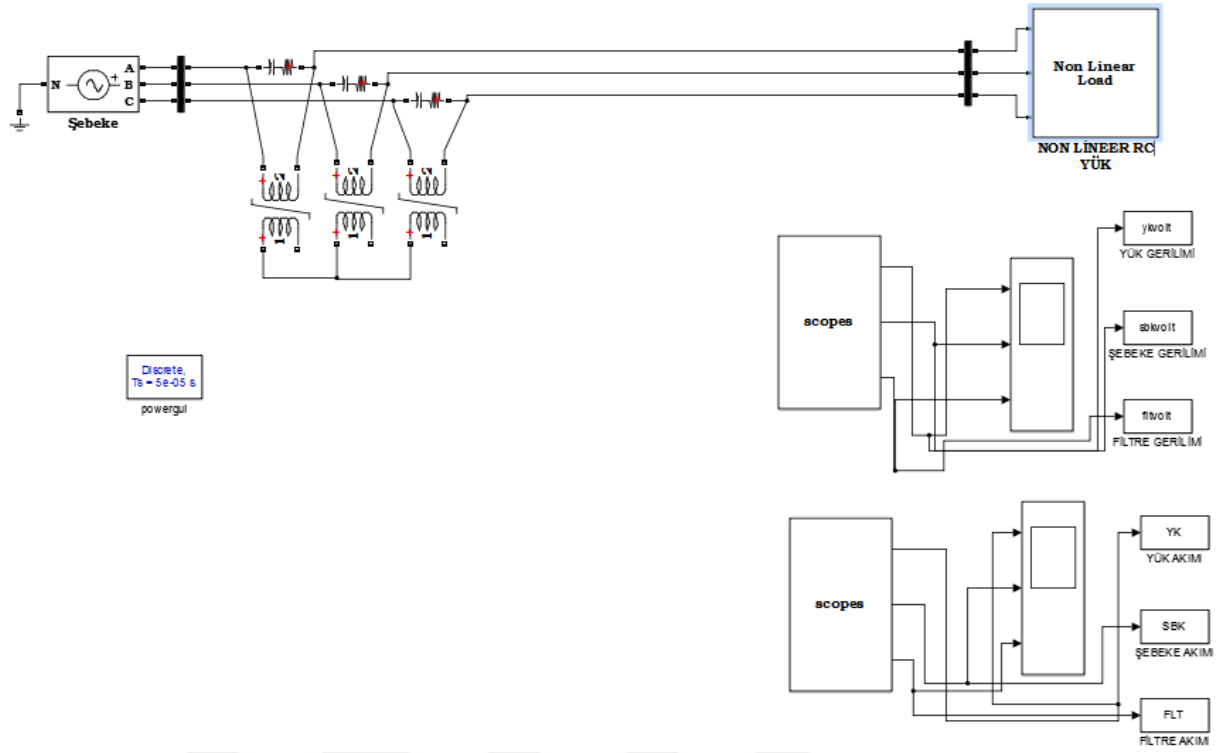
Şekil 3.5'te endüktif yüklü filtresiz güç sisteminin FFT sistemi ile genlik spektrumu görünümü ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Endüktif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi genlik spektrumu

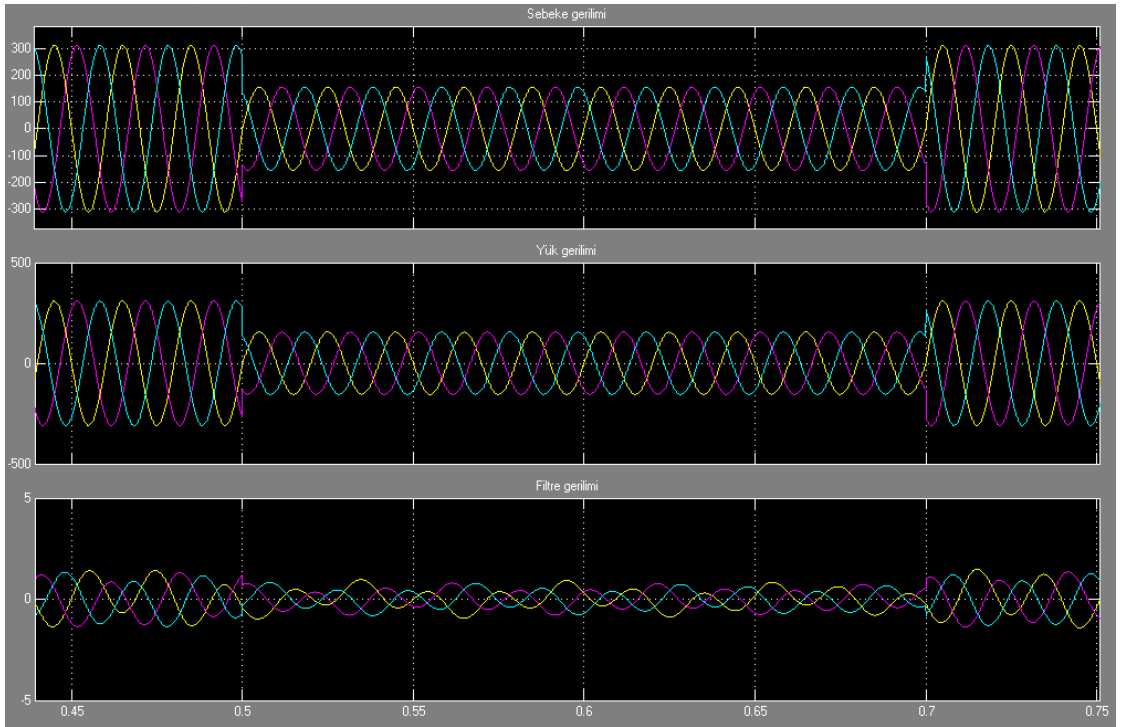
3.2.2. Kapasitif Yükle Filtresiz Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmik Bozulmalar

Şekil 3.6.'da Nonlineer kapasitif yüklü , filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması verilmiştir.



Şekil 3.6. Nonlineer kapasitif yüklü, filtresiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması

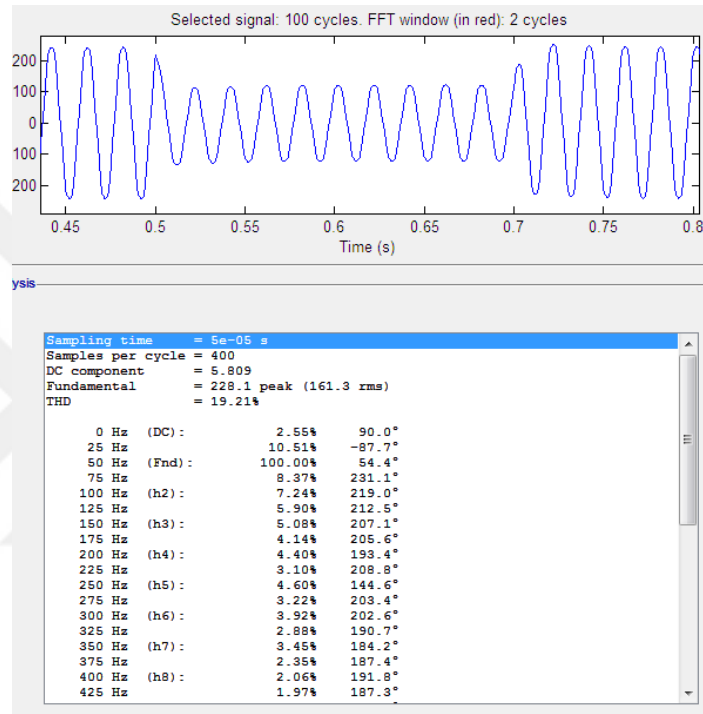
Şekil 3.7’de kapasitif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri sunulmuştur.



Şekil 3.7. Kapasitif yüklü filtresiz sisteme ait gerilim dalga verileri

Şekil 3.7'ye bakacak olursak yük geriliminin filtresiz sisteme ait olduğu gerilim dalga verilerinin örnek zaman olarak (0.4-0.8) t sürelerinde harmoniğe maruz kalarak genliğinin düştüğünü 250 V'tan 150 V'a düştüğü ve sinüzoidal dalga şeklini koruyamayıp, filtremizin devrede olmadığı için gerekli ters fazda sisteme akım gönderip regüle yapamadığı görülmektedir.

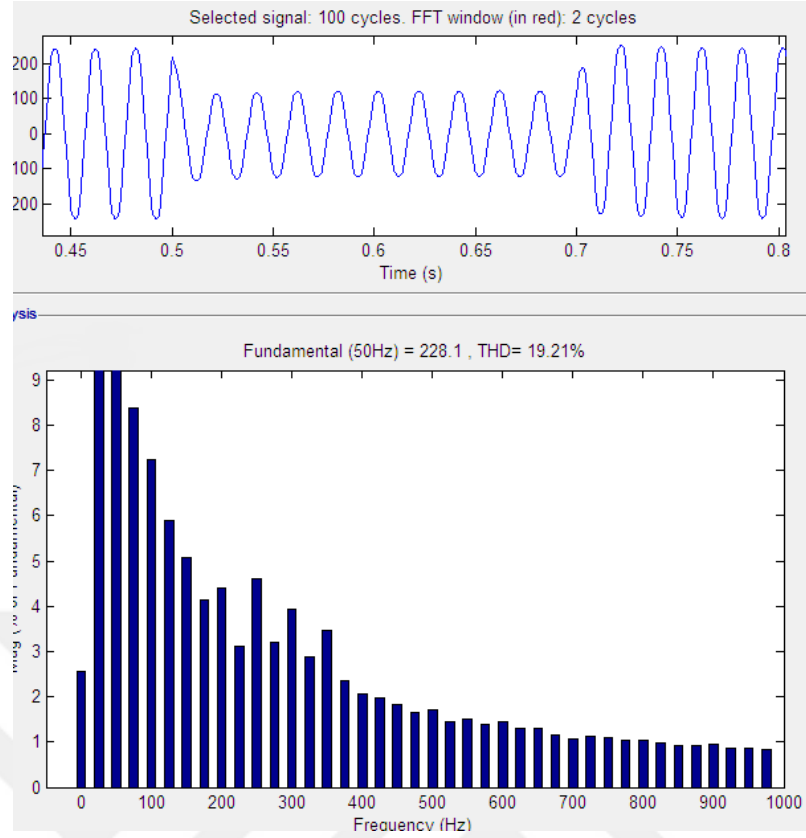
Şekil 3.8'de kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi analiz diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8. Kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi analiz diyagramı

Şekil 3.8'e bakacak olursak filtrelenmemiş sistemin yine FFT sistemi analiz diyagramına bakılırsa görülen THD_v oranının %19.21 olduğu ve n. harmoniğin dışındaki araharmoniklerinde varlığının olduğu görülmektedir. Sistemdeki bozulmayı gösterebilmek, harmonik ve araharmonikteki karşılaştırmayı ve harmoniklerin yok edilmesini daha iyi gösterebilmek için seri aktif güç filtresi devredeyken incelenmiş ve sonuçlar yansıtılmıştır.

Şekil 3.9'da kapasitif yüklü filtresiz güç sisteminin FFT sistemi ile genlik spektrumu görünümü gösterilmektedir.

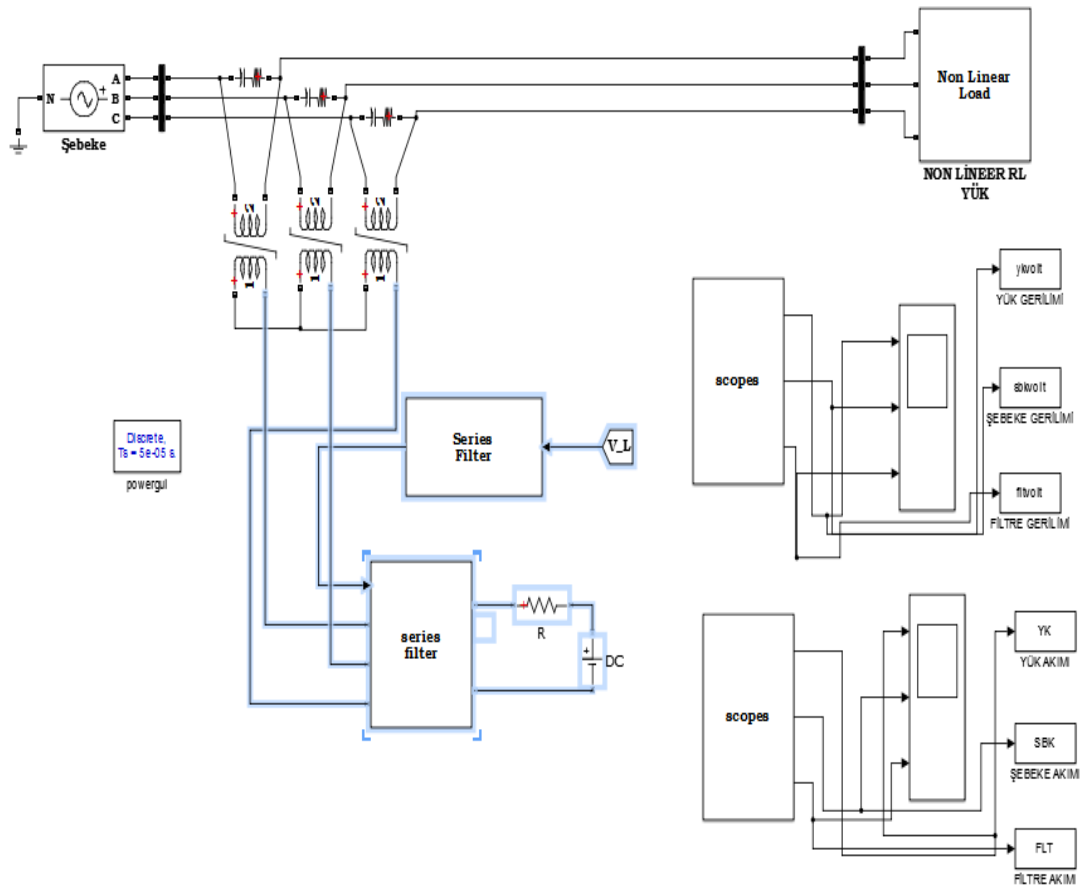


Şekil 3.9. Kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi genlik spektrumu

3.3. Seri Aktif Güç Filtreli Oluşan Harmonik ve Araharmik Bozulmalar

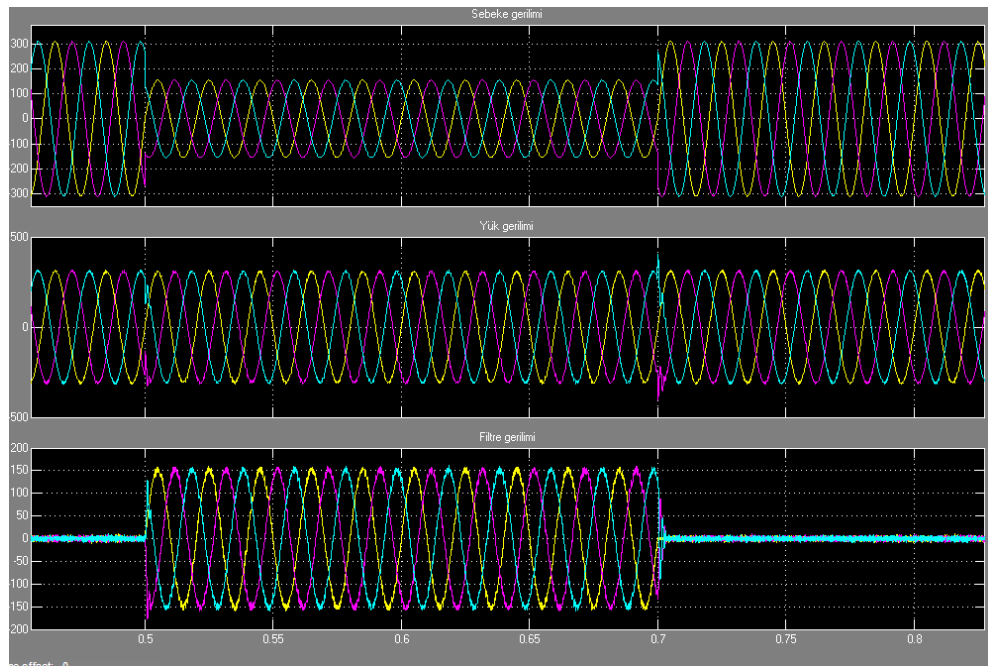
3.3.1. Endüktif Yükle Filtreli Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmik Bozulmalar

Şekil 3.10'da SAGF filtreli endüktif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması verilmiştir.



Şekil 3.10. SAGF filtreli endüktif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması

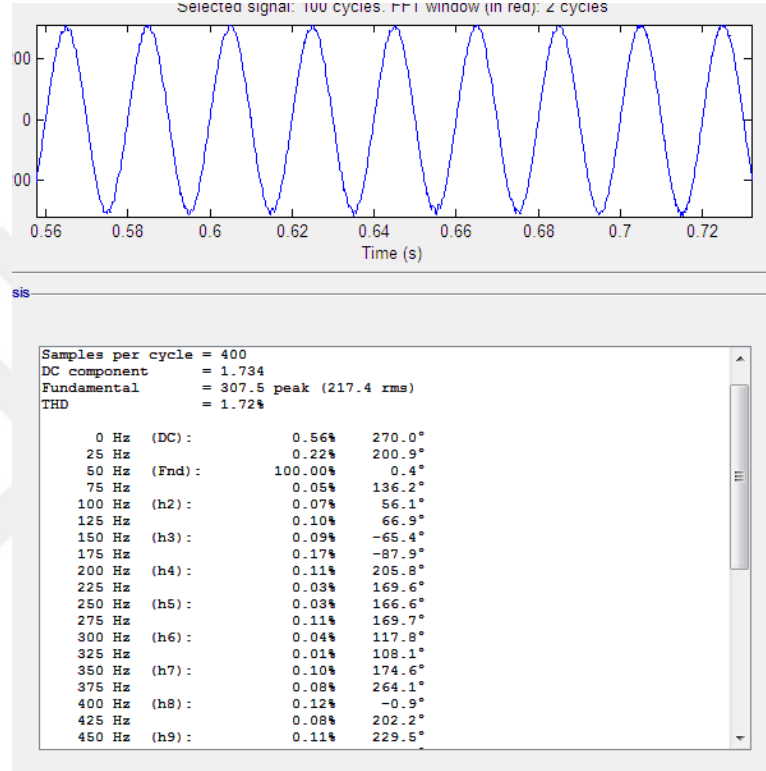
Şekil 3.11’de endüktif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri sunulmuştur.



Şekil 3.11. Endüktif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri

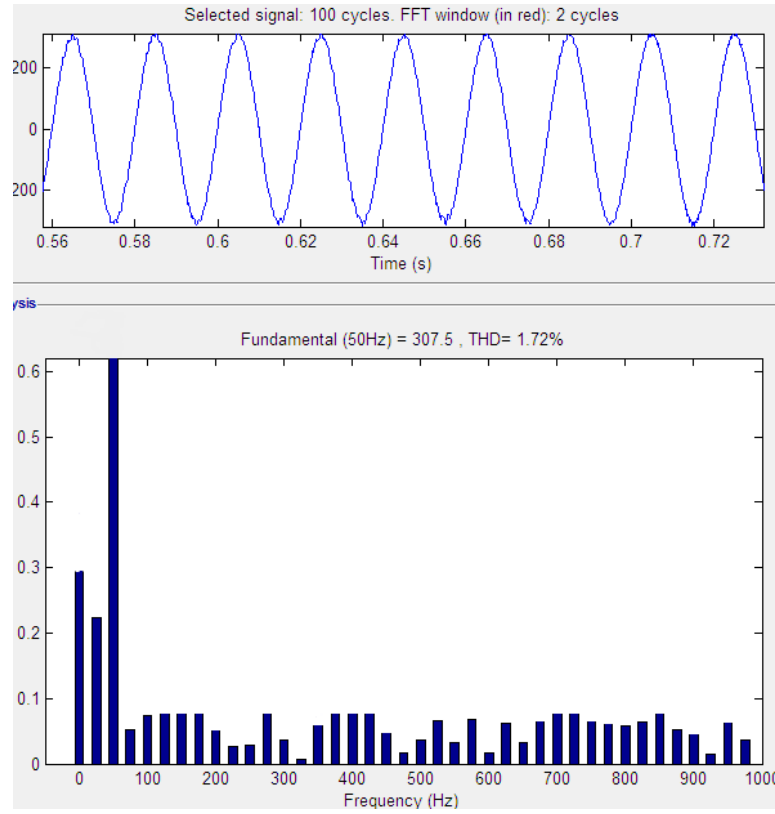
Şekil 3.11'e bakarsak seri aktif güç filtresi endüktif yükteki sistemde varken gerilim dalga verisinin stabilizasyonu için örnek zaman olarak (0.4-0.8) t aralıklarında yük için 250 V'daki gerilimi korumak için genlik değerlerinin dengeye girebilmesi için 100 V luk genlik arttırıp harmoniklere karşı koyduğu görülmektedir.

Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi analiz diyagramı şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi analiz diyagramı

Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi genlik spektrumu şekil 3.13'de verilmiştir.

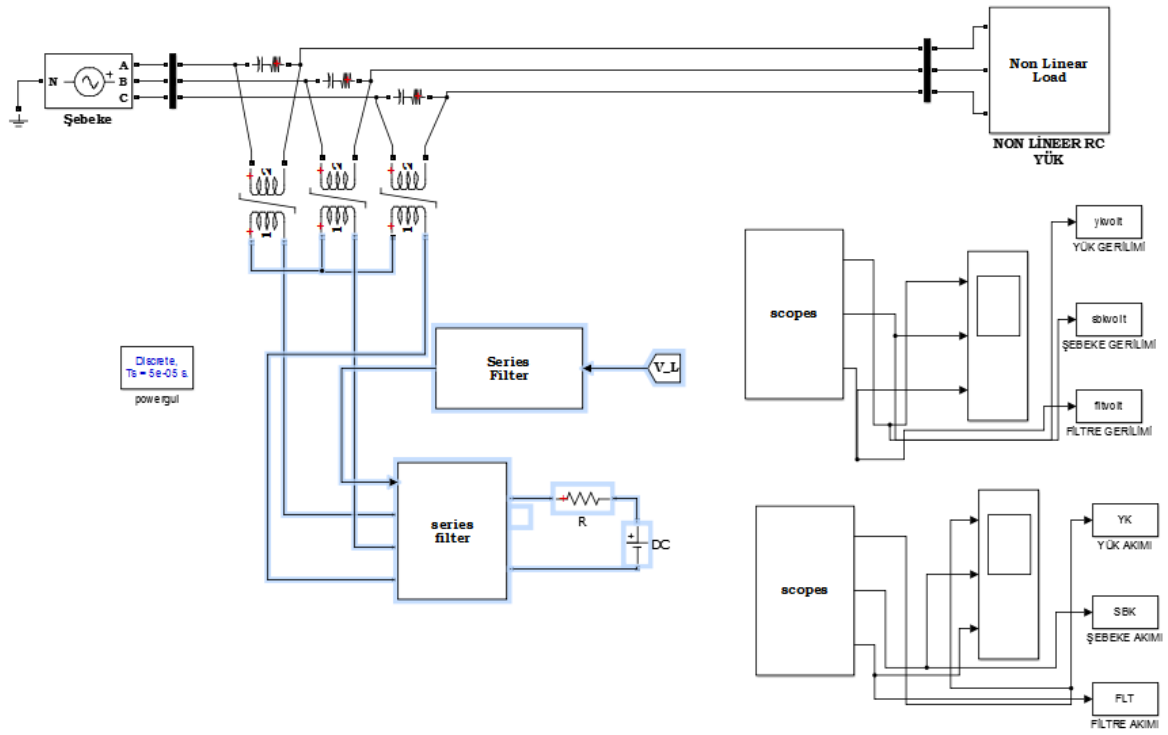


Şekil 3.13. Endüktif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik spektrumu

Şekil 3.12’de analiz diyagramından ve şekil 3.13’de genlik spektrumundan endüktif yüklü sistem için örnek verecek olursak (0.5-0.7) t sürelerinde genliğini koruduğunu 3., 5., 7., 9. harmonikleri sıfırlara çektiğini arada kalan yarım değerli 3.5, 4.5, 5.5, 7.5’deki değerlerde de araharmonik tanımladığımız nonlinear dengesizliklerin elimine edildiği gözükmemektedir. Bilgiler 3 fazlı yük sisteminden alındı. Sistem için temel frekans 50 Hz’dir. Seri aktif güç filtre devredeyken sinüzoidal dalga formunu koruduğu ve nonlinear yüke karşı koyup harmonik ve araharmonikleri yok ettiği ayrıntılı olarak kapasitif yüklü sistemdeki bozulmadan sonraki bölümde incelenmiştir.

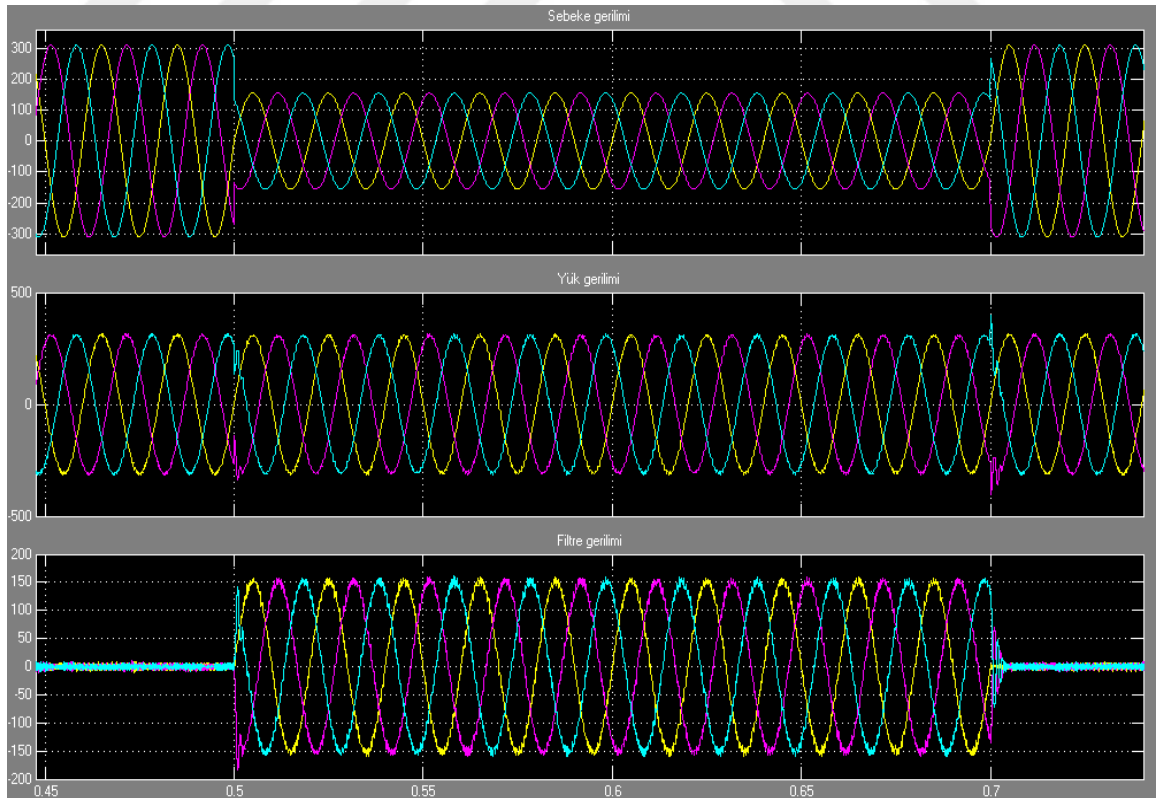
3.3.2. Kapasitif Yükle Filtreli Sistemde Oluşan Harmonik ve Araharmonik Bozulmalar

Şekil 3.14’de SAGF filtreli kapasitif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması verilmiştir



Şekil 3.14. SAGF filtreli kapasitif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması

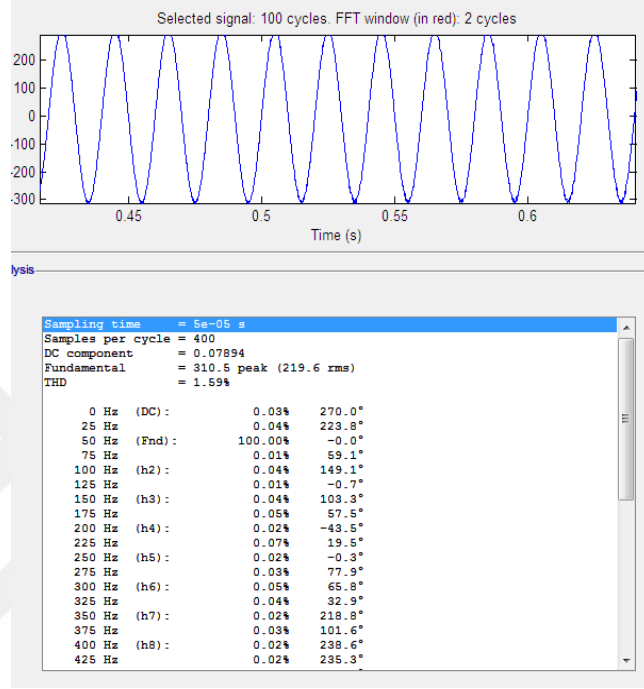
Şekil 3.15’de kapasitif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Kapasitif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri

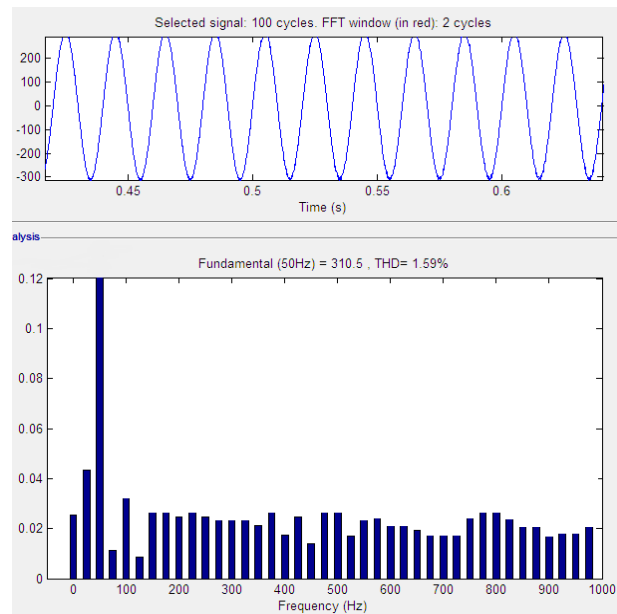
Şekil 3.15'e bakacak olursak seri aktif güç filtresi kapasitif yükteki sistemde varken gerilim dalga verisinin stabilizasyonu için örnek zaman olarak (0.4-0.8) t aralıklarında yük için 250 V'daki gerilimi korumak için genlik değerlerinin dengeye girebilmesi için 100 V luk genlik arttırıp harmoniklere karşı koyduğu görülmektedir.

Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi analiz diyagramı şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistem analiz diyagramı

Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi genlik spektrumu şekil 3.17'de verilmiştir.

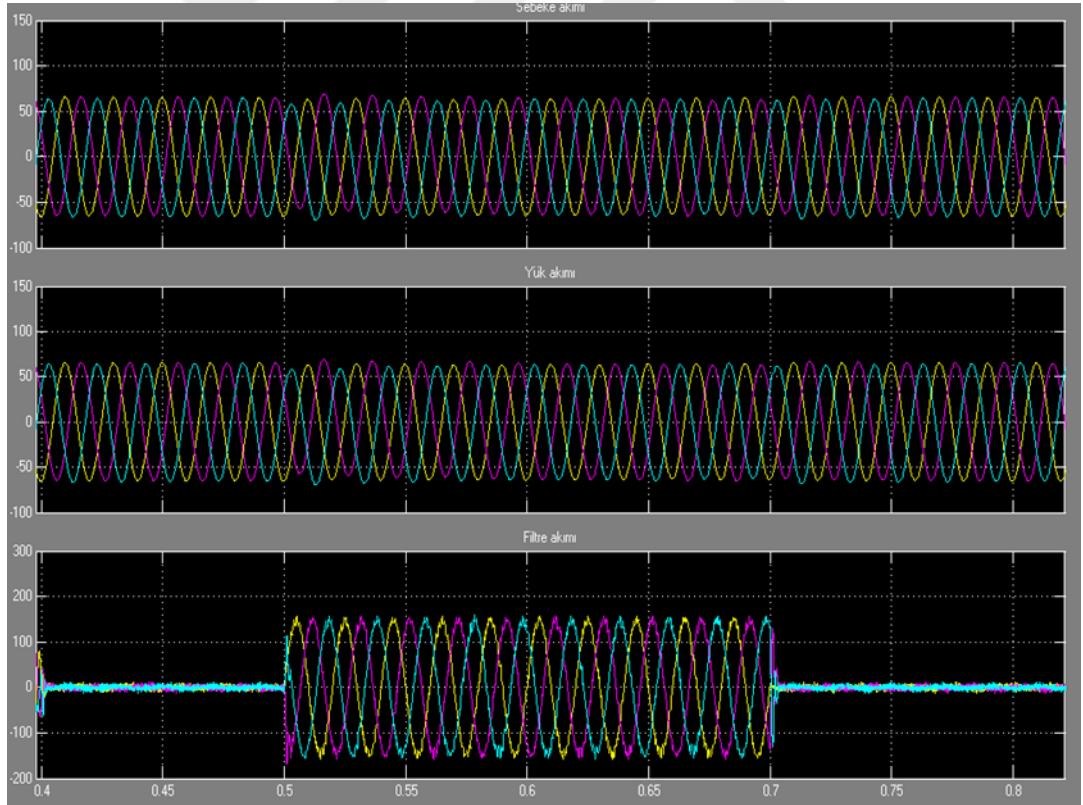


Şekil 3.17. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistem genlik spektrumu

Şekil 3.16’da analiz diyagramından ve Şekil 3.17’de genlik spektrumundan kapasitif yüklü sistem için örnek verecek olursak (0.5-0.7) t sürelerinde genliğini koruduğunu 3., 5., 7., 9. harmonikleri sıfırlara çektiğini arada kalan yarım değerli 3.5, 4.5, 5.5, 7.5’deki değerlerde de araharmonik tanımladığımız nonlinear dengesizliklerin elimine edildiği gözükmemektedir. Bilgiler 3 fazlı yük sisteminden alındı. Sistem için temel frekans 50 Hz’dir. Seri aktif filtre devredeyken sinüzoidal dalga formunu koruduğu ve nonlinear yüke karşı koyup harmonik ve araharmonikleri yok ettiği yine ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde incelenmiştir.

3.4. Sistemin Çalışma Esnasındaki Harmonik ve Araharmoniklerin Tespiti ve Eliminasyonu

Şekil 3.18’de farklı yükteki sistemin akım dalga verileri gösterilmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi akım harmoniğinin sistemde olmaması ve bundan dolayı herhangi bir eliminasyon gerçekleştirilememesi şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Farklı yükteki güç sistemindeki akım dalga verileri

FFT analizi ile sistemin filtreye karşı vermiş olduğu sonuçları ayrıntılı şekilde liste halinde yapılmış ve gösterilmiştir. Harmonikler ve seçilen araharmonikleri için filtreden önceki yük uçlarından ve filtreyi kullandıktan sonraki yük uçlarından analizi yapıp çizelge halinde sunulmuştur. Birkaç noktadan karşılaştırma yapılarak gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de SAGF’tan önceki endüktif yük ucunun, çizelge 3.3’te SAGF’tan sonraki endüktif yük ucunun, çizelge 3.4’de SAGF’tan önceki kapasitif yük ucunun, çizelge 3.5’te SAGF’tan sonraki kapasitif yük ucunun ve çizelge 3.6’da filtreden önceki ve filtreden sonraki elde edilen veriler karşılaştırılarak sistem değerleri sunulmuştur. Alınan FFT analiziyle harmonikler için sonuçların hem çok düşük seviyeye getirildiği hemde seri aktif güç filtresi sistemdeyken harmonikleri elimine ettiği tespit edilmiş olup karşılaştırmalar çizelgeler halinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Filtreden önceki endüktif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time = 5e-05 s			
Samples per cycle = 400			
DC component = 5.857			
Fundamental = 227.9 peak (161.1 rms)			
THD = 19.29%			
0 Hz (DC) :	2.57%	90.0°	
25 Hz	10.44%	-87.3°	
50 Hz (Fnd) :	100.00%	54.7°	
75 Hz	8.39%	231.5°	
100 Hz (h2) :	7.27%	219.3°	
125 Hz	5.92%	212.7°	
150 Hz (h3) :	5.11%	207.3°	
175 Hz	4.16%	205.7°	
200 Hz (h4) :	4.43%	193.4°	
225 Hz	3.10%	208.7°	
250 Hz (h5) :	4.66%	144.9°	
275 Hz	3.23%	203.6°	
300 Hz (h6) :	3.94%	202.8°	
325 Hz	2.90%	190.7°	
350 Hz (h7) :	3.47%	184.4°	
375 Hz	2.35%	187.4°	
400 Hz (h8) :	2.06%	191.7°	
425 Hz	1.97%	187.3°	

Çizelge 3.3. Filtreden sonraki endüktif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time	=	5e-05 s
Samples per cycle	=	400
DC component	=	1.734
Fundamental	=	307.5 peak (217.4 rms)
THD	=	1.72%
0 Hz (DC) :	0.56%	270.0°
25 Hz	0.22%	200.9°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	0.4°
75 Hz	0.05%	136.2°
100 Hz (h2) :	0.07%	56.1°
125 Hz	0.10%	66.9°
150 Hz (h3) :	0.09%	-65.4°
175 Hz	0.17%	-87.9°
200 Hz (h4) :	0.11%	205.8°
225 Hz	0.03%	169.6°
250 Hz (h5) :	0.03%	166.6°
275 Hz	0.11%	169.7°
300 Hz (h6) :	0.04%	117.8°
325 Hz	0.01%	108.1°
350 Hz (h7) :	0.10%	174.6°
375 Hz	0.08%	264.1°
400 Hz (h8) :	0.12%	-0.9°
425 Hz	0.08%	202.2°

Çizelge 3.4. Filtreden önceki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time	=	5e-05 s
Samples per cycle	=	400
DC component	=	5.809
Fundamental	=	228.1 peak (161.3 rms)
THD	=	19.21%
0 Hz (DC) :	2.55%	90.0°
25 Hz	10.51%	-87.7°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	54.4°
75 Hz	8.37%	231.1°
100 Hz (h2) :	7.24%	219.0°
125 Hz	5.90%	212.5°
150 Hz (h3) :	5.08%	207.1°
175 Hz	4.14%	205.6°
200 Hz (h4) :	4.40%	193.4°
225 Hz	3.10%	208.8°
250 Hz (h5) :	4.60%	144.6°
275 Hz	3.22%	203.4°
300 Hz (h6) :	3.92%	202.6°
325 Hz	2.88%	190.7°
350 Hz (h7) :	3.45%	184.2°
375 Hz	2.35%	187.4°
400 Hz (h8) :	2.06%	191.8°
425 Hz	1.97%	187.3°

Çizelge 3.5. Filtreden sonraki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time	=	5e-05 s
Samples per cycle	=	400
DC component	=	0.07894
Fundamental	=	310.5 peak (219.6 rms)
THD	=	1.59%
0 Hz (DC) :	0.03%	270.0°
25 Hz	0.04%	223.8°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	-0.0°
75 Hz	0.01%	59.1°
100 Hz (h2) :	0.04%	149.1°
125 Hz	0.01%	-0.7°
150 Hz (h3) :	0.04%	103.3°
175 Hz	0.05%	57.5°
200 Hz (h4) :	0.02%	-43.5°
225 Hz	0.07%	19.5°
250 Hz (h5) :	0.02%	-0.3°
275 Hz	0.03%	77.9°
300 Hz (h6) :	0.05%	65.8°
325 Hz	0.04%	32.9°
350 Hz (h7) :	0.02%	218.8°
375 Hz	0.03%	101.6°
400 Hz (h8) :	0.02%	238.6°
425 Hz	0.02%	235.3°

Çizelge 3.6. Farklı yüklerle karşı sistemin Gerilim ve THD_v değerleri

SİSTEM		SİSTEM GERİLİM THD _v (%)	SİSTEM GERİLİM (V)
Endüktif	Filtresiz	19.29	217.4 RMS
	Filtreli	1.72	161.1 RMS
Kapasitif	Filtresiz	19.21	219.6 RMS
	Filtreli	1.59	161.3 RMS

Sistem incelendiğinde alınan verilerin çizelge 3.2'nin, çizelge 3.3'ün, çizelge 3.4'ün ve çizelge 3.5'in ayrıntılı analizi, önemli bilgilerin edinilmesini sağlamıştır. Harmonik ve araharmonik değerlerin eliminasyonunun görülmesini sağlamıştır. Harmonik ve araharmonik bozulma değerleri farklı yükler için karşılaştırmalı gösteriminde elde edilen kazanımlar sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Endüktif yükün SAGF’a karşı vermiş olduğu gerilim sonuç değerleri

HARMONİK	YÜKTEKİ FİLTREDEN ÖNCE HARMONİK BOZULMA (%)	YÜKTEKİ FİLTREDEN SONRA HARMONİK BOZULMA (%)
3	5.11	0.09
3.5	4.16	0.17
5	4.66	0.03
5.5	3.23	0.11
7	3.47	0.10
7.5	2.35	0.08

Çalışmanın daha iyi anlaşılması için sonuçları çizelge 3.7’de ve çizelge 3.8’de verilmiştir. Çizelge 3.7’den örnek verecek olursak, endüktif yükteki seri aktif güç filtresi kullanmadan önce 3. harmonikteki bozulma %5.11’dir. Seri aktif güç filtrenin sisteme alınmasıyla 3. harmonikteki bozulma filtrenin eliminasyonu ile %0.09’a düşmüştür. Endüktif yük ucundaki araharmonik olarak tanımlanan yani tamsayı değerine denk gelmeyen 3.5’teki harmonik bozulmaya bakılacak olursa bozulmanın %4.16 iken seri aktif güç filtre sisteme alınıp bakacak olursak bu harmoniğe de %0.17’lik orana düşürerek karşılık verilmiştir. Yani harmonik olarak işleme alınmadığı bozulmada bile harmoniklerin varlığını ve eliminasyonunu SAGF ile ortaya konulmaktadır. Çizelge 3.7 takip edilerek verilen örnek değerleri kullanıp harmonik ve araharmonik eliminasyon ve tespiti arttırılabilmektedir.

Çizelge 3.8. Kapasitif yükün SAGF’a karşı vermiş olduğu gerilim sonuç değerleri

HARMONİK	YÜKTEKİ FİLTREDEN ÖNCE HARMONİK BOZULMA (%)	YÜKTEKİ FİLTREDEN SONRA HARMONİK BOZULMA (%)
3	5.08	0.04
3.5	4.14	0.05
5	4.60	0.02
5.5	3.22	0.03
7	3.45	0.02
7.5	2.35	0.03

Çizelge 3.8’den kapasitif yükteki seri aktif güç filtresi için örnek verecek olursak, filtre kullanmadan önce 3. harmonikteki bozulma %5.08’dir. Seri aktif güç filtrenin sisteme alınmasıyla 3. harmonikteki bozulma filtrenin eliminasyonu ile %0.04’e düşmüştür. Kapasitif yük ucundaki araharmonik olarak tanımlanan yani tamsayı değerine denk gelmeyen 3.5’teki harmonik bozulmaya bakılacak olursa bozulmanın %4.14 iken seri aktif güç filtre sisteme alınıp bakacak olursak bu harmoniğe de %0.05’lik orana düşürerek karşılık verilmiştir. Yani harmonik olarak işleme alınmadığı bozulmada bile harmoniklerin varlığını ve eliminasyonunu SAGF ile ortaya konulmaktadır. Seri aktif güç filtremizin tercih sebebi olarak ta sonuçların gösterdiği şekilde istenmeyen nonsinüzoidal dalga şekline sürekli karşılık verdiği, gerilim dengesizliğini elimine ettiği, ideal sinüzoidal dalga şeklini çıkardığı görülmektedir. Çizelge 3.8 takip edilerek verilen örnek değerleri kullanıp harmonik ve araharmonik eliminasyon ve tespiti artırılabilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Harmonikler, güç katsayısı gerilimi ve akım değerlerindeki darbeler, değer değişiklikleri ve dalgalanmalar enerji kalitesi bakımından önemli rolü olan faktörlerdir. Enerji kalitesine doğrudan etki eden bu faktörler, ürünün kalitesi ve üretim değeri üzerinde de etkilidir. Harmoniklerin varlığında çalışmanın devamlılığı, tıpkı öteki güç kalitesi olaylarında olduğu gibi, güç iletim sisteminin sahip olduğu dayanıklılığı ve donanım hassasiyeti ile bağlantılıdır. Bundan dolayı, tasarım sürecinin söz konusu hassasiyetleri dikkate alarak yürütülmesi öncelik taşımaktadır.

Sanayi ortamında faydalanılan nonlinear yüklerin (ark fırınları, transformatör gibi) ve yarı iletken elemanların yapısı; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Güç kalitesi açısından risk teşkil eden bu durum; yüksek tasarım uygulamalarıyla gereken şekilde tasarlanmış elektrik cihazlarının kullanımı, uygun bakım metotlarının geliştirilmesi, gerekli yatırımların yapılması yoluyla kontrol altında tutulabilir ve iyileştirilebilir.

Şebekede akan harmonik akımlar şebeke empedansında gerilim düşümüne yol açar ve bu da gerilim dalgasının formunun bozulması, kayıpların artması, şebekede kullanılan cihazlarda arızaların veya aksaklıkların oluşmasıyla sonuçlanır. Söz konusu sonuçlar, harmonik kaynakların sistemdeki yeri, iletim ve dağıtım sistemlerindeki yayılımı ve şebeke karakteristikleri ile bağlantılıdır.

Yapılan tez çalışmasında örnek alınan farklı tipteki nonlinear yüklü güç sistemi için seri aktif güç filtresi kullanmadan önceki ve kullandıktan sonraki harmonik ve araharmonik bozulma seviyelerini elde etmek için sistemin MATLAB/Simülink programında modüle edilerek, simülasyonu yapılmıştır. Detaylı bir FFT analiz yöntemiyle incelemesi yapılan karşılaştırmalı spektrum ve çizelge analiz sonuçlarıyla, seri aktif güç filtreden önceki ve seri aktif güç filtreden sonraki 3 faz sistemin filtreden önceki endüktif yüklü nonlinear yükün THD_v oranının %19.29 olduğu, filtreyi kullandıktan sonraki endüktif yüklü nonlinear yükün THD_v oranının %1.72'lere kadar azaldığı aynı şekilde filtreden önceki kapasitif yüklü nonlinear yükün THD_v oranının %19.21 olduğu, filtreyi kullandıktan sonraki kapasitif yüklü nonlinear yükün THD_v oranının %1.59'lara kadar azaldığı görülmüştür. Harmonik gerilim stabilizasyonunun gerçekleştirildiği ve oluşan harmonik frekanslar etrafındaki bir tamsayıya karşılık gelmeyen araharmoniklerinde negatif bir etkisinin olduğunu bunlarında yok edilmesi gerektiği gözlemlenmiştir.

Güç kalitesi güç sistemindeki dikkat edilmesi gereken önemli problemlerden birisidir. Gerilim ve akım için istenen dalga şekli tam sinüzoidal düzgün bir dalga şekli olmasına

rağmen, anahtarlanabilir güç kaynakları, kompanzatörler, fotovoltaik sistemler, bilgisayarlar, üç fazlı yükler, konverterler, transformatörler, generatörler, ark fırınları, aydınlatma elemanları, elektronik balastlar gibi harmonik kaynakların bu dalga şekilleri üzerinde bozacak etkilere sahip olduğunu belirtmektedir. Pasif güç filtresi ile yapılan harmonik çalışmalar ve harmonik filtreleme, yukarıda saydığımız gibi doğrusal olmayan yüklerin güç kalitesi üzerindeki etkilerini engellemek için yeterli değildir. Devreye aktif güç filtresi girmektedir. Seri aktif güç filtresi için üstün özelliklerinden sayabileceğimiz;

- Harmonikleri ve araharmonikte diyebileceğimiz harmonikleri çok yüksek oranda filtreleme özelliği,
- Harmonik değişimlerine milisaniyeler içerisinde çok hızlı cevap verme özelliği sonucu değişken yük koşullarında yüksek harmonik bastırma oranı,
- Geniş bir yelpazedeki harmonikleri filtreleme özelliği,
- Harmonik seviyelerinden bağımsız tasarım, birçok sisteme kolaylık ile uygulanabilme özelliği,
- Şebeke empedansından bağımsız çalışma şebeke ile rezonansa girmeme özelliği,
- Aşırı yüklenme durumu olmaması,
- Seri aktif güç filtrenin harmonik kompanzasyon gücünün istenildiği zaman artırılabilmesi, özellikleri seri aktif güç filtreyi çalışmamda tercih ettirmektedir.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışmasıyla, seri aktif güç filtresinde aslında harmonik kaynağı gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Ancak sistemdeki harmonikleri yok edeceği için bu şekilde dalga formu üretmesi gerektiği tespit edilmiştir. Harmoniklerin varlığı, elektrik sistemlerinin çalışmayacağı anlamına gelmemektedir. Bunun için filtrenin kendisinin de bir harmonik kaynağı olduğu göz önünde bulundurulursa, bu hassasiyetlerin tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan güç sistem tasarımının bu doğrultuda gerçekleştirilmesi ve sistemdeki harmonikten kaynaklı bozulmalar için her noktaya seri aktif güç filtresinin konulması zor olacağından meydana gelen arızaların oluşmaması içinde önlemlerin tasarım aşamasındayken alınması ve kalite faktöründen ödün verilmemesinin, doğacak sıkıntıların önlenmesi için bütün bunlara dikkat edilerek sistem tasarımının yapılması gerektiğini bildirmektedir. Ayrıca modüle edilen sistemde kullanılan seri aktif güç filtresinin harmoniklerin eliminasyonu için oluşturduğu referans gerilimlerin, kullandığı kontrol yapısının matematiksel modellemesini, farklı yüklerde denenmesi ile detaylı analizinin ayrı bir tez çalışmasında yapılarak yapılan tez çalışması geliştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Ekiz A, Tümay M. Fabrikalarda Meydana Gelen Harmoniklerin Matlab/Simulink Kullanılarak Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi.
- [2] Kocatepe C, Kekezoğlu B, Bozkurt A,Yumurtacı R, İnan A, Arıkan O, Baysal M, Akkaya Y. Turkish Journal of Electrical Engineering and computer sciences, 21:1880-1892.
- [3] Rüstemli S , Cengiz MS , Dinçer F, 2013. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 30-38.
- [4] Rüstemli S, Okuducu E, Almali MN, Efe SB, 2015. Reducing The Effects Of Harmonics On The Electrical Power Systems With Passive Filters. Bitlis Eren Univ J Sci & Technol, 5 (1): 1 – 10.
- [5] Rüstemli S, Cengiz MS, 2016. Passive Filter Solutions and Simulation Performance in Industrial Plants, Bitlis Eren Univ J Sci & Technol, 6 (1): 39-43.
- [6] Efe SB, 2016. Endüstriyel Tesisler için Aktif ve Pasif Harmonik Filtre Uygulaması. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 5(1): 65-76.
- [7] Efe SB, 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [8] Efe SB, Kocaman B, 2018. Harmonic Analysis Of A Wind Energy Conversion System With Small-Scale Wind Turbine. International Journal of Energy Applications and Technologies, 5(4): 168-17.
- [9] Rüstemli S, Cengiz MS, 2015. Active Filter Solutions İn Energy Systems. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23: 1587-1607.
- [10] TABAK B, Aliyalçın M, 2004. Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8.Cilt, 1.Sayı.
- [11] Güven AF, Yörükeren N, 2019. Yalova Üniversitesi Merkez Kampüsünde Elektrik Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 9(1): 123-143.
- [12] Kesler M, Sunan M, 2010. Düşük Maliyetli DSP Uygulama Geliştirme Kartının Tasarımı ve Güç Sistemlerinde Harmonik Analizin Gerçekleştirilmesi. Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü.

- [13] Dağ O, Usta Ö, Uçak C, 2011. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Kaynaklarının Yerinin Saptanması. İtüdergisi/d mühendislik, 10(1): 111-122.
- [14] Şahin Ö, 2003. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi. Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Şahin YG, 2006. Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolarına Etkisi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Aydemir S, 2006. Harmoniklerin Azaltılmasında Walsh Fonksiyonlarının Eviricilerde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] Eroğlu H, 2009. Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] Mutlu HH, 2011. Dsp Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu. Yüksek Lisans Tezi Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Erişti H, Tümen V, 2012. K-means Kümeleme Yaklaşımı Kullanarak Elektrik Dağıtım Sistemlerindeki Harmoniklerin Zamansal Değişimlerinin İncelenmesi. ELECO 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu.
- [20] Küçükilhan G, 2017. Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Modellenmesi ve Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Keçecioğlu ÖF, Tekin M, Gani A, Açıkgöz H, Gemci A, Şekkeli M, 2015. Bir Güneş Enerji Santralinin Elektrik Şebekesindeki Güç Kalitesi Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(2).
- [22] Germeç KE, Erdem H, 2014. Elektrik Güç Sistemlerinde Zaman-Harmonik Analizi Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 30(2):263-271.
- [23] Akçay M.T, Arifoğlu U, 2019. Anlık Güç Kuramı ile Dengesiz Yükler için SAGF Uygulaması. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 1-16.
- [24] Gezeğin C, Özdemir M, 2005. Paralel Pasif/Paralel Aktif Hibrit Güç Süzgeçleri, Elsevier, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- [25] Gencer ÖÖ, Öztürk S, Alboyacı B, Yeğin EM, 2008. Çeşitli Aydınlatma Aygıtlarının Emtp/Atp İle Harmonik Modellenmesi, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü.
- [26] İnan A, Sağlam H, 2010. Dağıtım Transformatörlerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simülasyonu. Journal of Polytechnic , 13(4): 263-269.

- [27] Kürker F, Taşaltın R, 2016. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5: 21-38.
- [28] Bayrak M. Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi. Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- [29] Yaşa U. Ac Frekans Konvertörlerinin Oluşturduğu Harmonikler ve Harmonik Azaltımı Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Aktif Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Sistemleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.
- [30] Cengiz MS, 2011. Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin Azaltılması ve Simülasyonu. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [31] Bayhan S, Yılmaz D. Güç Sistemlerindeki Dalga Şekli Bozukluklarının Tespiti. Başkent Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu.
- [32] Kulu M, 2020. Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim Yöntemleri ve Performans Analizleri. Yüksek Lisans Tezi Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] Okuducu E, 2010. Elektrik Güç Sistemlerinde Elektrik Kalitesinin Analizi ve Simülasyonu. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [34] Sevgi L. EMC, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizi. Doğu Üniversitesi Elektrik Elektronik Müh. Bölümü.
- [35] Kocatepe C, Uzunoglu M, Yumurtacı, R, Karakas A, Arıkan O, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [36] Adak S, 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması. Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [37] Tanrıöven M, İnce R. Elektrik Güç Sistemlerinin Kalitesini Bozan Faktörlerin İncelenmesi.
- [38] Zenger M. Akım ve Gerilim Harmonikleri. www.harmonik.wsmustafazenger@gmail.com.
- [39] Chapman D. “Harmonikler, Nedenleri Ve Etkileri” Copper Development Association.
- [40] Odabaşı T, 2004. 3. Harmoniğin meydana getirdiği problemler . www.etmd.org.tr.
- [41] Yeşil M, 1996. Enerji Sistemleri Üzerindeki Lineer olmayan Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [42] Karakaş A, Kocatepe C, Baysal M, Çakır H, 2005. Harmonikli Sistemlerde Filtre Uygulamasının Karşılaştırılması, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu. Kocaeli, 17-18.

- [43] Sucu M, 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Türkiye.
- [44] Ellis RG, 1996. Harmonic analysis of industrial power systems , IEEE Transactions on Industry Applications , 32(2) : 417-420.
- [45] Demirören A, Zeynelgil L, 2004. Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması. İstanbul, 1:204-238.
- [46] Bozabali M, 2009. Design And Simulation Of Shunt Active Power Filter On Three Phase Systems. MSc, Sakarya University Sakarya, Turkey.
- [47] Adak S, 2003. Mitigation Of Harmonic Distortion In Electric Power System. Phd, Yildiz Technical University Istanbul, Turkey.
- [48] Ucar M, Design M, 2005. İmplementation Of 3-Phase 4-Wire Shunt Active Power Filter. MSc, Kocaeli University Kocaeli, Turkey.
- [49] Akçay MT, 2010. Series Active Power Filter Design For Unbalanced Conditions. MSc, Sakarya University Sakarya, Turkey.
- [50] Sezer N, Design M, 2006. Of Shunt Active Power Filter On Three Phase Systems. MSc, Istanbul Technical University Istanbul, Turkey.
- [51] Akagi H, 1996. New Trends in Active Filters For Power Conditioning, Industry Applications, IEEE Transactions on, 32: 1312–1322.
- [52] Li D, Tian J, 2008. A Novel Active Power Filter for the Voltage-Source Type Harmonic Source, Electrical Machines and Systems. ICEMS 2008. International Conference on, Wuhan, HUST, 2077 – 2080 (in China).
- [53] El-Habrouk M, Darwish K.M, Mehta, P, 2000. Active power filters: A review, Electric Power Applications, IEE Proceedings, 147: 403– 413.
- [54] Sucu M, 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [55] Peng ZF, Adams JD, 2001. Harmonic Sources and Filtering Approaches. Industry Applications Magazine, IEEE, 7: 18–25.
- [56] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A, 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 46: 960–971

EK 1

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

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

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler(3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1	15	0.3	6	0.5
13	1	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
	02+03				
>25	(25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi %3. Toplam harmonik distorsiyonu (THD): O.G. şebekelerde %6.5 - Y.G. Şebekelerde %3					

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

ÖZGEÇMİŞ

■■■■ yılında ■■■■ ilinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini ■■■■ te tamamladı. ■■■■ yılında ■■■■ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. ■■■■ eğitim öğretim yılı bahar yarıyılında ■■■■ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

Sinan TEKEV

