

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

AHMET AKYEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ERDİN GÖKALP**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

Ahmet AKYEL tarafından hazırlanan tez çalışması 17.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ÜNDİL

İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Elektrik enerji sistemlerinde kalite denildiğinde akıllara ilk gelen problem olan harmonikler bu çalışmamda ele alınmıştır. Tezin ilk bölümlerinde harmonikler hakkında detaylı bilgiler verilirken, son bölümünde ise simulasyon ortamında kalitesi düşük elektrik enerji sistemi ele alınmıştır. Matlab simulink programının kullanıldığı bu tezde, harmonikli yükler, harmonik filtreler, kompanzasyon tesisi, ölçüm tesisleri modellenerek tezin ilk bölümlerindeki bilgilerin doğrulukları gözlemlenmiştir.

Bu çalışmamda beni yönlendiren, tez hazırlanma sürecinde zaman planlamasını yapan, bana yardımlarını esirgemeyen tez danışmanı hocama Yrd. Doç. Dr. Erdin Gökalp'e teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran, 2011

Ahmet AKYEL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2.....	3
HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR	3
2.1 Harmonikli Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar	5
2.1.1 Sinusoidal İşaretler İçin Akım, Gerilim ve Güç Bağlantıları.....	5
2.1.2 Sinusoidal Olmayan İşaretler İçin Akım, Gerilim ve Güç Bağlantıları .	6
2.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu	8
2.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu	9
2.4 Toplam Talep Distorsiyonu	10
2.5 Şekil Faktörü.....	10
2.6 Tepe Faktörü	10
2.7 Yüklerin Karakteristikleri.....	10
2.7.1 Lineer Yükler	10
2.7.2 Nonlineer Yükler	12
2.8 Nonsinusoidal Dalgaların Analizi.....	14
2.8.1 Fourier Serilerinin Matematiksel İfadesi	14

2.8.2	Trigonometrik Biçim.....	15
BÖLÜM 3.....		16
HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR		16
3.1	Transformatörler.....	17
3.1	Transformatör Bağlama Grupları ve Harmonikler	19
3.2	Generatörler	20
3.3	Ark Fırınları.....	21
3.4	Gaz Deşarj Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları.....	22
3.5	Fotovoltaik Sistemler	22
3.6	Doğrultucular	22
3.7	Bilgisayarlar	23
3.8	Statik VAr Kompanzatorleri	24
BÖLÜM 4.....		25
HARMONİKLERİN ZARARLI ETKİLERİ		25
4.1	Harmonikli Akım İşaretleri	25
4.1.1	Pozitif Bileşen Harmonikler.....	26
4.1.2	Negatif Bileşen Harmonikler	26
4.1.3	Sıfır Bileşen Harmonikler	27
4.2	Devre Elemanları.....	28
4.2.1	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi	28
4.2.2	Harmoniklerin Endüktans Üzerindeki Etkisi.....	29
4.2.3	Harmoniklerin Kondansatör Üzerindeki Etkisi.....	29
4.3	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri	29
4.3.1	Transformatör K-Faktörü	30
4.4	Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri.....	31
4.5	Motorlar ve Generatörler	33
4.6	Enerji İletim Sistemi	34
4.7	Devre Kesicileri ve Sigortalar	35
4.8	Aydınlatma Elemanları.....	36
4.9	Elektronik Elemanlar	36
4.10	Röleler	36
4.11	Güç Faktörü.....	38
BÖLÜM 5.....		40
ELEKTRİK TESİSLERİNDE REZONANS VE ALINACAK TEDBİRLER		40
5.1	Seri Rezonans	41
5.2	Paralel Rezonans	43
5.3	Rezonans İçin Harmonik Ölçümü	45
5.4	Harmonik Bileşenlerin Oluşturduğu Rezonansın Önlenmesi.....	45
BÖLÜM 6.....		47
HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE STANDARTLAR.....		47

6.1	Harmonikle Bozulmanın Ölçütü	47
6.2	Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları	48
6.2.1	Yaklaşık İnceleme	48
6.3	Harmonik Standartları	49
BÖLÜM 7		55
HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ		55
7.1	Pasif Filtreler	55
7.1.1	Seri Filtreler	56
7.1.2	Paralel Filtreler	56
7.1.2.1	Tek Ayarlı Filtreler	57
7.1.2.2	Çift Ayarlı Filtre	58
7.1.2.3	Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler	59
7.2	Aktif Filtreler	60
7.2.1	Dijital Aktif Filtre	62
7.2.2	Analog Aktif Filtre	62
7.2.3	Aktif Filtrelerin Kıyaslanması	62
7.3	Aktif ve Pasif Filtrelerin Kıyaslanması	63
BÖLÜM 8		66
SİMULASYON ORTAMINDA ENERJİ KALİTESİ		66
8.1	Simulasyon Elemanları	67
8.2	Simulasyon Teknik Bilgileri ve Çalıştırılması	67
8.3	Pasif Filtre Simulasyonu	68
8.4	Filtrelerin Simulasyon Ortamında Kıyası	88
BÖLÜM 9		98
SONUÇ VE ÖNERİLER		98
KAYNAKLAR		100
ÖZGEÇMİŞ		101

SİMGE LİSTESİ

D	Distorsiyon gücü
GF	Güç faktörü
Hz	Hertz
ms	Milisaniye
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
S	Görünür güç
U	Faz-faz efektif gerilimi
V	Faz-nötr efektif gerilimi
X_L	Endüktif reaktans
X_C	Kapasitif reaktans

KISALTMA LİSTESİ

DPF	Displacement Power Factor
FFT	Fast Fourier Transform
HD	Tekil Harmonik Distorsiyonu
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PF	Power Factor
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Temel bileşen ve harmonikler..... 4
Şekil 2. 2	Temel ve harmonikli dalgalar..... 4
Şekil 2. 3	Sinusoidal işaret 5
Şekil 2. 4	Sinusoidal işaretler için güç vektörleri 6
Şekil 2. 5	Sinusoidal olmayan işaretler için güç vektörleri 8
Şekil 2. 6	Lineer yüklerin benzetim ortamında devre şeması 11
Şekil 2. 7	Yüklerin üzerindeki akım ve gerilimler 11
Şekil 2. 8	Nonlineer yüklerin benzetim ortamında devre şeması 13
Şekil 2. 9	Nonlineer yük üzerindeki akım ve gerilim 13
Şekil 3. 1	Transformatörün eşdeğer devresi 18
Şekil 3. 2	Histeresiz kayıpları ile birlikte mıknatıslanma eğrisi 18
Şekil 3. 3	Transformatörün mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu..... 19
Şekil 3. 4	Yıldız/yıldız ve yıldız/üçgen bağlı trafolarla 3. ve 3'ün katı harmonik 20
Şekil 3. 5	Ark fırınlarının gerilime etkisi..... 21
Şekil 3. 6	Doğrultucunun oluşturduğu harmonikli dalga şekilleri 23
Şekil 4. 1	Dengeli sistemlerde akım bileşenleri 25
Şekil 4. 2	Pozitif bileşen harmonik akımları..... 26
Şekil 4. 3	Negatif bileşen harmonik akımları 27
Şekil 4. 4	Sıfır bileşen harmonikleri 27
Şekil 4. 5	Dengeli ve dengesiz sistemlerde nötr üzerindeki akımlar 27
Şekil 4. 6	Üç ve üçün katı harmoniklerin nötr iletkenine etkisi..... 28
Şekil 4. 7	Transformatördeki kayıpların THD_I ' ya göre değişimi 30
Şekil 4. 8	Tepe ve efektif değerlerin sinus dalga üzerinde gösterimi 32
Şekil 4. 9	İletim ve telekomünikasyon hatlarının birlikte kullanılması..... 35
Şekil 5. 1	Enerji sisteminin kapalı şeması (Sucu [8])..... 40
Şekil 5. 2	Enerji sisteminin açık şeması 41
Şekil 5. 3	Seri RLC devresi 42
Şekil 5. 4	Seri rezonansta akım ve empedans değişimi 42
Şekil 5. 5	Paralel RLC devresi 43
Şekil 5. 6	Paralel rezonansta akım ve empedans değişimi..... 44
Şekil 5. 7	Harmonik akım kaynağı devresi ve harmonik spektrumu 45
Şekil 7. 1	Seri pasif filtre 56
Şekil 7. 2	Paralel pasif filtre (Sucu [8])..... 57
Şekil 7. 3	Tek ayarlı filtre 57
Şekil 7. 4	Tek ayarlı filtrenin empedans değişimi 58

Şekil 7. 5	Çift ayarlı filtre	59
Şekil 7. 6	Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi	59
Şekil 7. 7	Yüksek geçiren filtre yapıları	60
Şekil 7. 8	Sönümlü filtrenin empedans değişimi	60
Şekil 7. 9	Paralel ve seri aktif filtreler	61
Şekil 7. 10	Şönt tipi aktif filtre blok diyagramı (Evans [2])	61
Şekil 8. 1	Sistemin benzetim ortamında görünümü (1. çalıştırma).....	70
Şekil 8. 2	İlk çalıştırma simulasyon sonuçları	71
Şekil 8. 3	İlk çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu	72
Şekil 8. 4	İlk çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu	72
Şekil 8. 5	Sistemin benzetim ortamında görünümü (2. çalıştırma).....	74
Şekil 8. 6	İkinci çalıştırma simulasyon sonuçları.....	75
Şekil 8. 7	İkinci çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu.....	76
Şekil 8. 8	İkinci çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu	76
Şekil 8. 9	Sistemin benzetim ortamında görünümü (3. çalıştırma).....	78
Şekil 8. 10	Üçüncü çalıştırma simulasyon sonuçları.....	79
Şekil 8. 11	Üçüncü çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu	80
Şekil 8. 12	Üçüncü çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu.....	80
Şekil 8. 13	Sistemin benzetim ortamında görünümü (4. çalıştırma).....	81
Şekil 8. 14	Dördüncü çalıştırma simulasyon sonuçları	82
Şekil 8. 15	Dördüncü çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu	83
Şekil 8. 16	Dördüncü çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu.....	83
Şekil 8. 17	Sistemin benzetim ortamında görünümü (5. çalıştırma).....	85
Şekil 8. 18	Beşinci çalıştırma simulasyon sonuçları.....	86
Şekil 8. 19	Beşinci çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu	87
Şekil 8. 20	Beşinci çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu.....	87
Şekil 8. 21	Aktif filtre ile harmonik eliminasyon.....	89
Şekil 8. 22	İlk yük devrede iken aktif filtre grafikleri	90
Şekil 8. 23	Aktif filtreli gerilim bozulması (ilk yük devrede)	91
Şekil 8. 24	Aktif filtreli akım bozulması (ilk yük devrede)	91
Şekil 8. 25	İlave yük devrede iken aktif filtre grafikleri	92
Şekil 8. 26	Aktif filtreli gerilim harmonik bozulması (ilave yük ile)	93
Şekil 8. 27	Aktif filtreli akım harmonik bozulması (ilave yük ile).....	93
Şekil 8. 28	Pasif filtre ile harmonik eliminasyon.....	95
Şekil 8. 29	İlave yük devrede iken pasif filtre grafikleri.....	96
Şekil 8. 30	Pasif filtreli gerilim harmonik bozulması (ilave yük ile)	97
Şekil 8. 31	Pasif filtreli akım harmonik bozulması (ilave yük ile).....	97

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Harmoniklerin kaynak ve yüke göre durumları..... 8
Çizelge 4. 1	Ortalama ve efektif değerin sinyallere göre karşılaştırılması 33
Çizelge 5. 1	Devredeki elemanların akım ve bara gerilimleri 45
Çizelge 6. 1	Çeşitli ülkelerin harmonik standartları..... 49
Çizelge 6. 2	Konutlarda ve alçak gerilim şebekelerinde harmonik limitleri 50
Çizelge 6. 3	Konutlarda alçak ve orta gerilimde harmonik distorsiyon, EN 50160 51
Çizelge 6. 4	IEEE 519–1992 51
Çizelge 6. 5	Akım harmonik sınırları 52
Çizelge 6. 6	EPDK yönetmeliğine göre gerilim harmonikleri için sınır değerler 53
Çizelge 6. 7	EPDK yönetmeliğine göre akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler 53
Çizelge 6. 8	EPDK yönetmeliğine göre 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri 54
Çizelge 6. 9	EPDK yönetmeliğine göre 20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri 54
Çizelge 7. 1	Aktif filtrelerin kıyaslanması..... 63
Çizelge 7. 2	Filtrelerin kıyaslanması..... 64

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

Ahmet AKYEL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

Üretim ve tüketim açısından elverişli olan elektrik enerjisi günümüzde enerji ihtiyacının olduğu hemen hemen her yerde tüketilmektedir. Teknolojinin gelişmesi, üretimin artması gibi sebeplerden gün be gün daha fazla ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinde bu denli artmalar, yanında bir takım olumsuzluklar da meydana getirmiştir. İletim hatlarını meşgul eden reaktif akımlar, harmonik üreten cihazlar gibi birçok etken, elektrik enerjisinin kalitesini düşürmektedir. Son kullanıcının satın aldığı elektrik enerjisini kullanıcının en verimli ve en kaliteli şekilde talep etme arzusu, enerji kalitesinin yarattığı ilave kayıplar ve enerji kalitesizliğinden elektrikli cihazların dosdoğru bir şekilde çalışmaması enerji kalitesi konusunu hat safhaya çıkarmıştır. Enerji kalitesi parametreleri olan gerilim seviyesi, frekans, gerilim düşümü gibi değerlerin istenilen mertebelere getirmek amacı ile tesislerdeki harmoniklerin giderilmesi ve tesislerden çekilen reaktif gücün minimuma indirilmesi konusunda bu tezde incelemelerde bulunulmuştur.

Harmonik bileşenlerin yok edilme yöntemleri bu çalışmada anlatılırken matlab simulink programı kullanılmıştır. Benzetim ortamında harmonik filtrasyon, pasif harmonik filtreler, aktif harmonik filtreler ve kompanzasyon bataryaları kullanılarak elektrik enerjisi kaliteli hale getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji kalitesi, harmonikler, kompanzasyon, filtreleme, güç faktörü.

POWER QUALITY ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY SYSTEMS

Ahmet AKYEL

Department of Electric Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Erdin GÖKALP

Production and consumption of electrical energy is favorable in terms of energy needs today is consumed almost everywhere. The development of technology, such as increased production reasons, electrical energy has created a number of disadvantages. Transmission lines that occupy the reactive current, harmonic-producing devices such as electric power decreases quality of many factors. Electrical energy purchased by the end user's desire to seek the most efficient and highest quality, power quality and energy losses caused by the poor quality of the extra electrical equipment does not operate in a straight line phase has the issue of power quality. The voltage level of power quality parameters, frequency, voltage drop in values such as facilities for the purpose of bringing the desired orders of harmonics elimination and reactive power plants and minimize the observations made in this thesis on.

Harmonic components of this study is to describe methods of destruction used Matlab Simulink program. In the simulation harmonic filtration, passive harmonic filters, active harmonic filters, compensation batteries, has been made using high quality electric energy.

Keywords: Energy quality, harmonics, compensation, filtration, power factor.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Dünyada kurulu güç sürekli artmaktadır. Enerji sistemine her gün yeni bir elektrik enerjisi tüketen cihaz ve makineler eklenmektedir. Enerji altında bulunan bu yüklerin karakteristikleri enerji iletim ve dağıtım hatlarında ilave yüklenmelere sebep olmaktadır. Bu yüklenmeler elektrik enerji sistemlerinde bulunan devre elemanları ve elektrik makinalarına ciddi zararlar vermektedir. Aşırı yüklenmeler ömürlerinin kısaltmalarına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kullanıcının alacağı enerjinin istenildiği formda olmamasına, kalitesi düşük bir enerji kullanmasına sebebiyet vermektedir. Kalitenin nasıl yükseltilebileceği hususunda bu tezde çalışmalar yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Elektrik enerjisindeki bu kalitesizliğin nereden ve nasıl kaynaklandığı, nasıl giderilebileceği, bu durum hakkında simulasyon ortamında örneklerle bu tezde yer verilmiştir. Bu vesile ile tezin 2. bölümlerinde harmonikler ile ilgili temel kavramlara yer verilmiştir. Tezin 3. ve 4. bölümünde harmonik üreten kaynaklar ve harmoniklerin zararlı etkilerine yer verilmiştir. Enerji sistemlerinde kullanılan elemanların harmoniklere karşı durumları detaylı olarak incelenmiştir. 5. bölümde harmoniklerin en zararlı etkisi olan rezonans durumundan bahsedilmiştir. Enerji sisteminde oluşabilecek muhtemel seri ve paralel rezonanslara örnekler verilmiştir. Olası rezonans frekansının nasıl tayin edileceği bu bölümde anlatılmıştır. Harmonikler ile ilgili diğer önemli konu olan harmonik sınırlandırmalarına tezin 6. kısmında değinilmiştir. Mevcut bir takım kurumların oluşturduğu harmonik sınırlandırmaları bulunduran cetveller bu bölümde gösterilmiştir. 7. bölümde ise enerji kalitesizliğine sebep

olan harmoniklerin giderilme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Harmoniklerin nereden kaynaklandığı ve harmonikli sistemlere nasıl müdahale edebileceğine bu bölümde değinilmiştir. Filtreleme çeşitlerine, filtrelerin birbirine göre üstünlüklerine, filtreler arası kıyaslamaya aynı şekilde bu bölümde yer verilmiştir. Çalışmanın 8. bölümünde ise tüm anlatılanların bir özeti olmuş gibi, benzetim ortamında tasarlanmış bir enerji sisteminin enerji kalitesini yükseltme ile alakalı bir çalışma yapılmıştır. Tezin son bölümünde ise enerji kalitesi hakkında bu tezden çıkarılabilecek sonuçlara yer verilmiştir.

1.3 Hipotez

Kaliteli bir enerji sağlamak için harmonikli sinyallerin kaynağını tespit etmek en öncelikli yapmamız gereken işlemdir. Harmonikli sinyali yok etmek ve ya en aza indirmek için gerekli filtreleme işlemlerini ve ya yapılması gereken transformatör bağlama işlemlerini yaptıktan sonra güç faktörünü istenilen mertebelere getirmek gerekir. Tüm bu kalite parametrelerini düzelterek kaliteli bir enerjiye sahip oluruz.

HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

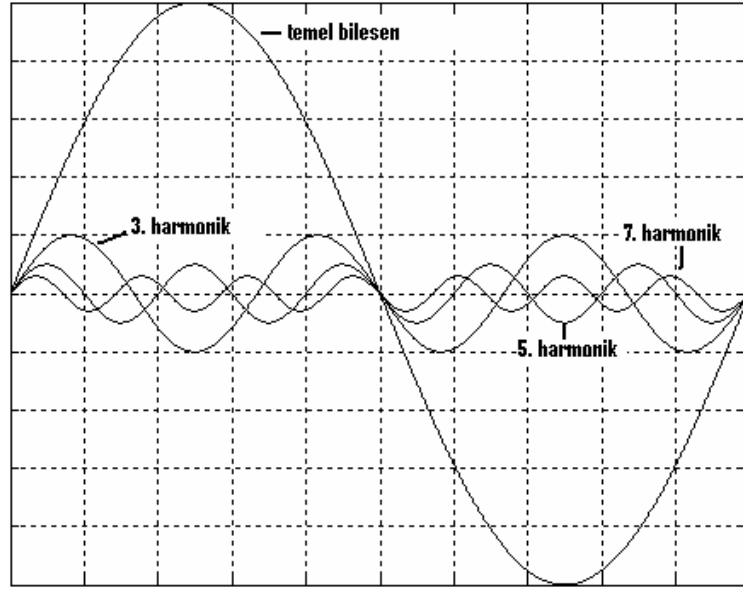
Üretim ve tüketim açısından son derece elverişli olan elektrik enerjisi günümüzde enerji ihtiyacının olduğu hemen hemen her yerde tüketilmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte nice aletler elektrik ile çalışacak şekilde üretilmekte ve hızla yaygınlaşmaktadır. Elektrikli makinelerin ve cihazların yaygınlaşması elektriğe olan talebi arttırmakla birlikte, elektrik şebekelerinde elektrik enerji kalitesi sorununu da beraberinde getirmiştir.

Elektrik enerjisinin kalitesi, elektrik şebekesinin tüketiciye hizmet verdiği noktada gerilimin genlik ve frekansının nominal değerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüsoidal bir işaret olması olarak tanımlanabilir. Gerilimin genliğinin değişmesi, enerjinin kesintiye uğraması, darbe ve çentikler içermesi, değişik frekanslarda sinyaller içermesi, dalga şeklinin sinüs formundan uzaklaşması enerji kalitesizliğini göstermektedir.

Şebekedeki enerjinin temel çalışma frekansının tam katı frekanslardaki sinüsoidal akım ve gerilimler olarak tanımlanan harmonikler, enerji kalitesizliğine sebep olan en önemli etkidir. Temel frekans dışında başka frekanslarda sinyalleri de barındırması, şebekedeki gerilim ve frekans değişimine neden olduğundan harmonikler, tesislerde istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

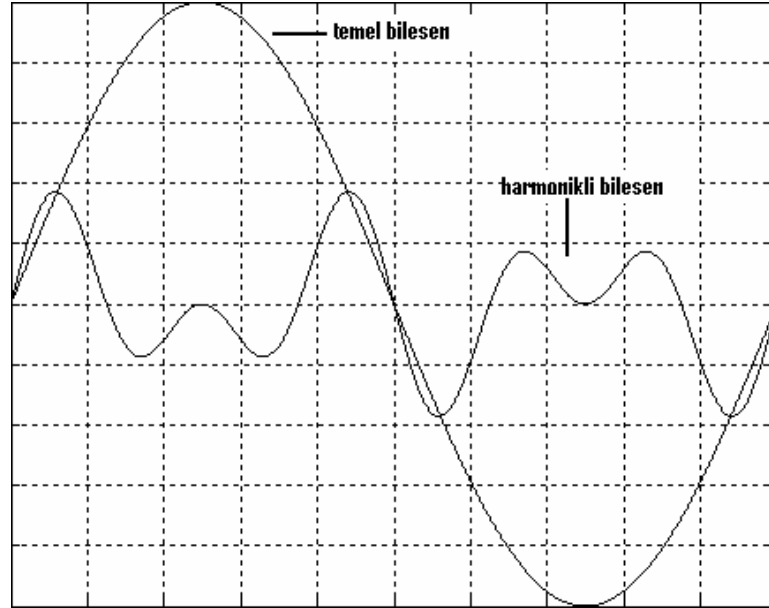
Harmonikler, 2. harmonik, 3. harmonik, 4. harmonik, 5. harmonik... n. harmonik olarak adlandırılırken bu harmoniklerin frekansları da kaçınıcı harmonikse temel bileşen frekansının o derece tam katıdır, şöyle ki; 5. harmoniğin frekansı temel bileşen frekansının 5 katıdır.

Temel frekansın tam katları olarak şebekede ilave yüklenmelere sebep olan harmonik sinyaller aşağıdaki grafiklerde Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de ayrı ve toplu olarak gösterilmiştir. Toplu olarak gösterilen işaret osiloskop ekranında karşılaştığımız şekildir.



Şekil 2. 1 Temel bileşen ve harmonikler

Harmonik bileşenler temel bileşen frekansının tam katları olacak şekilde meydana geldiği için Şekil 2.1’de temel frekans değerine kıyasla harmonik bileşenlerin frekans değerleri anlaşılır.



Şekil 2. 2 Temel ve harmonikli dalgalar

Enerji barasına osiloskop probunu temas ettirdiğimizde ekranda göreceğimiz sinyal Şekil 2.2’deki harmonikli bileşen dalgası gibi olur.

Dengeli 3 fazlı bir sistemde harmonikler faz akımlarının yönlerini değiştirirler, kimi harmonikler faz akımlarını aynı sırada tutabilir, kimi harmonikler akımların faz sırasını değiştirebilir, kimi harmonikler de akımlarda faz çakışmasına sebep olabilir. Bu üç etmenden

ötürü harmonikleri pozitif bileşen harmonikler, negatif bileşen harmonikler ve sıfır bileşen harmonikler olarak da sınıflandırılır.

2.1 Harmonikli Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar

Elektrik tesislerinde istenen kaliteli bir enerji için işaretin gerilim ve frekans bilgisinin nominal değerlerde olması çok önemlidir, bu bölümde istenilen sinusoidal işaretler ile istenmeyen nonsinusoidal işaretler matematiksel olarak ifade edilmiştir.

2.1.1 Sinusoidal İşaretler İçin Akım, Gerilim ve Güç Bağlılıkları

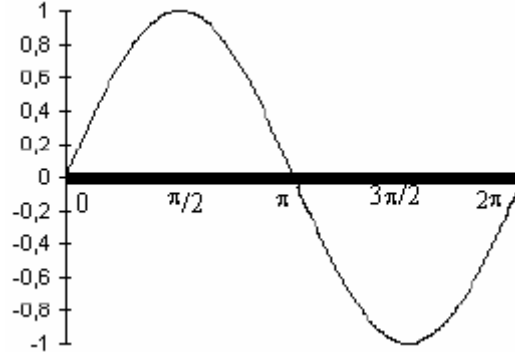
$$v(t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (2.1)$$

$$i(t) = I_{\max} \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (2.2)$$

Sinusoidal bir gerilimin ve akımın efektif değeri:

$$V = V_{\max} / \sqrt{2} \quad (2.3)$$

$$I = I_{\max} / \sqrt{2} \quad (2.4)$$



Şekil 2. 3 Sinusoidal işaret

$$\text{Üç fazlı sistemler için, } U = U_{ff} = \sqrt{3} \cdot V \quad (2.5)$$

Sinusoidal formdaki işaretler için güç değerleri ise:

tek fazlı sistemler için,

$$\text{ani güç; } p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.6)$$

$$\text{görünür güç; } S = V \cdot I \quad (2.7)$$

$$\text{aktif güç; } P = V \cdot I \cdot \cos(\theta - \delta) \quad (2.8)$$

$$\text{reaktif güç; } Q = V.I.\sin(\theta - \delta) \quad (2.9)$$

üç fazlı sistemler için,

$$\text{ani güç; } p(t) = 3 \cdot v(t) \cdot i(t) \quad (2.10)$$

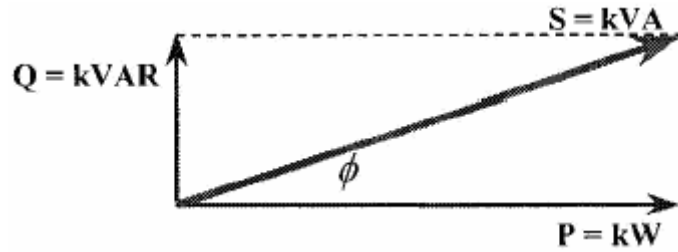
$$\text{görünür güç; } S = \sqrt{3} \cdot U.I \quad (2.11)$$

$$\text{aktif güç; } P = \sqrt{3} \cdot U.I.\cos(\theta - \delta) \quad (2.12)$$

$$\text{reaktif güç; } Q = \sqrt{3} \cdot U.I.\sin(\theta - \delta) \quad (2.13)$$

ayrıca,

$$\beta = \theta - \delta \text{ için, güç faktörü} = \cos(\beta) = P/S \quad (2.14)$$



Şekil 2. 4 Sinusoidal işaretler için güç vektörleri

Şehir merkezinde, bir 'doğal park' görünümündeki Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsü içinde bulunan tarihi yapı içinde oluşturulmuş modern mekanlarda, kütüphanesi, konferans salonu, basketbol, futbol, yüzme vd. spor tesisleri ve çok yakında hizmete girecek olan öğrenci kulüpleri, cep sineması, sergi salonu, kantin vd. sosyal tesisleriyle, gürültüsüz ve huzurlu bir ortamda akademik ve sosyal faaliyetlerini sürdürmektedir.

2.1.2 Sinusoidal Olmayan İşaretler İçin Akım, Gerilim ve Güç Bağlılıları

Kaliteli bir enerjide, yani akım ve gerilim sinyalinin istenilen bir formda ve nominal çalışma frekansında, harmonikler olmadığı için görünür gücün bileşenleri sadece aktif ve reaktif güçten oluşurken güç faktörü de $\cos(\beta)$ ' ya eşit olur. Harmonikli durumlarda ise işaretlerin ifadeleri, dolayısıyla güç ifadeleriyle beraber güç faktörü ifadeleri de değişir, şöyle ki;

Harmonikli devrelerde sırasıyla gerilimin ve akımın ani değerleri:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \cdot V_1 \cdot \sin(\omega t + \theta_1) + \sqrt{2} \cdot V_2 \cdot \sin(2\omega t + \theta_2) + \sqrt{2} \cdot V_3 \cdot \sin(3\omega t + \theta_3) + \dots + \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_n) \quad (2.15)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sin(\omega t + \delta_1) + \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \delta_2) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \delta_3) + \dots + \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \delta_n)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n(t) = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \delta_n) \quad (2.16)$$

Harmonikli devrelerde gerilim ve akımın efektif değerleri,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots} \quad (2.17)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots} \quad (2.18)$$

matematiksel tanımlamaları ile ifade edilir. Harmonik işaretlerden dolayı akım ve gerilim değerlerinin değişmesi güç tanımlarını da değiştirmiştir. Aşağıda sırası ile görünür güç, aktif güç, reaktif güç ve yeni bir kavram olan distorsiyon gücü matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Harmonikli devrelerde güç tanımları,

$$\text{görünür güç: } S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.19)$$

$$\text{aktif güç: } P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.20)$$

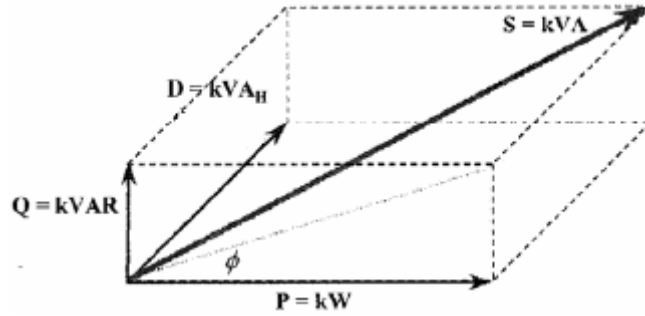
$$\text{reaktif güç: } Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.21)$$

$$\text{distorsiyon gücü: } D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.22)$$

Eşitlik (2.19)'da harmoniklerin olmadığı durumlar için distorsiyon gücü D=0 olur. Tam kompanzasyon yapılarak reaktif gücü yok edilebilir. Bu durumda güç faktörü P/S = 1 yapılabilir. Başka bir deyişle, distorsiyon gücü olmadığı zaman reaktif güç kompanzasyonu ile akım ile gerilim arasındaki faz farkı sıfıra indirebilir $\cos(\beta)$ 'yı 1 dolaylarına ulaştırılabilir.

Sistemde harmoniklerin olduğu durumlarda distorsiyon gücü $D \neq 0$ halini alır. Harmonikli sistemi tam kompanzasyon yapsak dahi güç faktörü P/S değeri hiçbir zaman "1" değerini

alamayacak ve sistemden sadece aktif güç hiçbir zaman çekilmemiş olacaktır. Bu yüzden sistem yükünün güç faktörünü $P/S = 1$ yapmamız için ilk olarak sistemdeki harmonikleri elimine etmemiz gerekmektedir.



Şekil 2.5 Sinusoidal olmayan işaretler için güç vektörleri

Harmonik içermeyen devrelerde aktif güç ve reaktif güç bileşenlerinden görünür güç oluşmaktadır, aktif güç W, reaktif güç VAR ve görünür güç de VA birimleri ile ifade edilir. Harmonikli devrelerde ise distorsiyon gücü adı altında yeni bir güç bileşeni ile karşılaşmaktayız. Görünür gücün bu üçüncü bileşeni olan distorsiyon gücü ise VAd şeklinde birimlendirilir. Günümüzde hala distorsiyon gücünün ne tür bir güç kategorisine konulacağına dair tartışmalar vardır, bilim adamlarının elektrik dünyasına sunduğu bir takım farklı görüşteki fikirler bu hususta mevcuttur. Fikirlerin, harmonik distorsiyonun şebekeden kaynaklı mı yoksa yükün nonlineerliğinden kaynaklı mı oluşlarına göre harmonikli güç bileşenlerini bilim adamları formülize etmeye çalışmışlardır.

Çizelge 2. 1 Harmoniklerin kaynak ve yüke göre durumları

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	Açıklama
sinusoidal	lineer	yok	yok	harmonik bileşenler yok
sinusoidal	nonlineer	yok	var	yük nedeniyle akımda harmonikler oluşur
nonsinusoidal	lineer	var	var	gerilim ile aynı harmonik bileşenler bulunur
nonsinusoidal	nonlineer	var	var	aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir

2.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu

Toplam harmonik distorsiyonu, harmonikler konusunda nicel karşılaştırmalar yapabilmek için oluşturulan bir kavramdır. Bir tesiste harmoniklerin ne kadar olduğu hakkında bilgi veren bir

değerdir. Harmonik sınırlandırmalarında bahsi çok geçen bir harmonik kavramdır. Hem gerilim (THD_v) hem de akım (THD_I) için hesaplanan toplam harmonik distorsiyonu sistemdeki harmonik bileşenlerin efektif değerinin temel bileşenin efektif değerine oranı şeklinde tanımlanır.

Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad THD_v = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (2.23)$$

Akım için toplam harmonik distorsiyonu:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (2.24)$$

Toplam harmonik distorsiyonu ile harmonikli devrelerde güç faktörü ifadesini aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100}\right)^2} \quad \text{ve} \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad \text{ise,}$$

$$\text{Güç faktörü} = \frac{P}{V \cdot I} = \frac{P}{V_1 \cdot I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (2.25)$$

2.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu

Piyasada ve hesaplamalarda toplam harmonik distorsiyonu kadar pek kullanılmayan bir kavramdır. Harmonikli gerilimin temel bileşenine oranıdır. Hem gerilim HD_v hem de akım HD_I için vardır :

$$HD_v = \frac{V}{V_1} \quad (2.26)$$

$$HD_I = \frac{I}{I_1} \quad (2.27)$$

2.4 Toplam Talep Distorsiyonu

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

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.28)$$

2.5 Şekil Faktörü

Bozulmuş sinusoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verir.

k_f = efektif değer/ ortalama değer

2.6 Tepe Faktörü

Tepe değerinin temel bileşenin efektif değerine oranıdır. Sinusoidal bir işaretle bu oran $\sqrt{2}$ 'dir.

2.7 Yüklerin Karakteristikleri

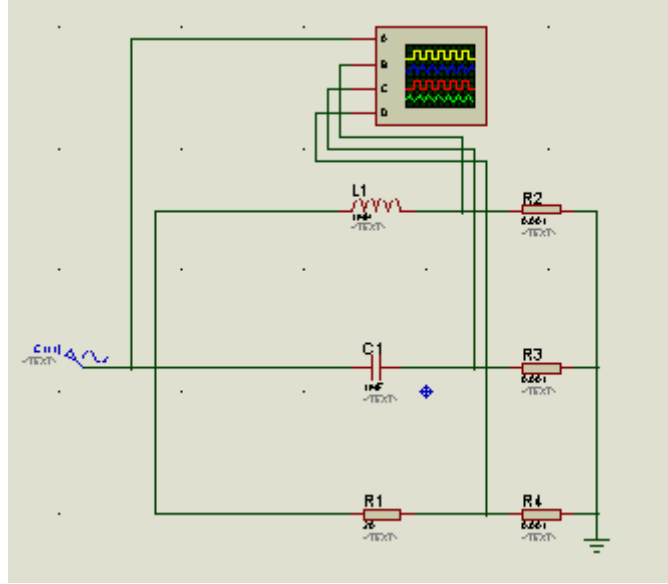
Şebekeye bağlanan tüm yükler akım-gerilim ilişkisine göre genel olarak, lineer (doğrusal) yükler ve nonlinear (doğrusal olmayan) yükler olarak iki gruba ayrılır.

2.7.1 Lineer Yükler

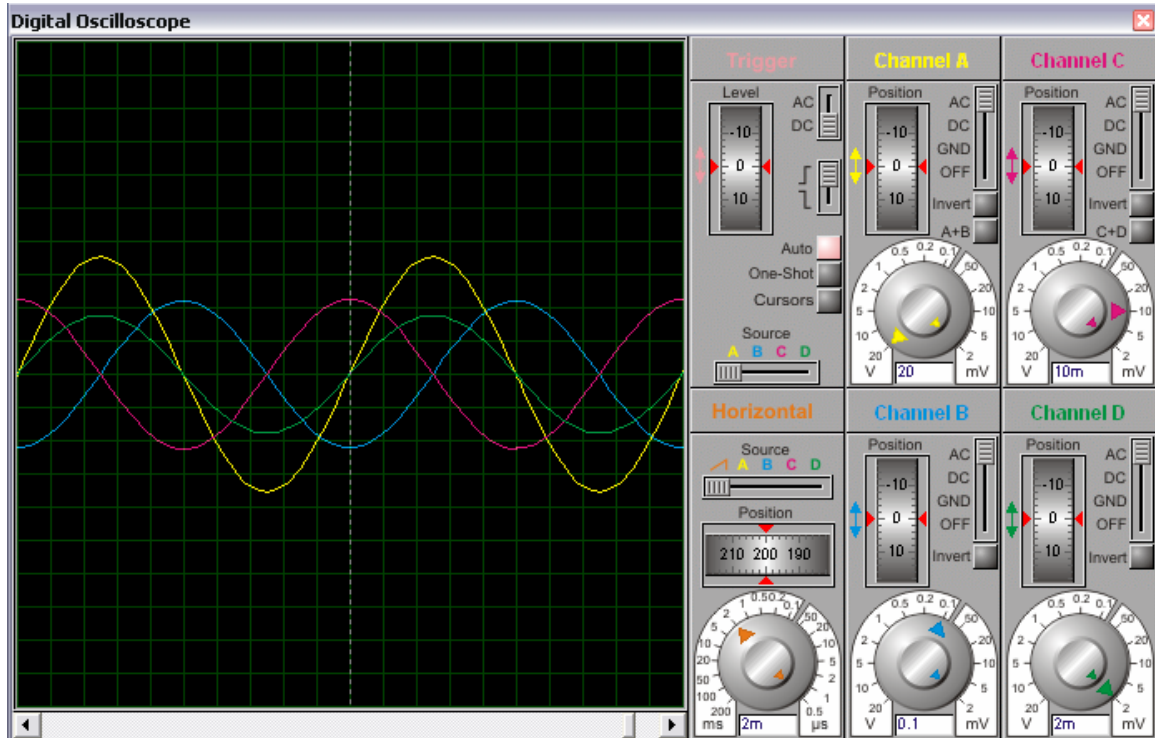
Bir elektrik tesisindeki bir yükün gerilimi ve çektiği akım arasında doğrusal bir ilişki var ise bu yük lineer elemandır denilebilir. Akım ve gerilim arasındaki doğrusal ilişkiden kasıt, her iki sinyalin belirli anlardaki değerlerinin birbirine oranının aynı olmasıdır. Lineer bir yükte bu ifadeden yola çıkarak da gerilimin akımına oranı olan sabit empedans değerine ulaşmış oluruz. Ayrıca bir yükteki akım ve gerilimi arasındaki faz farkı o yükün lineerliğini etkilemez. Elektrikli devrelerin modellenmesinde, piyasada kayıpları ve türlü elektrik problemlerini önlemede kullanılan endüktans ve kapasitörler tek başlarına devreye alındıklarında

üzerinden geçen akımların gerilime göre geri ve ileri değerde olmasına sebebiyet verir. O halde lineer yükleri direnç, endüktans ve kapasitör devre elemanları ile örnekleyebiliriz.

Aşağıda Şekil 2.6'da proteus simulasyon programında AC bir gerilim kaynağına direnç, endüktans ve kondansatör devre elemanları paralel olacak şekilde bağlanmıştır. Bu çizilen devrenin de hemen üstünde dijital bir osiloskop yerleştirilmiştir ki osiloskobun ekran görüntüsü de Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 6 Lineer yüklerin benzetim ortamında devre şeması



Şekil 2. 7 Yüklerin üzerindeki akım ve gerilimler

Devre şemasında osiloskop proplarının renklerine göz attığımızda, sarı renk, AC gerilim kaynağının gerilim değerini gösteren prob, mavi renk, 1mH değerindeki endüktans üzerinden geçen akım değerini gösteren prob, kırmızı renk, 1mF değerindeki kondansatör üzerinden geçen akım değerini gösteren prob, yeşil renk, 20 ohm değerindeki direnç üzerinden geçen akım değerini gösteren prob olarak tayin edilmiştir.

Gerilim kaynağının sinyali referans aldığımızda, endüktif yük üzerinden geçen akımın geri, kapasitif yük üzerinden geçen akımın ileri ve rezistif yük üzerinden geçen akımın da sinyal ile aynı fazda ilerlediğini görürüz. Gerilim sinyali gibi yüklerin çektiği akım sinyali de sinusoidal bir işarettir. Görüldüğü gibi lineer yüklerin akım ve gerilim karakteristiklerine baktığımızda her eleman için iki sinyalin de birbirine karşı bir doğrusallıktan ibaret olduğunu görürüz.

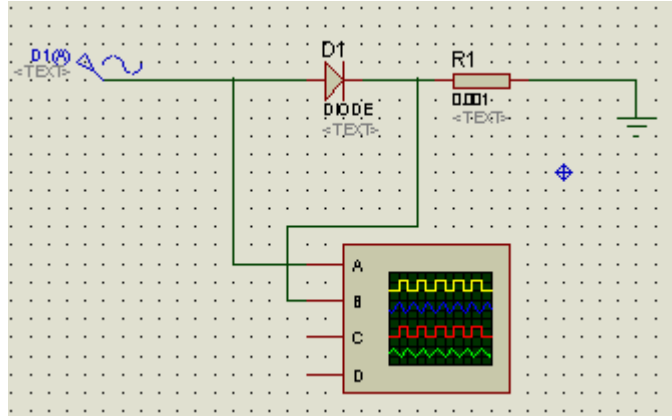
2.7.2 Nonlineer Yükler

Lineer yük özelliklerini içinde barındırmayan yüklerdir, gerilimi ve üzerinden geçen akımı arasında bir doğrusallık olmayan yük tipleridir, akım gerilim karakteristiğinde bir doğrusallık olmadığı için de nonlinear yükün çektiği akım sinyali sinusoidal olmayan bir işaret olacaktır. Akım sinyalinin bu şekilde sinusoidal olmaması harmoniklerin oluşumunun başlıca sebebidir. Tezin ileriki bölümlerinden 3 nolu harmonik üreten kaynaklar konu başlığında bu kaynakları sıraladığımızda farklı türlerdeki cihazların çektiği akımın sinusoidal olmadığını daha iyi ele alınmıştır. Şimdilik simülasyon programında nonlinear bir yükün çektiği akımı incelemek için bu yükü herhangi bir elektronik devre elemanı ile modellememiz yeterli olacaktır. Onun için AC güç kaynağımıza en basitinden bir diyot bağlayarak bu nonlinear yükün akım ve gerilim karakteristiğini inceleyelim.

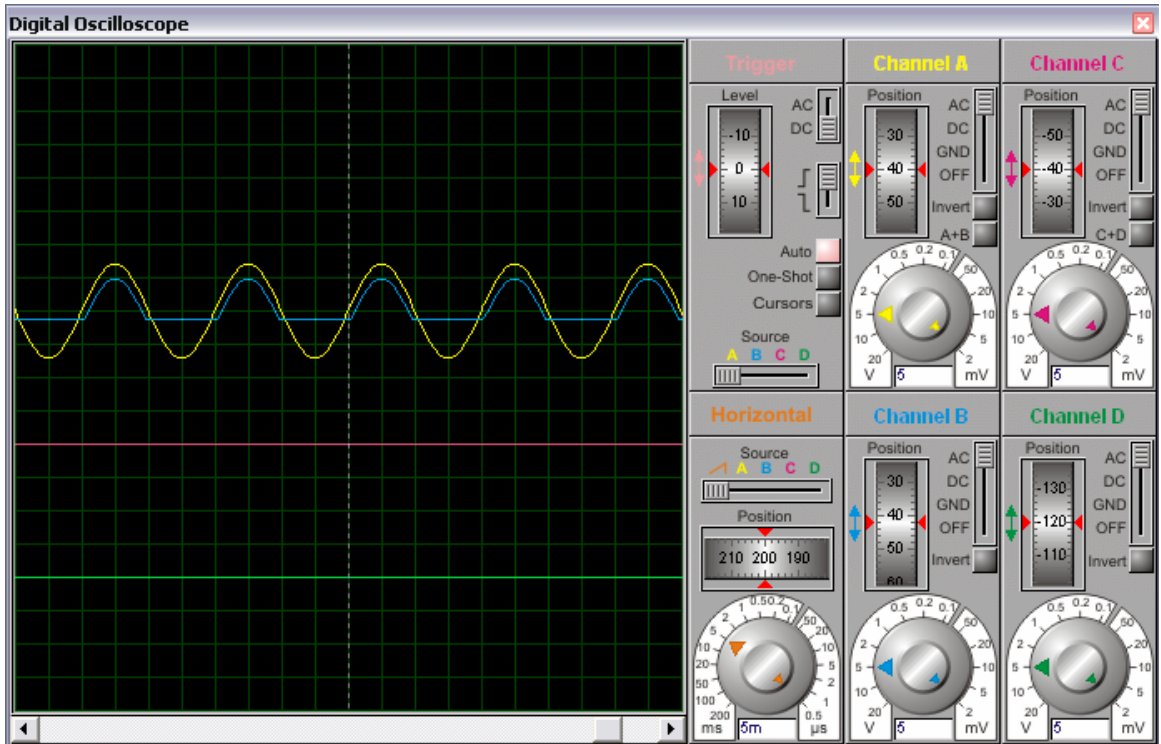
Aşağıda Şekil 2.8’de gerilim kaynağına yarı iletken devre elemanı olan diyot ve ona seri düşük değerde bir direnç bağlanmıştır. Osiloskop ile nonlinear yükün akım ve gerilim sinyallerini görmek için problar devreye alınmıştır, şöyle ki:

Sarı renk, gerilim kaynağının sinyali, mavi renk, yarı iletken elemanın üzerinden geçen akım sinyali göstermektedir.

Devre düzeneği simülasyon programında kurulup çalıştırıldığında dijital osiloskop ekranında yükün üzerindeki gerilim ve çektiği akım Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2. 8 Nonlinear yüklerin benzetim ortamında devre şeması



Şekil 2. 9 Nonlinear yük üzerindeki akım ve gerilim

Osiloskop ekranından anlaşılaçağı üzere yarı iletken devre elemanı olan diyot, yarı periyot AC akımını geçirmiş, diğer yarı periyotta ise kesimde kalmaktadır. Böyle bir durumda nonlinear yükün akım ve gerilim karakteristiğinin doğrusallığından bahsedemeyiz. Yükün karakteristiğinin doğrusal olmamasını empedans üzerinden değerlendirebilirsek; yük yarı periyotta düşük bir empedans ile akımı geçirirken, diğer yarı periyotta yüksek bir empedans değeri göstererek akımı geçirmemiştir. Yani yük devrede olduğu sürede değişken bir empedans politikası işlemiştir, halbuki lineer yüklerde empedans değeri sürekli sabittir.

2.8 Nonsinusoidal Dalgaların Analizi

Elektrik enerji sistemlerinde akım ve gerilim sinyallerinin çeşitli sebeplerden sinusoidal dalga formundan uzaklaşması enerji kalitesizliğine neden olmaktadır. İşaretlerin sinusoidal formdan iyice uzaklaşması cihazların çalışmamasına, yanlış çalışmasına, eksik çalışmasına ve ya nominal değerlerinin üzerinde çalışmasına sebep olmaktadır. Bu türlü problemleri giderebilmek için sinyalleri en iyi şekilde analiz etmek gerekir.

Nonsinusoidal işaretlerin analizi konusunda Fransız fizikçi ve matematikçi Joseph Fourier' in teorisi bilim dünyasına tanıtılmıştır. Kendi adının verildiği Fourier serileri olarak bilinen bu teoride nonsinusoidal periyodik bir işaretin farklı frekans ve genlikteki birçok sinusoidal işaretin toplamından oluşabileceğini bununla beraber nonsinusoidal işaretin farklı frekans ve genlikteki birçok sinusoidal işaret ile tanımlanması izah edilmektedir.

2.8.1 Fourier Serilerinin Matematiksel İfadesi

Fourier analizi yapılan nonsinusoidal bir işaretin sinusoidal olarak toplamı aşağıdaki şekildeki gibi formülize edilebilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \sin nt + B_n \cdot \cos nt) \quad (2.29)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin(nt + \beta_n) \quad (2.30)$$

Yukarıdaki eşitliklerin katsayıları elektrik sistemlerinde:

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$ harmonik mertebesi

t = bağımsız değişkeni

A_0 = ortalama değeri

A_n ve B_n = fonksiyonun harmonik katsayılarını

C_n = tek sinusoidal forma dönüştürülmüş işaretin katsayılarını ifade etmektedir.

Eşitlik (2.29) ve Eşitlik (2.30) un birbiri arasındaki dönüşüm ilişkisini aşağıdaki eşitlikler belirtmektedir:

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \beta_n = \tan^{-1}(B_n / A_n) \quad (2.31)$$

2.8.2 Trigonometrik Biçim

Fourier serilerinin trigonometrik biçimi aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir:

$$f(t) = A_0 + A_1.\sin(t) + \dots + A_n.\sin(nt) + B_1.\cos(t) + \dots + B_n.\cos(nt) \quad (2.32)$$

Eşitlik (2.32)' deki ifadenin katsayıları şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t).dt \quad (2.33)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t).\sin(nt).dt \quad (2.34)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t).\cos(nt).dt \quad (2.35)$$

Güç sistemi için bu ifadeler kullanıldıktan sonra tüm denklem eşitlik (2.31)'deki forma dönüştürülür. Elde ettiğimiz sonucu grafiksel olarak kağıda dökersek harmonik analizör cihazlarının ekran görüntüsü şeklinde analizi elde ederiz.

HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

Güç sistemlerinde gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulmasına sebep olan harmonikler akım ve gerilim karakteristikleri lineer olmayan devre elemanlarınca üretilirler. Güç sistemleri elemanlarının yük karakteristiklerinin lineer olmayışı şebekeye ana frekansın tam katları şeklinde, genlikleri temel bileşenden daha düşük değerde olan sinyallerin enjekte edilmesine neden olmaktadır. Harmonik kaynaklar olarak ifade edilen bu durumun elemanlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Konverterler
- Generatörler
- Motorlar
- Transformatörler
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları
- Fotovoltatik sistemler
- Bilgisayarlar
- Elektronik balastlar
- Kesintisiz güç kaynakları
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kaynak makinaları
- Kontrol devreleri
- Frekans dönüştürücüleri

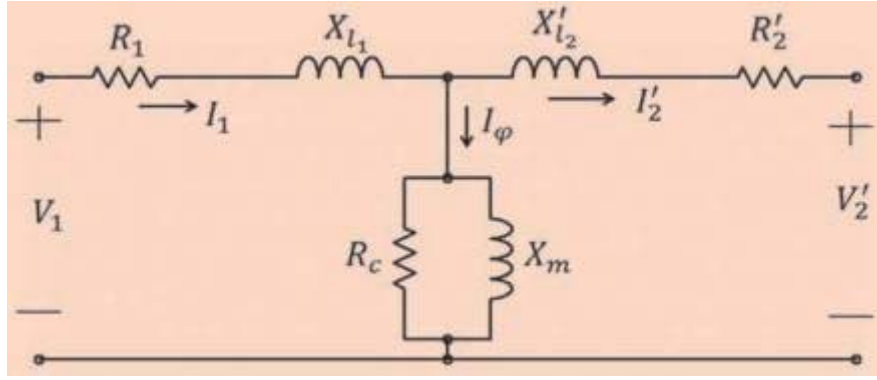
- Statik Var kompanzatörler
- Ark fırınları
- Yüksek gerilim DC enerji iletimi
- Elektrikli ulaşım sistemleri

Harmonik üreten kaynakları bu şekilde teker teker yazılırsa sayfalar alabilir. Listeye göz attığımızda harmonik üreten bu kaynakların ortak noktalarının olduğunu görebiliriz. Kesintisiz güç kaynakları, anahtarlama güç kaynakları, elektronik balastlar, bilgisayarlar, konverterler gibi devre elemanları daha çok nonlinear olan elektronik elemanları içermektedir, bu devre elemanlarının işlevlerini göz önüne alırsak bunların sabit bir gerilim değeri ile aktif olarak çalışan ve değişik zamanda değişik değerlerde akım çeken elemanlar olduğunu görürüz. Yarı iletken teknolojisinin hızla gelişmesi ve kullandığımız her cihaza hükmetmeye başlamaları insanlık için faydalı olduğu kadar şebekeden çektiği akım sinyalinin sinusoidal olmaması da güç tesislerinde problem yaratmaktadır. Ark fırınları, kaynak makinaları, gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ise anlık akım çekme özelliklerinde farklı tarzda harmonik kaynağı olmuşlardır. Öte yandan generatörler, motorlar, transformatörler gibi devre elemanlarının akım gerilim karakteristiklerinin belli değerlerde yüklenmelerinde doymaya girmesi, magnetik nüve içermesi gibi nedenlerden nonlinear olması da başka bir tarzda harmonik kaynağı olduklarını göstermektedir.

Harmonik kaynaklarını harmonik üretme açısından hangisinin daha etkin olduğu şeklindeki sıralamayı devre elemanının ancak gücünden ötürü yapabiliriz. Kimi güç sistemi elemanlarının harmonikleri temel bileşen değerlerine oldukça yakındır fakat düşük güçlü bir yük olduğu için tesise zararı o kadar fazla değildir; veya filtresiz elektronik balastlı flouresant lambalar harmonik seviyeleri temel bileşen kadar olmasa da harmonik üretirler; fakat aydınlatmada çok sayıda kullanıldıklarında düşük güçteki bu aydınlatma araçların elektrik tesisinde üretecekleri harmonikler göz ardı edilemeyecek duruma gelirler.

3.1 Transformatörler

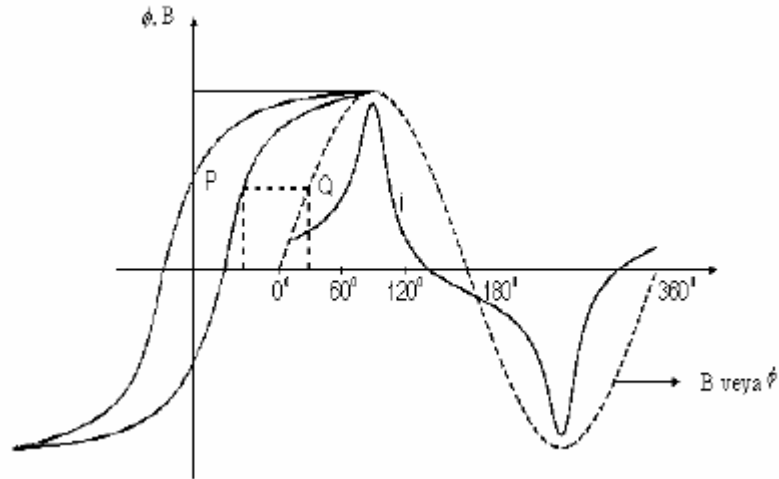
Güç sistemlerinin en önemli elemanlarından olan transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden yük karakteristiği lineer değildir. Akım gerilim karakteristiği doğrusal olmadığı için ve ya transformatörün demir çekirdeğinin doymaya gitmesi sebebiyle harmonik distorsiyona neden olurlar.



Şekil 3. 1 Transformatörün eşdeğer devresi

Şekil 3.1’de transformatör eş değeri devresi görülmektedir. Burada R_1 , X_{l1} primer direnci ve reaktansını, R'_2 , X'_{l2} primere indirgenmiş sekonder direnç ve reaktansını, R_c demir kayıplarına karşılık gelen direnç ve buna paralel X_m mıknatıslanma reaktansdır, mıknatıslanma reaktansının doymaya girmesinden ötürü transformatör harmonik üretmektedir.

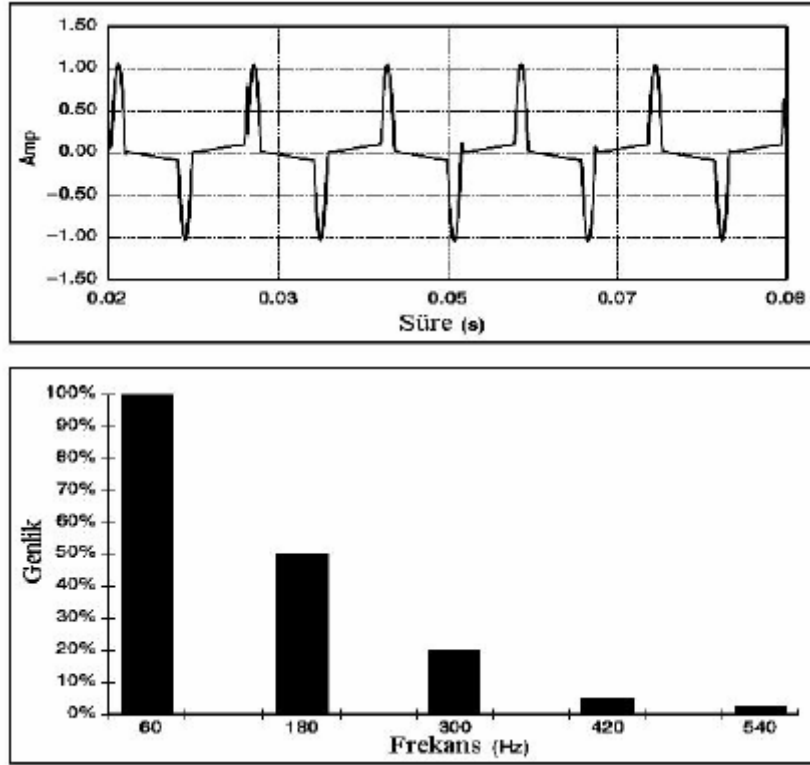
Sürekli devrede olan transformatörler yüklerin az olduğu gündüz vakitleri harmonik kaynağı olan mıknatıslanma akımı daha fazla olmaktadır, zira yük azaldığı için gerilim düşümleri ortadan kalkacak ve transformatör de aşırı uyarılmış olacaktır. Transformatör de aşırı uyarıldığı için doyuma ulaşmış olur ve 3., 5. ve 7. harmonikleri etkili bir şekilde üretirler.



Şekil 3. 2 Histeresiz kayıpları ile birlikte mıknatıslanma eğrisi [1]

Şekil 3.2’de histerezis kayıpları da hesaba katıldığında mıknatıslanma akımı ve akının zamanla değişimi gösterilmiştir.

Mıknatıslanma eğrisi sıfır noktasına göre simetrik olduğundan mıknatıslanma akımı $n=1,3,5,7...$ dereceden sinusoidal bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilir, Şekil 3.3'deki bir analizörden bu durum görülmektedir.



Şekil 3. 3 Transformatörün mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu (Dugan [4])

3.1 Transformatör Bağlama Grupları ve Harmonikler

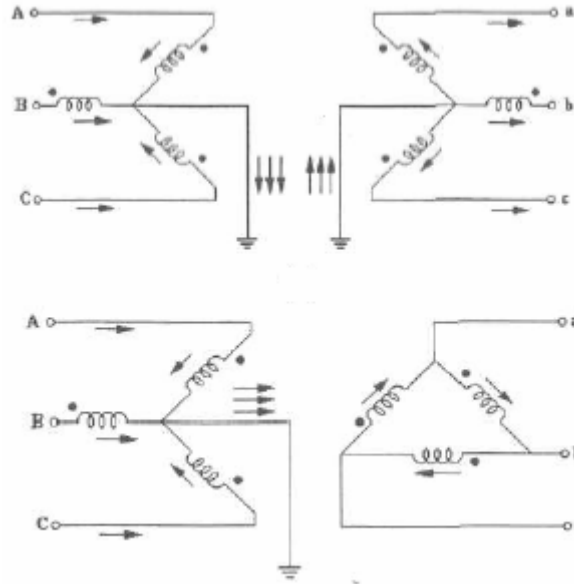
Transformatörlerde oluşan mıknatıslanma akımının üretmiş olduğu harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi transformatörlerin bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması, transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır.

Transformatörlerin bağlantı şekilleri ne olursa olsun şebekelerden daima 1, 5, 7, 11, 13. harmonikleri çekerler. 3 ve 3'ün katları şeklinde oluşan harmonikler transformatörleri çeşitli şekilde bağlayarak yok edilebilir. Mıknatıslanma akımının oluşturduğu, nötr iletkeninin aşırı yüklenmesine sebep olan 3'ün katları olan harmonikler dengeli sistemlerde:

-primeri ve sekonderi yıldız bağlı transformatörler için, primerin yıldız topraklanmış transformatör bağlama grubunda bu harmonikler şebekeye toprak üzerinden geçer. Primerin yıldız noktası topraklanmamışsa 3'ün katı olan harmonikler şebekeye geçmezler.

-primeri üçgen bağlı transformatörler için, faz sargılarında meydana gelen 3'ün katı harmonikler üçgen sargıdan dışarı çıkamazlar, bu yüzden şebekeden 3'ün katı harmonikler çekilmez.

-transformatörün sekonderi üçgen bağlı olması şebekeden çekilmesi istenmeyen 3'ün katı olan harmonikleri önlemek için en çok kullanılan önlemdir.



Şekil 3. 4 Yıldız/yıldız ve yıldız/üçgen bağlı trafolarda 3. ve 3'ün katı harmonik akım yönleri

Transformatörün lineer olmayan yük tarafının yıldız, şebeke tarafının üçgen bağlı olması 3'ün katı olan harmoniklerin önlemede tavsiye edilen en önemli yöntemdir. Bütün bu fikirler dengeli yükler için sunulmaktadır. Yükün dengesizliği durumunda ise transformatörlerde ne tür bağlantı kurulursa kurulsun şebekeden 3'ün katı harmoniklerin çekilmesi önlenemez.

3.2 Generatörler

Senkron generatörler çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından ötürü harmonik üretirler. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Generatörlerdeki bu sebeplerden ötürü oluşan harmonikleri önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinusoidal olması sağlanır.

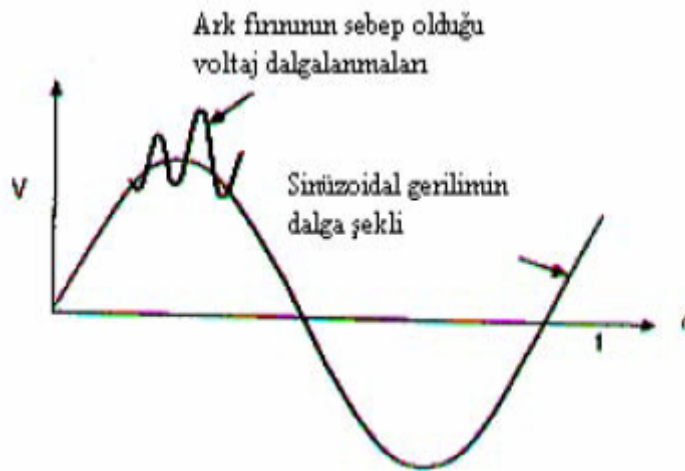
Generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir, generatörün dört iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör ve ya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanmak suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. (Kocatepe vd. [1])

3.3 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir yer tutar. Bunlar yüksek gerilim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Ark fırınları elektrik arkının akım-gerilim karakteristiği lineer değildir.

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

Ark fırınlarının çalışma şartlarındaki bu değişimlerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlar da gelişigüzel olur. Benzetim ortamlarında ark fırınlarının modellenmesi bu yüzden zordur. Şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Böylece şebekeye temel frekans haricinde başka frekansta olan harmonik işaretler enjekte edilir.



Şekil 3. 5 Ark fırınlarının gerilime etkisi

Tipik bir ark fırınında 2,3,.....,9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşeninin temel bileşenin %30' u kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,...10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4 ile %1.3 arasında dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. (Kocatepe vd. [1])

3.4 Gaz Deşarj Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar gibi gazın deşarj prensibiyle çalışan bu tür aydınlatma elemanları doğrusal olmayan bir akım-gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Bina ve çevre aydınlatmasında sıklıkla kullanılan bu elemanlar tek sayılı harmonikleri özellikle de 3 ve 3'ün katı harmonikleri ürettiği için tesisin nötr hattında ısınmalara neden olabiliyorlar.

Floresant lambalarda akım sınırlayıcı olarak kullanılan magnetik balastlar da harmonik üretiminde etkin rol oynamaktadır, günümüzde teknolojiyle beraber magnetik balastların yerini anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar almıştır. Filtreli ve filtresiz olarak üretilen elektronik balastlar da magnetik balastlara nazaran daha fazla harmonik üretmektedir, özellikle filtresiz elektronik balastlar çok fazla harmonik üretmektedir. Piyasada tasarruf ampulleri olarak geçen bu tip lambaların; $\cos(\theta)=0.96$ (temel bileşen işaretler arası) ve $PF=0.60$ civarlarında etiket değerleri olması iyi bir harmonik kaynağı olduklarını göstermektedir.

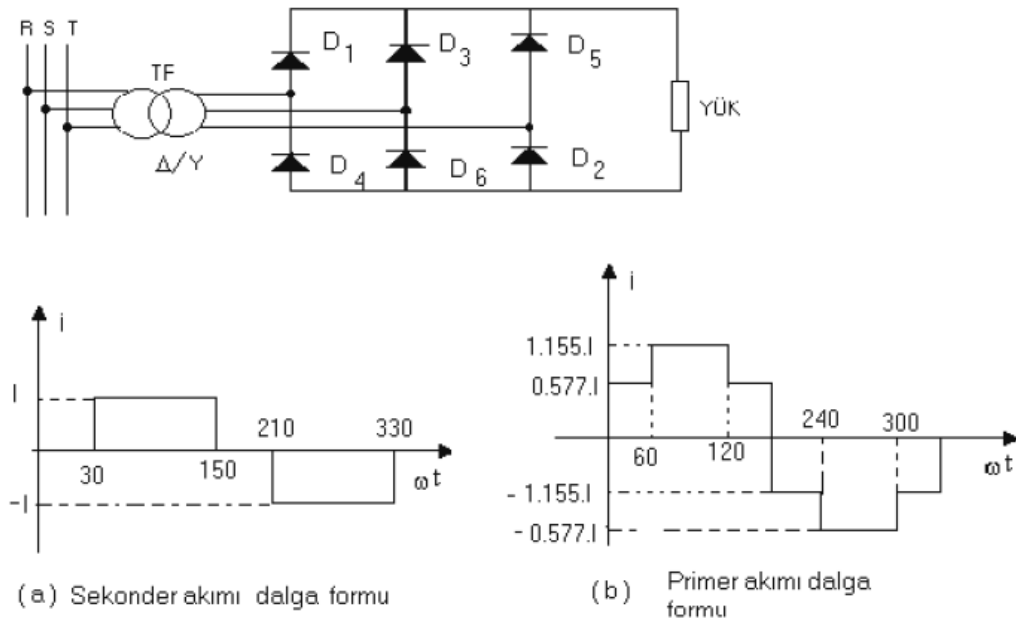
3.5 Fotovoltatik Sistemler

Fotovoltatik sistemlerde kullanılan konverterler harmonik oluşumuna sebep olurlar, Güneş enerjisi ile elde edilen doğru akım, alternatif akıma çevrilirken konverterlere ihtiyaç vardır. Konverterlerde kullanılan yarı iletken elemanlar şebekeye harmoniklerin enjekte edilmesine sebep olurlar.

3.6 Doğrultucular

Doğrultucular alternatif akımı doğru akıma çeviren cihazlardır. Kullanılan elemanların kontrol edilebilirliğine göre kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere ikiye ayrılırlar. Enerji sistemlerindeki önemli başlıca harmonik kaynaklarından biri, tek fazlı ve üç fazlı doğrultuculardır. Üç fazlı ideal doğrultucuların tek fazlı doğrultuculara karşı avantajı üç fazlı doğrultucuların 3 ve katı

olan harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı doğrultucular, doğrultucu transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanımlanır. Dengeli durumda 3. harmonik ve diğer üçün katı mertebesindeki harmonikleri üretmez. Genellikle en yüksek genlikli harmonikler olan 3. 5. ve 7. harmonik akımlarını üretmez. Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir.



Şekil 3. 6 Doğrultucunun oluşturduğu harmonikli dalga şekli

3.7 Bilgisayarlar

Donanımlarında bulunan mikro işlemlerinden ötürü çok hassas olan bilgisayarlar harmoniklerden çok etkilendiği kadar harmonik kaynağı olarak da şebekeyi etkilemektedir. Bilgisayarların doğrusal bir yük olmayışı güç sistemlerinde gerilim düşümleri ile beraber, 3 ve 3'ün katları harmoniklerin üretiminden ötürü nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedir. Bilgisayarların çok olduğu iş kulelerinde harmoniklerden dolayı nötr iletkeni çok yüklendiği için nötr hattı için faz iletkeninin bir ya da iki üst kesitli iletken seçilmektedir.

3.8 Statik VAr Kompanzatörleri

Sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri sebebiyle tristör kontrollü reaktörler, güç sisteminin performansını pek çok yönden geliştirebilir. Güç sistem frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımlarının önlenmesi olarak sıralanabilir.

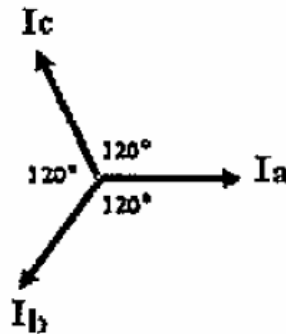
Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü maksadıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik Var kompanzatörleri, içerdikleri nonlineer elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptir. Statik Var kompanzatörler bu sebeple bağlı oldukları güç sisteminde nonsinusoidal büyüklüklere neden olurlar. (Kocatepe vd. [1])

HARMONİKLERİN ZARARLI ETKİLERİ

Çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelen, enerjide kalitesizliğe sebep olan harmoniklerin şebekeye veya şebekedeki elemanlara birçok olumsuz etkileri vardır. Aşağıda başlıklar halinde bu olumsuzluklara yer verilmeye çalışılmıştır.

4.1 Harmonikli Akım İşaretleri

Dengeli bir sistem a, b, c fazları aralarında 120'şer derece faz farkı olacak şekilde sıralanması ile oluşur. Genel olarak ifadelerde "a" fazı birinci faz, faz açısı "0" derece, "b" fazı ikinci faz, faz açısı birinci fazdan 120 derece geride ve "c" fazı da üçüncü faz, faz açısı ikinci fazdan 120 derece geridedir. Dengeli kabul edilen sistemlerin faz akımları sıralanışı şekildeki gibi grafiksel olarak gösterilir.



Şekil 4. 1 Dengeli sistemlerde akım bileşenleri

Dengeli sistemlerde harmoniklerin olmadığı durumlarda faz akımları,

$$i_a(\omega t) = \sqrt{2}.I_1.\sin(\omega_1 t + 0^\circ) \quad (4.1)$$

$$i_b(\omega t) = \sqrt{2}.I_1.\sin(\omega_1 t - 120^\circ) \quad (4.2)$$

$$i_c(\omega t) = \sqrt{2}.I_1.\sin(\omega_1.t + 120^0) \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Dengeli sistemlerde harmonikler olduğu vakit ise,

$$i_{an}(\omega t) = \sqrt{2}.I_n.\sin(n.\omega_1.t + n.0^0) \quad (4.4)$$

$$i_{bn}(\omega t) = \sqrt{2}.I_n.\sin(n.\omega_1.t - n.120^0) \quad (4.5)$$

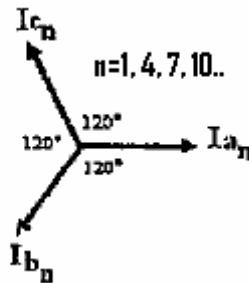
$$i_{cn}(\omega t) = \sqrt{2}.I_n.\sin(n.\omega_1.t + n.120^0) \quad (4.6)$$

faz tanımlamaları en genel ifade ile bu şekilde tanımlanabilir.

Genel ifadede harmonik değeri “n” in alacağı kimi değerler faz sırasını değiştirebilecek, bazı değerler faz sırasını değiştirmeyebilecek, geri kalan değerler de fazların çakışmasına sebep olacaktır. Harmonik değerinin fazları bu denli etkilemesi harmonik bileşenlerin sınıflandırılmasına sebep olmaktadır.

4.1.1 Pozitif Bileşen Harmonikler

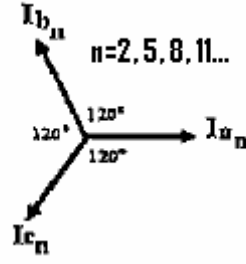
n=1, 4, 7, 10, 13.... Pozitif bileşen harmonikleridir; zira faz sırasında herhangi bir değişiklik göstermemektedir.



Şekil 4. 2 Pozitif bileşen harmonik akımları

4.1.2 Negatif Bileşen Harmonikler

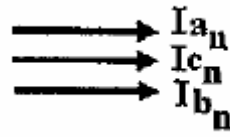
n=2, 5, 8, 11, 14.... Negatif bileşen harmonikleridir; zira ikinci ve üçüncü fazın yerleri değişmektedir.



Şekil 4. 3 Negatif bileşen harmonik akımları

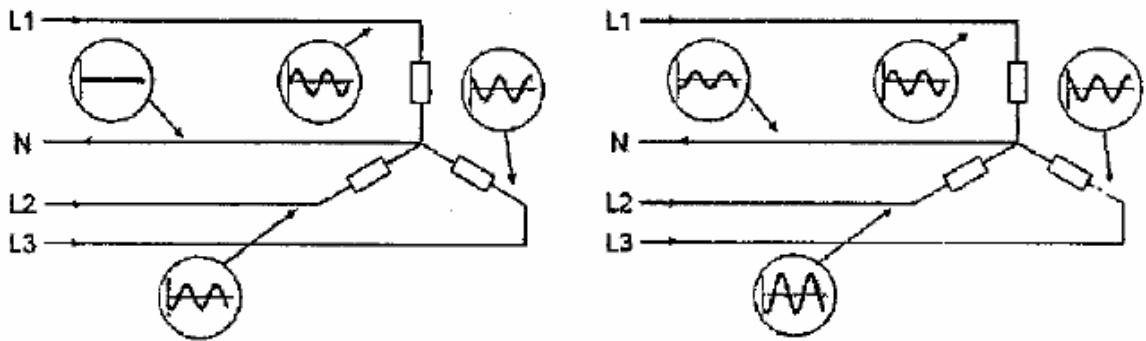
4.1.3 Sıfır Bileşen Harmonikler

$n=3, 6, 9, 12, 15, \dots$ Sıfır bileşen harmonikleridir; zira tüm fazlar birinci faz vektörü ile çakışır.



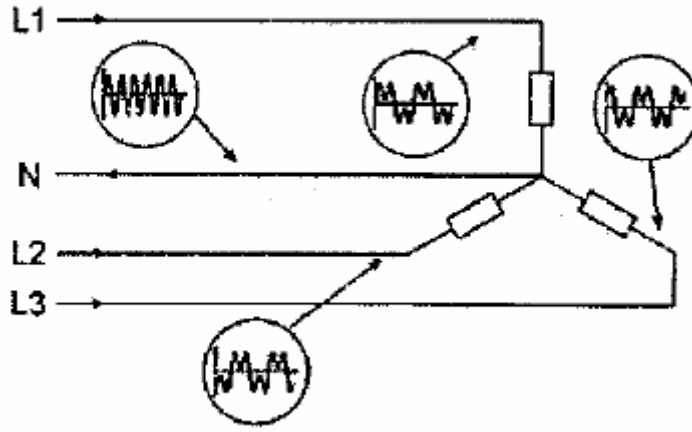
Şekil 4. 4 Sıfır bileşen harmonikleri

Dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç faz akımının sıfır harmonik bileşenleri birbirine eşittir. Bu nedenle nötr hattından üç faz akımının toplamı geçtiği için dengeli sistemde bir fazdan geçen 3 ve 3'ün katı harmonik akımın 3 katı nötr hattından geçer. Tesislerde genelde nötr iletken kesiti faz iletken kesitinin bir alt kesiti seçilirken böyle durumlarda yani 3.harmonik akımının etken olduğu tesislerde nötr iletken kesiti faz iletken kesitinin bir üst kesiti bile seçilebilir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi harmonik olmayan dengeli sistemin nötr iletkeninden akım akmazken, dengesiz sistemin nötr iletkeninden yaklaşık faz akımı kadar akım akmaktadır.



Şekil 4. 5 Dengeli ve dengesiz sistemlerde nötr üzerindeki akımlar

Aşağıda Şekil 4.6'da ise 3. harmonik bileşenin etkin olduğu bir sistemde ise nötr iletkeninden geçen akım faz iletkeninden geçen akımdan daha fazla olduğu aşikardır. Bu tür problemlerle karşılaşıldığında alınan en yaygın önlem, nötr iletkenini faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğündeki kesitlerde yapmaktır.



Şekil 4. 6 Üç ve üçün katı harmoniklerin nötr iletkenine etkisi

4.2 Devre Elemanları

Lineer karakteristikli bütün güç sistemleri direnç, endüktans ve kondansatör devre elemanları ile modellenenbilmektedir. Bu bölümde bu elemanların harmoniklerce etkileri anlatılmıştır.

4.2.1 Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi

Direnç değeri uygulanan gerilim tipine göre değişiklik göstermektedir, alternatif akımda özirkilimden kaynaklanan karşı yük süren kuvvetin yol açtığı etkin direnç artışı yüzünden, akım yoğunluğunun iletkenin içinde azalarak dış yüzeyinde artması durumu olarak tabir edilen deri etkisi harmoniklerle birlikte farklı frekanslı bileşenler de bu duruma ilave olunca direnç değerinde artma meydana gelmektedir. Bu durumla ilgili bir takım ampirik formüller de bulunmaktadır.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad K_1 = 0,5 \cdot \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right)^{0,5} + 1 \right] \quad K_2 = \left[\frac{x}{2,828} + 0,26 \right]$$

$$0 \leq x \leq 3 \text{ için } R = R_0 \cdot K_1 \quad (4.7)$$

$$x > 3 \quad \text{için} \quad R = R_0.K_2 \quad (4.8)$$

Burada R_0 doğru akım direnci, R_H harmoniklerden dolayı direnç artışı, R_1 50Hz deki direnç değeridir.

4.2.2 Harmoniklerin Endüktans Üzerindeki Etkisi

Endüktans elemanlarının empedans değeri sistem geriliminin frekansı ile doğru orantılıdır. Harmonikler de temel bileşen frekansının tam katları olduğu için bu harmonik bileşenlerin frekansları daha yüksek olacak ve endüktans elemanının empedans değeri artacaktır.

Temel bileşen frekans f olan bir sistem için:

$$\text{Endüktansın empedansı } X_L = 2.\pi.f.L \quad (4.9)$$

Temel bileşen frekansının n katı frekansında bir gerilim uygulandığı zaman;

$$\text{Endüktansın empedansı } X_{Ln} = 2.\pi.n.f.L = n.X_L \text{ değerini alır.} \quad (4.10)$$

4.2.3 Harmoniklerin Kondansatör Üzerindeki Etkisi

Kapazitif elemanların empedans değeri sistem geriliminin frekansı ile ters orantılıdır. Frekans değeri de harmoniklerle arttıkça kapasitif elemanların empedans değeri azalır.

Temel bileşen frekans f olan bir sistem için:

$$\text{Kapasitansın empedansı } X_C = \frac{1}{2.\pi.f.C} \quad (4.11)$$

Temel bileşen frekansının n katı frekansında bir gerilim uygulandığı zaman;

$$\text{Kapasitansın empedansı } X_{Cn} = \frac{1}{2.\pi.n.f.C} = \frac{X_C}{n} \text{ değerini alır.} \quad (4.12)$$

4.3 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Transformatörler akım harmonikleri nedeniyle bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarına, gerilim harmonikleri nedeniyle de demir kayıplarına sebep olmaktadır. Harmoniklerin bu denli etkileri transformatörlerde ek ısınmayla beraber gürültü artışı da oluşturmaktadır. Harmonik gerilim ve akımlarının her ikisinin de sebep olduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekansın artmasıyla kayıplar artmaktadır ve bu nedenle yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerden daha etkin olabilmektedir.

Magnetik çekirdekli bir elemanda oluşacak demir kayıpları bu elemana uygulanan gerilim şekline bağlıdır. Uygulanan bu gerilim harmonikli gerilim olduğu için gerilim değerinin artışı ile birlikte demir kayıpları da artacaktır.

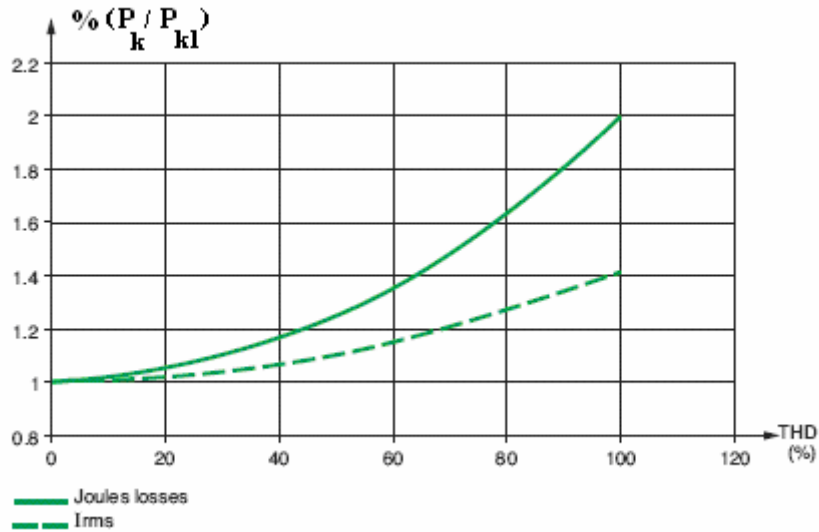
Gerilimin ani ve efektif değerleri:

$$v(t) = \sum_{n=1}^N V_n(t) \quad V = \left(\sum_{n=1}^N V_n^2 \right)^{0.5}$$

olmak üzere bu elemanda oluşacak demir kayıpları:

$$P_{Fe} \cong K_m \cdot V^2 \quad (4.13)$$

ile ifade edilirken K_m değeri makinenin yapısı ile ilgili bir sabittir.



Şekil 4. 7 Transformatördeki kayıpların THD_I ' ya göre değişimi

4.3.1 Transformatör K-Faktörü

Kuru tip transformatörlerin nonsinusoidal akımlar çeken yükü besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen ve standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde meydana gelen düşüşlerin tayinine yarayan bir büyüklüktür. Transformatör k-faktörü diğer bir değişle, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır. (Kocatepe vd. [1])

$$K = \sum_{n=1}^N \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad \text{k faktörü bu şekilde tanımlanır.} \quad (4.14)$$

Transformatörün efektif akımına göre normlaştırıldığında K-Faktörü değeri:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n.I_n)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \text{ şeklinde tanımlanır.} \quad (4.15)$$

Standart transformatörün anma değerindeki düşümün hesaplanmasında IEEE C57.110-1986'da, $D = \frac{1,15}{1 + 0,15.K}$ eşitliği verilmiştir. Burada D transformatör gücündeki azalmayı

belirtmektedir. Transformatörün verebileceği en büyük güç değeri ise:

$$S_H = D.S_N \text{ olarak hesaplanmaktadır.} \quad (4.16)$$

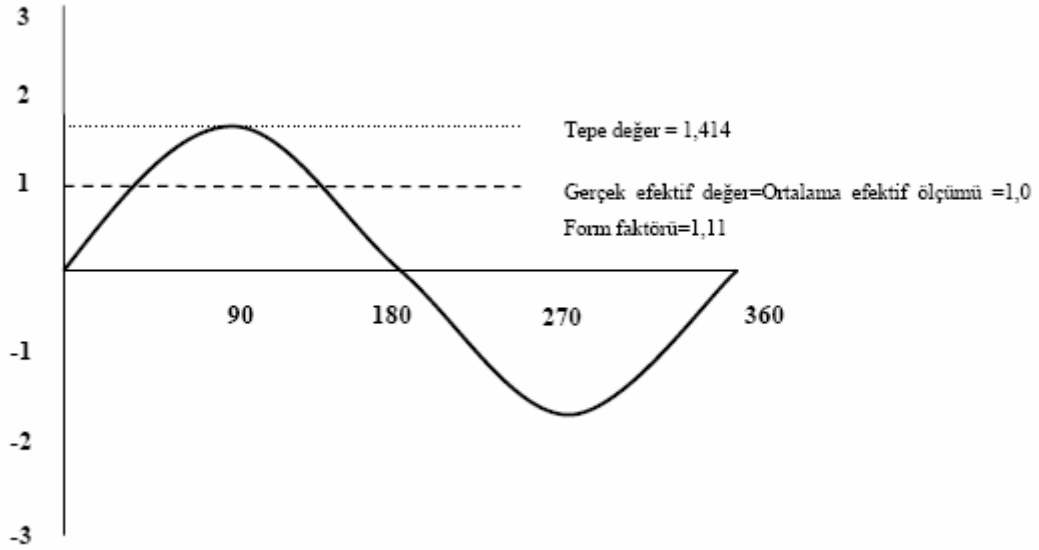
4.4 Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik bileşenlerin sistemi rezonansa sokması durumu ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Endüksiyon diskli sayaçlar, normalde sadece temel akım bileşenini ölçerler. Buna ilave olarak harmonik distorsiyonunun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Endüksiyon diskli sayaçlar en çok kullanılan sayaç türleridir. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %20'lere varan hatalara sebep olmuşlardır. (Kocatepe vd. [1])

İdeal bir sinüs eğrisi için efektif değer, tepe değer 0,707 katıdır. Diğer bir ifade ile efektif değeri 1 Amper olan ideal sinüs eğrisi akımının tepe değeri 1,414 Amper olacaktır. Bir dalga formunun bütününün ortalaması alındığında ortalama değer, tepe değerin 0,636 katı veya efektif değerin 0,9 katı olur. Şekil 4.8'de tepe ve efektif değer sinüsoidal dalga şekli üzerinde gösterilmiştir. Aşağıda ise iki önemli oranın tarifi yapılmıştır.

$$TepeFaktörü = \frac{TepeDeger}{EfektifDeğer} = 1,414$$

$$FormFaktörü = \frac{EfektifDeger}{OrtalamaDeger} = 1,111$$



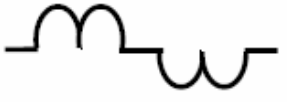
Şekil 4. 8 Tepe ve efektif değerin sinus dalga üzerinde gösterimi

İdeal sinüs eğrisinin ölçülmesinde basit bir ölçüm yapılarak ortalama değer ($0,636 \times \text{tepe}$) bulunur ve form faktörü (1,111) ile çarpılarak (tepe değerin 0,707 ile çarpımı demektir) efektif değer elde edilir. Tüm analog ölçü aletlerinde, eski ve yeni dijital multimetrelerin çoğunda bu yaklaşım esas alınır. Bu teknik, 'Efektif değer kalibreli ortalama ölçüm tekniği' olarak tanımlanmaktadır. (Copper [12])

Gerçek efektif değer ölçen bir ölçü aleti, ölçüm anındaki akım değerinin karesini ve zamana göre ortalamasını alır. Bu ortalamanın karekökünü ekranda gösterir. Güvenilirliği tam olmak kaydıyla, dalga şekli ne olursa olsun güç aletinin gösterdiği sonuç kesinlikle doğrudur. Güvenilirlik hiçbir zaman mükemmel olmayacağından iki faktörün göz önünde tutulması gerekir; bunlardan biri frekans, diğeri de tepe faktörüdür. (Copper [12])

İki tip ölçü aleti bozuk dalga şekillerinin ölçümünde farklı sonuçlar vermelerine karşın, ideal sinüs şekli ölçümlerinde aynı sonucu verirler. Aslında ölçü aletleri bu şekilde kalibre edilmektedir ve her ölçü aletinin kalibrasyon onaylı ve sadece sinüs şekilleri için kullanılmak üzere üretilmesi gerekir. Çizelgede çeşitli dalga şekilleri için farklı multimetre tiplerinden alınan ölçüm sonuçlarının aralarındaki farklar gösterilmiştir. (Copper [12])

Çizelge 4. 1 Ortalama ve efektif değerin sinyallere göre karşılaştırılması

Multimetre tipi	Sinüs eğrisine cevap	Kare dalgaya cevap	Tek faz diyot redresöre cevap	3 fazlı diyot redresöre cevap
				
Ortalama cevaplı	Doğru	%10 yüksek	%40 düşük	%5-30 düşük
Efektif cevaplı	Doğru	Doğru	Doğru	Doğru

Gerçek efektif değer ölçüm aletleri yaklaşık 30 yıldır kullanılmaktadır. Başlangıçta özel ve pahalı olan bu aletler elektronikteki gelişmeler paralelinde, gerçek efektif değerini sağlıklı ölçebilen, taşınabilir multimetreler olarak geliştirilmiştir.

Önemli sayıda doğrusal olmayan yüklerin (PC'ler, elektronik balastlar, kompakt flüoresan lambalar, vs) bulunduğu bir tesisatta gerçek efektif değer ölçümü yapmak şarttır. Ortalama değeri gösteren aletler %40'a varan bir oranda daha düşük değerler verir. Kabloların, devre kesicilerin yanlış seçimine, dolayısıyla da riskli sonuçların ve devre açılmalarının meydana gelmesine neden olur. (Copper [12])

4.5 Motorlar ve Generatörler

Harmonik gerilim ve akımların en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinaların ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinaların verimi ile momentinin düşmesine ve sinusoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması ve ya senkronlama sağlayamaması gibi durumlar da görülebilir.

Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan birisidir. Elektrik makinalarındaki kayıplar, uygulanan gerilim frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebiyle motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir.

Harmonik bileşenler motor performansını %5 ile %10 arasında azaltmaktadır. (Kocatepe vd. [1])

4.6 Enerji İletim Sistemi

Elektrik tesislerindeki harmonikler hem gerilim düşümü hem de $I^2.R$ kayıpları üzerine etkin rol oynamaktadır. Şebekedeki akım dalga şeklinin harmonikler içermesi ve bu yüzden efektif değerinin artması aktif güç kayıplarını da arttırmaktadır, şöyleki;

$$P_h = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 . R_n \text{ şeklinde tanımlanır.} \quad (4.17)$$

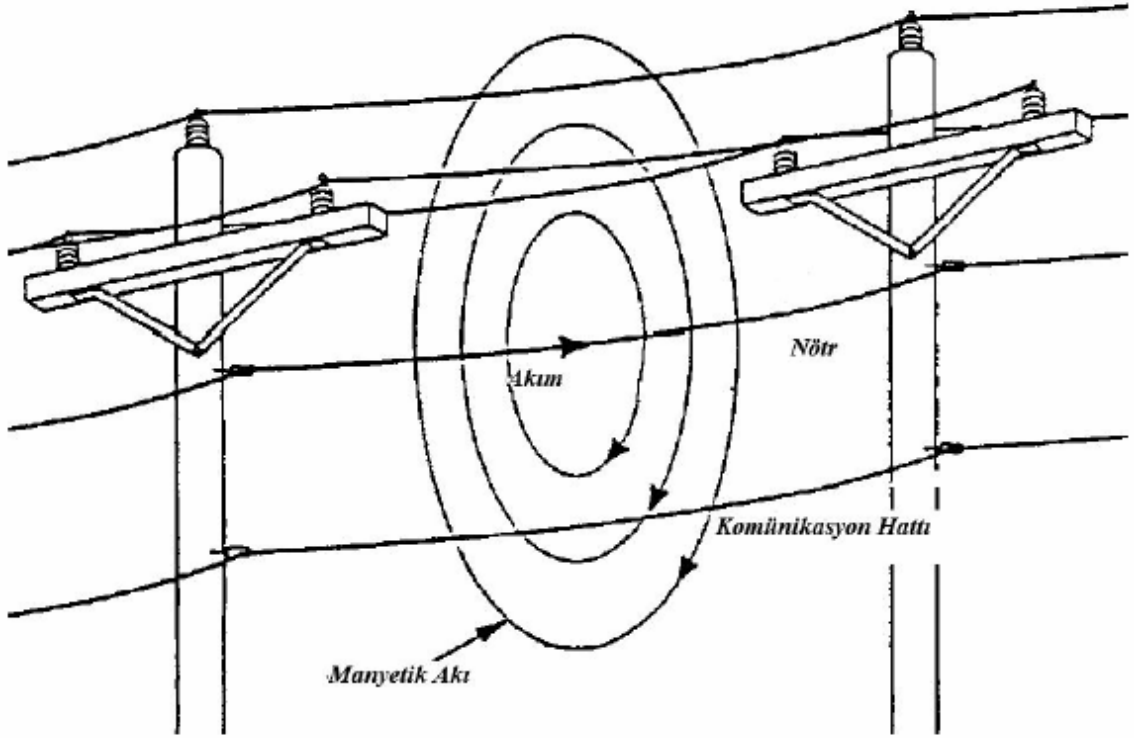
Burada I_n , n. harmonik bileşenin akımı ve R_n ise n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direncidir. Yukarıdaki ifade toplam işaretinin sınır değerlerinden de anlaşılacağı üzere temel bileşenin olmadığı sadece harmoniklerden ötürü oluşacak ek kayıplarını göstermektedir. Bu ifadede harmoniklerle değişen direnç değerleri ve harmonik akımlarının efektif değerlerinin karesi ile ek hat kayıplarının doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Harmoniklerin gerilim düşümüne olan etkisi de;

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (4.18)$$

İletim sistemi empedansı olarak gösterilen $|Z_n|$ ifadesi de iletim hattının endüktansından, kapasitansından ve rezistansından oluşmaktadır. Bütün bu değerler de harmonik frekansından ötürü değişmektedir.

İletim hatlarıyla telekomünikasyon hatlarının Şekil 4.9'daki gibi beraber kullanıldığı yerlerde harmonikler telekomünikasyon sistemlerinde bozucu etkiler yapmaktadır. Dokuzla yirminci harmonik frekansları arasındaki frekanslar telekomünikasyon sistemi için bozucu etkiye sahiptir. Bozulmanın miktarı frekansın artmasıyla artar. Özellikle üç ve üçün katı harmoniklerin (triplen, homopolar) 4 telli sistemlerde nötr hattında birleşmesi telekomünikasyon iletkenleri için oldukça sıkıntılı durumları oluşmasına neden olur. (Dugan [4])



Şekil 4. 9 İletim ve telekomünikasyon hatlarının birlikte kullanılması

4.7 Devre Kesicileri ve Sigortalar

Yük akımı harmonik bileşenler içeriyorsa, sinüs dalgası için sıfır geçiş noktasında di/dt oranı yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu da bir kesicinin devreyi açmasını zorlaştırmaktadır. Aynı durum yarı iletken anahtarlar için de söz konusu olmaktadır. Yüksek di/dt oranının yanında akımı ısı yoluyla ve manyetik olarak hisseden kesiciler harmoniklerin getirdikleri ilave manyetik ve ısı etkisinden de olumsuz etkilenmektedirler. Sıcaklara duyarlı olan sigortalarda benzer şekilde harmoniklerden olumsuz etkilenmektedir (Wagner [14]).

Bunun yanında, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürülmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına neden olmaktadır. Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. (Acarkan [5])

4.8 Aydınlatma Elemanları

Harmonikli bileşenleri bulunan gerilimlerin, floresant lambalar üzerinde kulağın duyabileceği gürültülerle birlikte demir kayıplarının da artışında etkin bir rolü vardır. Floresant aydınlatmada tek dereceli harmoniklerrin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler.

Akkor telli lambaların ömrü, distorsiyona maruz kalmış gerilimle çalıştıklarında kısalmaktadır. Bu durum lambaların içerisindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim artışının küçük değerde olması durumunda dahi akkor flamanlı lambanın ömrü büyük değerde azalmaktadır, örneğin normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimle kullanıldıklarında akkor lambaların ömürlerinin ortalama olarak %50 oranında kısılabilmektedir. (Kocatepe vd. [1])

4.9 Elektronik Elemanlar

Bir güç elektroniği elemanı harmonik distorsiyona maruz kalmış bir sisteme bağlanabilir. Harmonik distorsiyonlu gerilim güç elektroniği elemanların doğru bir şekilde çalışmamasına sebep olabilir. Elektronik elemanların kontrol, kumanda, bilgi saklama, yorumlama gibi özelliklerini yerine getirmesi için sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesi gerekir. Sinyallerin sıfır geçişlerinin belirlenmesini harmonik distorsiyonlar zorlaştırmaktadır ve ya geçişlerin hatalı belirlenmesine sebep olmaktadır. Bu da sistemlerin hatalı çalışmasına, elektronik elemanların çıkartacağı sonuçların ve ya kontrol, kumanda sistemlerinin yanlış çalışmasına sebep olmaktadır. Örneğin tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine neden olabilir ve ya akım ve gerilim işaretleri arasındaki faz farkının hesaplarında sıfır geçiş değerinin hatalı algılanması faz farkının yanlış bulunmasına neden olabilir.

4.10 Röleler

Dalga şeklinin bozulması koruyucu rölelerin performansını etkilemektedir. Her röle harmoniklerin varlığı karşısında farklı davranmaktadır. Aynı tip rölenin farklı modelleri aynı bozulmaya farklı davrandığı gibi aynı tip ve modeldeki röleler bile değişik cevaplar verebilmektedir. Harmonikler, rölelerin, arıza koşullarında çalışmamasına ve sistemin olağan çalışma koşullarında gereksiz yere açmasına neden olabilmektedirler. Bir rölenin performansını onu test etmeden tahmin etmek güçtür.

Harmonikler rölelerin çalışma karakteristiklerini bozma veya tahrip etme özelliğine sahiptir. Dijital röleler ve yazılımları, örneklenmiş data bilgisine ve sıfır geçişlerine çok duyarlıdır. Bu yüzden harmonik etkileri röleleri, hata yapmaya meyilli bir duruma sokarlar. Harmonik gerilim seviyesinin %20'den az olduğu durumlarda (yapılan testlerden) çoğunlukla olumsuz sonuç alınmamıştır. Fakat gelecekte güçlü çeviricilerin varlığı dolayısıyla bu durumun değişmesi kuvvetle muhtemel görülmektedir.

Rölelerin koruma fonksiyonları çoğunlukla ana harmonik akım (veya gerilim) değeri gözetilerek veya hata oluştuğunda diğer harmoniklerin filtre edildiği kabulü ile sonuç olarak ana harmonik dışındaki harmoniklerin ihmal edildiği bir sisteme göre gerçekleştirilir. Bu kabul özellikle aşırı akım korumasında kullanılan elektromagnetik röleler için geçerlidir. Elektromekanik röleler ise yapıları gereği yüksek dereceden harmoniklere karşı daha az duyarlıdır. Eğer hata (kısa devre) bir direnç üzerinden olmayıp metalik kısa devre ise akım ve gerilim ana harmonikleri önem kazanır. Akım transformatörlerinde meydana gelen doyma dolayısıyla akım trafosu sekonder akımında (rölenin beslediği akım) bozulma meydana gelir.

Yukarıda bahsedilen dizayn problemlerinden sistem gereksinimlerini karşılayan doğru cihaz seçimi yapılarak kaçınmak mümkündür. Özellikle dijital koruma sistemlerine sahip mesafe koruma esaslı sistemlerde, akım ve gerilim dalga şekillerinin filtre edilmesi oldukça önemlidir.

Normal sistem koşullarında koruyucu cihazların duyarsızlığı, bizlere, hata koşulları dışında güç sistemindeki harmoniklerin herhangi bir probleme sebep olmadığını ifade eder gibidir. Güç transformatörlerinde, pratikte, transformatörün devreye girmesi sırasında, mıknatıslanma devresinden kaynaklanan mıknatıslanma akımının ilk anlardaki değeri, yüksek harmonik bileşenlere sahiptir. Bu bileşen değerleri ortaya çıktığında, transformatörü koruyan sistemler devreye girerek (hatalı bir durum olmadığını belirleyerek) devre kesicisini açmasını engeller.

Güç sistemlerinin korunmasında, koruma sisteminin temel elemanı ya da beyni olarak kabul edilen koruma röleleri üzerinde nonsinusoidal büyüklüklerin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bazı çalışmalar vardır. Fakat bu yönde bütün koruma aletleri için kesin bir biçimde sonuçlar verebilecek yeterince çalışma yoktur. Bütün bunların yanında literatürde bulunan bilimsel çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok kısa olarak şöyle özetlenebilir. Akım ve gerilimlerin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga şekillerinin

bozulması rölelerin performansını etkilemektedir. Herbir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimi göstermektedir. Aynı tip rölelerin farklı modelleri bile aynı bozulmaya farklı tepki verdiği gibi bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir.

Harmoniklerin ters zamanlı aşırı akım röleleri üzerine etkileri ile ilgili yapılan bir deneysel çalışmada induksiyon diskli ve statik aşırı akım röleleri incelenmiş, harmonik kaynağı olan nonlinear yük olarak triyak kontrollü omik yüklü bir devre kullanılmış, röleye uygulanan akım değeri ve akımın toplam harmonik bozulma değeri değiştirilerek rölenin çalışma akımı ve cevap süreleri ölçülmüştür. Ölçümler neticesinde akımın dalga şekli bozuldukça indüksiyon diskli aşırı akım rölesinin cevap süresinin arttığı görülmektedir. Röle zamanında kesiciye açma kumandası vermediği için korunan tesis elemanları risk altında kalmaktadır. Ayrıca sinusoidal akım için 1 A.'e ayarlanan ve sinusoidal akımda mükemmel çalışan rölelerin THD oranının yüksek olması durumunda 1.9 A. değerinde çalışmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu durum koruma rölelerinin aşırı harmonik bozulmanın olduğu sistemleri korumada yetersiz kalabileceklerini göstermiştir. (Kocatepe vd. [1])

Elektromanyetik rölenin aksine aynı akım-zaman karakteristiğine sahip statik aşırı akım rölesinde ise THDi değeri arttıkça rölenin cevap süresi kısalmakta, çalışma akım süresi düşmektedir. Sinusoidal akım için mükemmel çalışan bu röle ise harmonik bozulmanın yüksek olması durumunda daha düşük akım değerinde çalışmaya başladığı için sinusoidal akımdaki cevap süresinden daha kısa sürede kesiciye açma kumandası vereceği için yanlış kesici açmalarına neden olacak, selektivitenin sağlanmasında problemler oluşacaktır.

Harmonikler sebebiyle oluşan etki, rölenin tipi, çalışma prensibi, yapısı, nonlinear yükün harmonik spektrumu gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle koruma rölelerinin harmoniklere etkileri üzerine, birkaç deneyin sonucuna bakılarak bir genelleme yapılması mümkün değildir. Her koruma rölesini ayrı ayrı incelemek gerekmektedir.

4.11 Güç Faktörü

Bilindiği gibi güç faktörü şebekeden çekilen aktif gücün görünür güce oranı olarak ifade edilir. Enerji kalitesi parametrelerinden biri olarak tabir edilen güç faktörünün “1” değerine yakın olması istenir. Güç faktörünün istenilen seviyelere ulaşması yükün şebekeden gereksiz olan

reaktif akımın çekilmemesi demektir. Gereksiz bu akımın çekilmemesi hat kayıplarını azaltmakta, hattın aşırı yüklenmesini önlemekte abone açısından da elektrik enerjisine fazla para vermemesini sağlamaktadır.

Harmonik distorsiyonun olmadığı sinusoidal gerilim işaretli bir şebekede lineer devre elemanlı yüklerin bulunduğu devrede güç faktörünü $PF = P/S = \cos(\theta)$ olarak tarif edilir; zira şebekeden distorsiyon gücü altında başka boyutta bir güç çekilmemektedir. Şebeke distorsiyonlu, şebekeye bağlı yük de nonlineer olduğu vakit şebekeden aktif ve reaktif gücün yanı sıra distorsiyon gücü de çekilecek ve böylece güç faktörü ifadesi tamamiyle değişecektir.

Sinusoidal bir şebekeye nonlineer bir eleman bağlanması durumunda çekilecek harmonik akımlar sebebiyle güç faktörü,

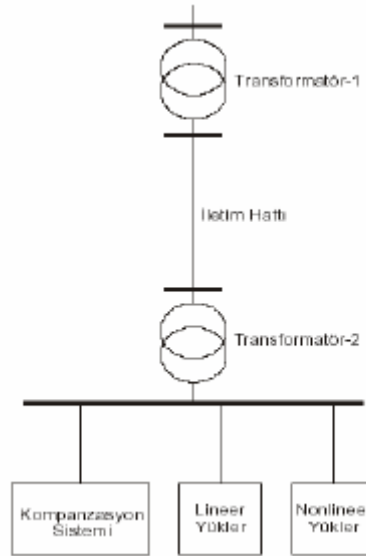
$$PF = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos(\theta)}{V \cdot \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{0.5}} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \theta \quad (4.19)$$

olarak elde edilir. Burada birinci terim daima 1'den küçük olması sebebiyle güç faktörü sinusoidal durumdaki $\cos(\theta)$ değerinden daha küçük bir değer alacaktır. Görüldüğü gibi harmoniklerin güç faktörünü düşürücü özelliği bulunmaktadır.

Harmonikli devrelerde reaktif güç faktörünü ancak belli değerlere kadar çıkartılabilecektir. İstenilen "1" mertebelerine çıkarmak harmonik distorsiyonlar sebebiyle sadece reaktif güç kompanzatörleri ile olmamaktadır. Bunun için elektrik sistemini gerekli filtreleme işlemleri ile harmoniklerden arındırma ve daha sonra kompanzasyon işlemlerine başvurmak gerekir.

ELEKTRİK TESİSLERİNDE REZONANS VE ALINACAK TEDBİRLER

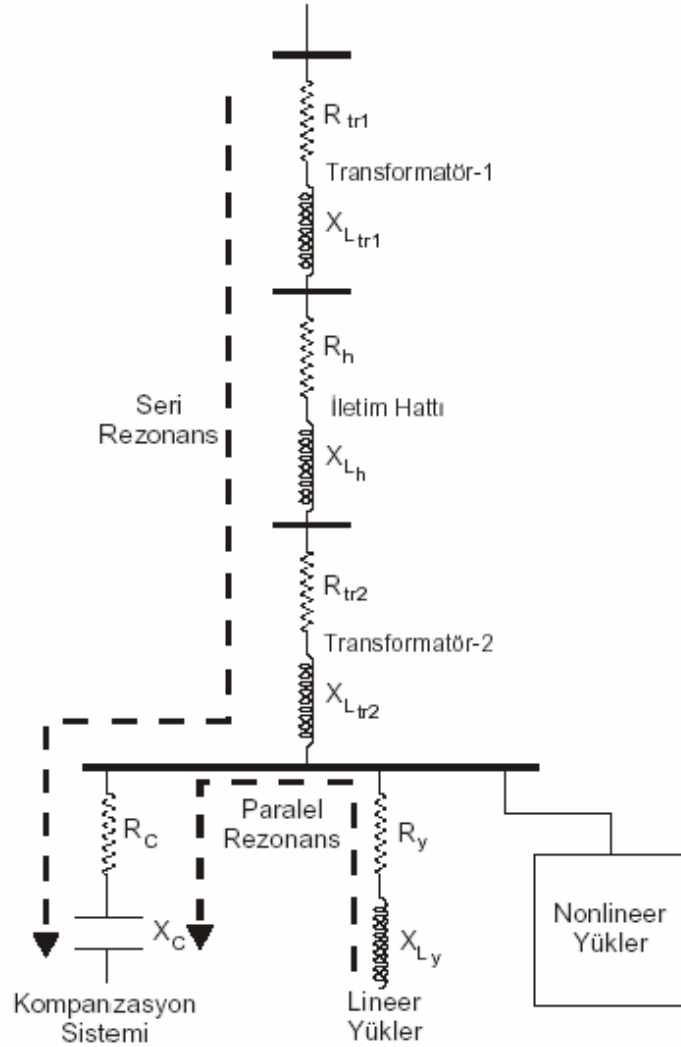
Bir elektrik devresinde endüktif reaktans ile kapasitif reaktans değerlerinin skaler eşitliği sonucu toplam reaktans değerinin sıfır olması ve sonuç olarak yük empedansının omik davranması durumuna rezonans denir. Enerji sisteminde rezonansın meydana gelmesi aşırı akım ve aşırı gerilim gibi birtakım problemlere sebep olmaktadır.



Şekil 5. 1 Enerji sisteminin kapalı şeması (Sucu [8])

Elektrik enerji sistemlerinde seri ve paralel olmak üzere iki tip rezonans durumu söz konusudur. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de bu iki rezonans tipi gösterilmektedir. Bir güç sistemi için rezonans olayları özellikle Şekil 5.2’de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Kaynaktan gelip kondansatör üzerinden tamamlanan seri rezonans durumunda bileşenler, iki transformatör sisteminin rezistans ve reaktansları, iletim hattı rezistans ve reaktansları ile kompanzasyon

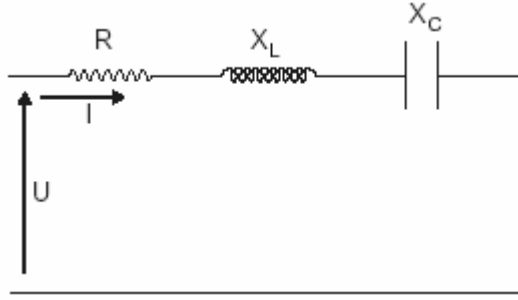
sisteminin reaktansı olmaktadır. Nonlinear yükün sebep olduğu harmonik kaynağından gelen çizgilerin lineer yük ve buna paralel kompanzasyon sisteminden geçerek tamamlanan paralel rezonans durumunda bileşenler, harmonik kaynağı, lineer yükün rezistans ve reaktansları ile birlikte buna paralel kompanzasyon sisteminin reaktansıdır.



Şekil 5. 2 Enerji sisteminin açık şeması

5.1 Seri Rezonans

Devrede endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olması ile oluşur. Devre empedansı sadece omik yüklü hale gelir, bu yüzden devre empedansı düşüktür. Bu yüzden düşük genlikli gerilimler uygulansa dahi devreden yüksek değerde rezonans akımı akar.



Şekil 5. 3 Seri RLC devresi

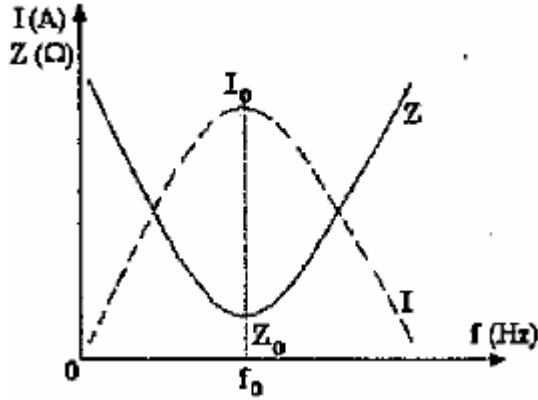
Seri RLC devresini temel frekans için incelersek:

$$Z = R + j.X_L - j.X_C = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \quad (5.1)$$

Rezonans anında reaktans değerinin sıfır olması için $\omega.L = \frac{1}{\omega.C}$ olması gerekir. Buradan rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} = \frac{f}{\omega.\sqrt{L.C}} = f.\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5.2)$$

$n = f_r / f$ olduğu için $n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$ olarak rezonansın oluşacağı harmonik mertebesi ifade edilir.



Şekil 5. 4 Seri rezonansda akım ve empedans değişimi

Seri RLC devresini harmonikli durumlarda incelersek:

Şekil 5.3'teki gibi olan devrede sadece devre elemanları direnç olarak R_n , endüktif reaktans olarak X_{Ln} , kapasitif reaktans olarak X_{Cn} olarak n. harmonik mertebesi için değiştirilmiştir.

$$Z_n = R_n + j.(X_{Ln} - X_{Cn}) = R + j.\left(n.X_L - \frac{X_C}{n}\right) \quad (5.3)$$

Burada rezonans durumundaki reaktans için ($n = n_r$)

$$X_r = n_r \cdot X_L = \frac{X_C}{n_r} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.4)$$

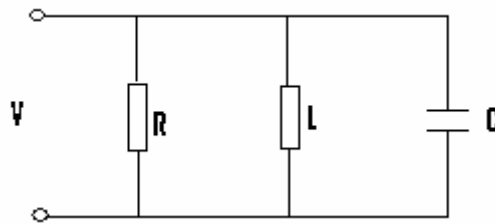
X_r reaktansı, rezonanstaki endüktans ve kondansatöre ait reaktans olur. Seri rezonans esnasında devrenin empedansı, $Z_r = R$ şeklinde olur. Bu iki terim filtreler için kullanılan kalite faktörünün hesabında kullanılır:

$$Q = \frac{X_r}{R} \quad (5.5)$$

Seri rezonans, harmonik akımının düşük empedans yolunu takip etmesi sonucu, bu devrede endüktans ve kondansatör arasında yüksek gerilim distorsiyonlarına neden olabilir. Güç sistemlerinde seri rezonans nadir olarak oluşur; ancak meydana geldiğinde devreden geçen büyük akımlar, anahtarların ve kontaktörlerin kontaklarında aşırı ısınmaya yol açar. Ayrıca devre bağlantı iletkenlerinde özellikle kondansatör bağlamalarında aşırı ısınma ve kısa devrelere neden olur. Harmonik akımlarının tesiri ile kondansatör aşırı ısınır zarar görme ihtimali artar. (Kocatepe vd. [1])

5.2 Paralel Rezonans

Paralel RLC devresinde görülen rezonans olayıdır. Rezonans endüktif ve kapasitif reaktansların birbirine eşit olmasıyla gerçekleşir. Burada empedans maksimum değerini alır. Düşük harmonik akımı devrede aksa bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli tehlikeli rezonans gerilimleri meydana gelir.



Şekil 5. 5 Paralel RLC devresi

Şekil 5.5 için devre empedansı,

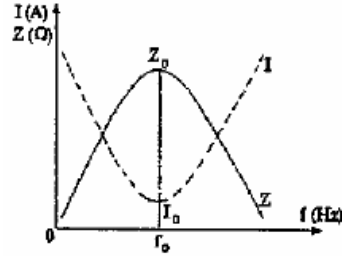
$$Z = \frac{-j.R.X_L.X_C}{R.(X_L - X_C) - j.X_L.X_C} \quad (5.6)$$

Rezonans anında toplam reaktans değeri sıfır olacaktır, bu andaki frekans değeri,

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.7)$$

olacaktır. Paralel rezonansta devreden geçen akım değeri,

$$I_r = \frac{V}{R} \quad (5.8)$$



Şekil 5. 6 Paralel rezonansta akım ve empedans değişimi

Paralel RLC devresini harmonikli durumlarda incelersek:

Harmonikli durum söz konusu olduğu için devre elemanları R_n, X_{Ln}, X_{Cn} şeklini alır.

Herhangi bir harmonik bileşendeki devrenin empedansı ve empedansın modülü,

$$Z_n = \frac{-j.R.X_L.X_C}{R\left(n.X_L - \frac{X_C}{n}\right) - j.X_L.X_C} \quad (5.9)$$

Rezonans durumundaki reaktans,

$$X_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.10)$$

Paralel devrede kalite faktörü,

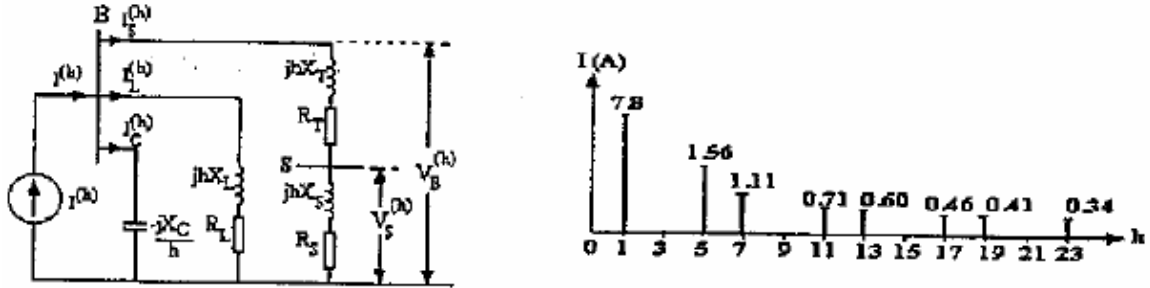
$$Q = \frac{R}{X_r} \quad (5.11)$$

Paralel rezonans olayı, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinde, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında oluşabilir. Bu olay en yaygın problemlerden biridir.

Rezonans frekansında empedans, çok büyük değerler alır. Bu büyük empedanslar nedeniyle harmonik akımları gerilim harmoniklerine neden olurlar. Gerilim harmonikleri hem kondansatör ünitesinde hem de sistem reaktansında yüksek harmonik akımlarına neden olur.

Böylece paralel rezonans lineer olmayan yükün oluşturduğu harmonik akımlarını büyüttmüş olur. (Kocatepe vd. [1])

5.3 Rezonans İçin Harmonik Ölçümü



Şekil 5. 7 Harmonik akım kaynağı devresi ve harmonik spektrumu

Harmonik kaynaklı bir devrenin (Şekil 5.7) analizi sonucu baralardaki harmonik gerilimi yük ve kompanzasyon sistemi üzerinden geçen harmonik akımları çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 1 Devredeki elemanların akım ve bara gerilimleri

h	1	5	7	11	13	17	19	23
Frekans (Hz)	50	250	350	550	650	850	950	1150
I_R (A)	7.80	1.56	1.11	0.71	0.60	0.46	0.41	0.34
I_C (A)	3.49	0.27	0.46	1.77	22.3	1.11	0.77	0.50
I_L (A)	31.26	0.20	0.17	0.28	2.52	0.07	0.04	0.02
I_S (A)	37.16	1.64	1.40	2.20	19.83	0.58	0.32	0.14
V_B (V)	6351	99	119	293	3120	118	74	39
V_S (V)	78139	299	356	880	9360	355	222	118

Çizelge 5.1’deki bilgileri değerlendirecek olursak; kondansatörün 13. harmonik akımı nominal akımının 6-7 katına çıkmıştır. 13. harmonik gerilimi de çok yüksektir. Bu da gösteriyor ki 13. harmonik frekansı dolaylarında paralel rezonans meydana gelmiştir. Paralel rezonans empedans yükselir.

5.4 Harmonik Bileşenlerin Oluşturduğu Rezonansın Önlenmesi

Seri ve paralel rezonansları önlemedeki yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz,

- genel olarak tasarım halinde iken harmoniklerin oluşmasına transformatörleri üçgen bağlı kullanmak, konverterleri çok darbeli seçmek gibi çözümlerle engel olmak.

- rezonans oluşabilecek harmonik frekanslarından genlik değerleri yüksek olanlar için filtre devreleri oluşturarak harmonik etkisini yok etmek ve ya azaltmak.
- aşırı kompanzasyondan kaçınılarak rezonansın oluşumunu engellemeye çalışmak.
- kondansatörlere seri bir bobin bağlanarak kondansatör üzerinden geçen akımları sınırlamak.

şeklinde bir takım önlemlerle harmonik rezonansların zararlı etkilerini azaltabiliriz.

Sonuç olarak harmonik içeren devrelerde rezonansın meydana gelmemesi bakımından,

- Harmonik bileşenlere göre mutlaka rezonans analizi gerektiği
- Nonlineer elemanların olduğu devrede harmonik analizinin sistemin sürekliliği açısından yapılması gerektiği
- Kompanzasyon ilavesi yapılan sistemlerde rezonans olabileceği
- Tesise yeni elemanlar ilave edildiğinde de rezonansın söz konusu olabileceği
- Özellikle büyük güçlü nonlineer elemanların (ark ocakları, konverterler, TCRler) bağlı olduğu sistemlerin rezonans analizinin yapılması gerektiği dikkate alınmalıdır. (Kocatepe vd. [1])

HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE STANDARTLAR

Enerji sistemlerindeki harmonik bozulmalara neden olan nonlineer karakterli elemanların kullanımının sürekli olarak artması harmonik kirliliği de beraberinde getirmektedir. Harmonik kirliliğin gün geçtikçe bu şekilde artması enerji kalitesizliğine sebep olmakla beraber bu durum, kirliliğin önüne geçmek için bir takım kısıtlamaların yürürlüğe girmesini şart koştur. Belirli kısıtlamaları devreye sokarak harmonik kirlilik sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir.

Harmonik sınırlandırmaları gerçekleştirmek için ifade edilen THD, TTD, HD gibi kavramlar sınırlandırmanın ne kadar olacağı hususunda nicel bir kıyaslama maksatlı tarif edilmiştir. Bu denli kısıtlamalar yapılarak enerji kalitesi yükseltilmiş olacak, böylece harmonik distorsiyon sebebi ile meydana gelen ek kayıplar, ısınmalar, cihazların hatalı çalışması gibi durumların önüne geçilmiş olunacaktır.

6.1 Harmonikle Bozulmanın Ölçütü

Harmonik bozulma ölçütleri olarak en çok; toplam harmonik distorsiyonu, tekil harmonik distorsiyonu ve toplam talep distorsiyonu gibi kavramlar kullanılmaktadır. Tezin 2. bölümünde bu kavramların ne anlama geldikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Akım ve gerilim olarak ayrı ayrı ifade edilen toplam harmonik distorsiyonu Eşitlik (2.23) ve (2.24)'te, tekil harmonik distorsiyonu Eşitlik (2.26) ve (2.27)'de ve toplam talep distorsiyonu eşitlik (2.28)'de ifade edilmiştir.

Elektrik tesislerinde akımın ve gerilimin efektif değer ifadelerini toplam harmonik distorsiyonu kavramı ile ifadesi,

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (6.1)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (6.2)$$

şeklinde ifade edilir.

6.2 Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak için iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan ilki Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından tercih edilen herhangi bir nonlinear yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise (IEEE) tarafından, birden fazla nonlinear yükün beslendiği bir ve ya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir. (Kocatepe vd. [1])

6.2.1 Yaklaşık İnceleme

Uygulamada tam bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç göstermeyen küçük güçlü tüketicilerin söz konusu olduğu pek çok durumla karşılaşılmaktadır. Böyle bir durumda, tam ve detaylı bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesi zorunlu değildir. Küçük tüketiciler için genel olarak yaklaşık inceleme adı verilen kriter yeterli olmakta ve daha geniş kapsamlı bir analizin yapılması ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Böyle durumlarda, harmonik limitlerine uygunluk, ortak kuplaj noktasında (özel bir tüketiciyi besleyen ve bir başka tüketicinin bağlanması söz konusu olan besleme sistemindeki bir nokta) detaylı analizlerin yapılmasına gerek olmaksızın kontrol edilebilir. Bunun için gerek ve yeter koşul, kısa devre gücünün ortak kuplaj noktasından beslenen nonlinear yüklerin, görünür güçlerin toplamından çok daha büyük olmasıdır. Aşağıda harmonik limitlerine uygunluğun yaklaşık olarak kabul edilmesi için takip edilmesi gereken dört temel adım özetlenmiştir.

1.adım: ortak kuplaj noktasındaki kısa devre gücünün (S_K'') belirlenmesi

2.adım: beslenen nonlinear yükün türünün ve boyutunun belirlenmesi

$$3.adım: S_{DW} = \sum_i S_{Di} \cdot W_i \quad (6.3)$$

değerinin hesaplanması, Burada S_{Di} i. nonlinear yükün görünür gücü ve W_i ise ağırlık faktörüdür.

$$4.\text{adım: } N = \frac{S_{DW}}{S_K''} \cdot 100 \quad (6.4)$$

$N < 0.1$ koşulu sağlanıyorsa harmonik limitlere uygunluk yaklaşık olarak kabul edilebilir. Çeşitli nonlinear yükler için ağırlık faktörlerine (Kocatepe vd. [1]) tablo 12.1'den ulaşılabilir.

6.3 Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama gerektirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlinear yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadır. Aşağıdaki tabloda çeşitli ülkelerin harmonik standartları verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THDv (%)
A.B.D	genel 2.4-69	5
	genel 115<	1,5
	özel 2.4-69	8
	özel 115<	1,5
ALMANYA	tüm gerilimler(15. harmoniğe kadar)	10
AVUSTRALYA	dağıtım 33>	5
	iletim 22,33,66	3
	iletim 110<	1,5
FİNLANDİYA	1	5
	3kV-20kV	4

Çizelge 6. 1 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları (devam)

	30kV-45kV	3
	110	1,5
FRANSA	tüm gerilimler	1,6
İNGİLTERE	0,415	5
	6,6kV-11kV	4
	33kV-66kV	3
	132	1,5

IEC 61000-2-2'ye göre konutlarda ve alçak gerilim şebekelerinde gerilim harmonik distorsiyon limitleri aşağıda Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Konutlarda ve alçak gerilim şebekelerinde harmonik limitleri

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5	*Not: k=0,2+12,5/n	
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k*				

Avrupa standartları EN 50160' a göre konutlarda alçak ve orta gerilim şebekelerinde gerilim harmonik distorsiyon limitleri Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 3 Konutlarda alçak ve orta gerilimde harmonik distorsiyon, EN 50160 gerilim harmonik sınırları

Alçak Gerilim ve Orta Gerilim Şebekesi (<35 kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6.....24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Çizelge 6. 4 IEEE 519–1992

Harmonik Ölçümü Alınan Noktadaki Gerilim (V)	Herbir Harmonik İçin Gerilim Bozulması (%)	Gerilim İçin Toplam Harmonik Bozulması THB(%)
V<69kV	3.0	5.0
69kV<V<161kV	1.5	2.5
V>161kV	1.0	1.5

Yukarıdaki tabloda IEEE 519–1992 gerilim distorsiyon oranları verilmiştir. Akım sınırlarına yakın büyük sistem kullanıcıları için izin verilebilir. Yüksek gerilim seviyelerinde potansiyel problemleri minimize etme çabaları hızla artmıştır.

Çizelge 6. 5 Akım harmonik sınırları

$V_n < 69 \text{ kV}$						
I_x/I_1	$h < 11$	$11 \leq h$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THB
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	3.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$< 20^*$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1-2.5	0.7	10.0
$V_n > 161 \text{ kV}$						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Akım harmonik bozunma sınır değerleri, şebekeye ortak bağlantı noktasına bağlı doğrusal olmayan yükler için ve 2.3-69kV gerilim aralığında belirlenmiştir. I_{SC} ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımıdır. I_L temel frekanstaki maksimum yük akımıdır. THD toplam harmonik distorsiyondur. Çift harmonikler için sınır değerler yukarıda verilen değerlerin %25'i kadardır. Tablodaki tüketiciler için önerilen harmonik akım sınırları gösterilmiştir. Tabloda çeşitli satır ve sütunlar harmonik sayısı, kısa devre yük oranı ve gerilim seviyelerine bağlı olarak elde edilmiştir..Toplam istenen bozunum tüm harmoniklerin efektif değerinde tanımlanmıştır.

IEC'de aynı mantıkla benzer sınır tabloları yapılmıştır. Sınır harmonik akım değerleri verilmiş bu yüzden gerilim bozunum problemleri oluşturulmamıştır. IEEE harmonik sınırlar 3 faz ortak bağlantı noktasındaki uygulamalar için dizayn edildiğinde, IEC tek faz için ve 3 faz için daha büyük ölçüde ve uygun limit değerler sağlar.

Uluslararası IEEE 519-1992'ye göre kabul edilen harmonik bozulma sınır değerleri gerilim için %3 akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu limit değerlerin üzerinde bulunan harmonik oranlarda, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelmektedir.

Ülkemizde Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), çeşitli yönetmeliklerde harmonik akım ve gerilimlere sınırlamalar getirmiştir. Çizelge 6.6 ve 6.7 "Elektrik Piyasasında Dağıtım

Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi” yönetmeliğinden, çizelge 6.8 ve 6.9 “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”nden, çizelge 6.10’da ise, “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nden alınmıştır.

Çizelge 6. 6 EPDK yönetmeliğine göre gerilim harmonikleri için sınır değerler

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3'un Katları Olmayanlar		3'un Katları Olanlar			
Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)
5	% 6	3	% 5	2	% 2
7	% 5	9	% 1,5	4	% 1
11	% 3,5	15	% 0,5	6.....24	% 0,5
13	% 3	21	% 0,5		
17	% 2				
19	% 1,5				
23	% 1,5				
25	% 1,5				

Çizelge 6. 7 EPDK yönetmeliğine göre akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler

Tek Harmonikler						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
$<20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değer %25'i ile sınırlandırılmıştır.						

Çizelge 6.8 EPDK yönetmeliğine göre 380 kV 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	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Çizelge 6. 9 EPDK yönetmeliğine göre 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. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ

Enerjide kalitesizliğe neden olan harmoniklerin son kullanıcıya gelinceye kadar giderilmesi ve ya kullanıcıya ait yüklerin meydana getirdiği harmonik sinyalleri şebekeye sızmasının giderilmesi durumu bu bölümde incelenmiştir.

Elektrik enerjisinin üretimi sırasında oluşan harmoniklerin üretim safhasında tedbirlerin alınması, üretilen enerjinin transformatörler ile geriliminin arttırılması ve ya azaltılması sırasında kullanılacak transformatörün uygun bir şekilde bağlanması, kullanıcı yüklerinin tüketim noktasına en yakın yerinden filtrelenebilmesi harmonik akım ve gerilimlerin eliminasyonu için yapılması gereken uygulamalardır.

Harmonik sinyallerin yok edilmesi şebekeye ilave devreler eklenerek yapılmaktadır. Eklenen bu ilave devreler harmonik filtre olarak tanımlanırken içerdikleri devre elemanlarının çeşitliliğinde dolayı da sınıflandırılırlar;

- filtre, direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif devre elemanlarından oluşuyorsa bu filtreler pasif filtreler,
- filtre, pasif devre elemanları ile birlikte yarı iletken devre elemanlarından oluşan kontrollü akım ve gerilim kaynaklarından oluşuyorsa bu filtreler aktif filtreler adı verilir. Filtreler, aktif ve pasif filtrelerin devreye bağlanma şekillerine göre de seri ve paralel filtreler olarak da sınıflandırılır.

7.1 Pasif Filtreler

Direnç, endüktans ve kondansatör devre elemanlarının yükün talebine göre belli değerlerde tercih edilip kullanılmasıyla oluşturulan filtrelerdir. Burada yükün talebinden kasıt yok

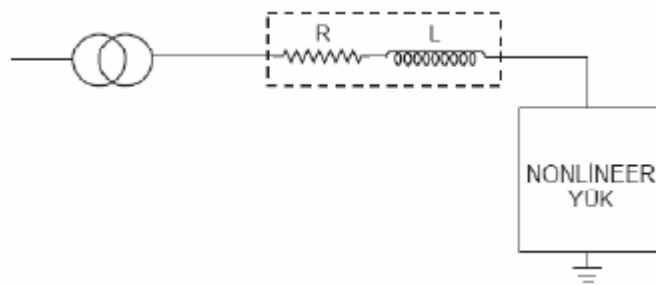
edilmek istenen harmonik frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerinin belirlenmesidir. Yok edilmek istenen her bir harmonik sinyali için ayrı ayrı L ve C değerlerini ayarlamak gerekir. Pasif filtrenin elemanlarının değer tayininde ilk olarak C elemanından başlanır, ilk olarak yükün reaktif güç talebini karşılayacak C değeri belirlenir ardından belirlenen C değerine göre ilgili rezonans frekansına uygun bir L değeri tayin edilir. Filtrelerde kalite faktörü ayar keskinliğini belirlemektedir. Q değeri ile direnç değeri belirlenir. Kalite faktörünün 30 ila 60 arası olanlar yüksek Q tipi, 0.5 ila 5 arası olanlar düşük Q tipi filtreler olarak tanımlanır.

7.1.1 Seri Filtreler

İstenmeyen harmonik akımlarının şebekeye geçmesini önlemek amacıyla yüke seri bağlanan filtrelerdir. Seri filtrelerde amaç sadece özel bir frekanstaki işaretin sisteme girmesini önlemek amacı ile kullanılırlar. Seri filtreler ilgili harmonik frekansında yüksek empedans göstererek ilgili harmonik akımının akmamasını sağlar. Belirli bir değere ayarlandığı için sadece o değerdeki harmonik frekanslı akıma yüksek empedans gösterir.

Seri filtreler şebeke ile harmonik kaynağı arasına seri olarak bağlanır. Bu bağlantıdan dolayı tüm yük akımının üzerinden geçmesi en büyük dezavantajıdır. Buna karşın seri filtrenin rezonans problemi yoktur.

Bilgisayarların yoğun olduğu yüklerde 3. harmonikler çok kuvvetli derecededir. Bu harmonikleri elimine etmede seri filtrelerin kullanımı yaygındır.



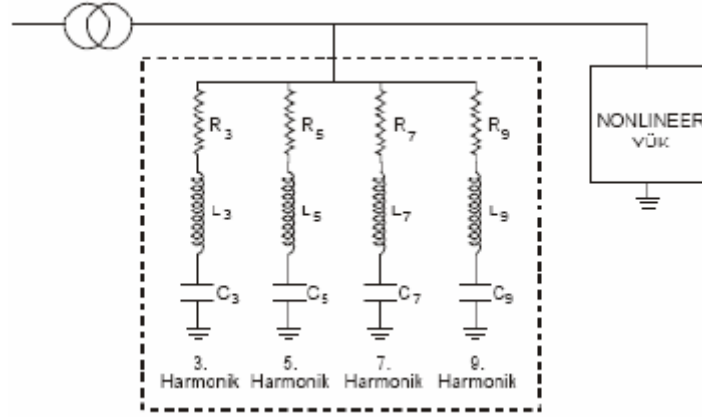
Şekil 7. 1 Seri pasif filtre

7.1.2 Paralel Filtreler

Paralel pasif filtreler nonlineer yüke en yakın yerinden paralel bağlanarak devreye yerleştirilir. Seri filtreler ayarlanan harmonik akımına yüksek empedans gösterirken paralel filtrelerde ise durum tam tersidir. paralel filtre harmonik kaynağa paralel bağlanır ve

harmonik frekans değerinde en küçük empedans değerini alacak şekilde ayarlanır. İlgili harmonik akımı yüke ve şebekeye göre daha düşük empedans değerdeki paralel filtreden geçerek toprak seviyesine akıtılır. Böylece harmonik bileşenin sistem içinde dolaşımı engellenmiş olur.

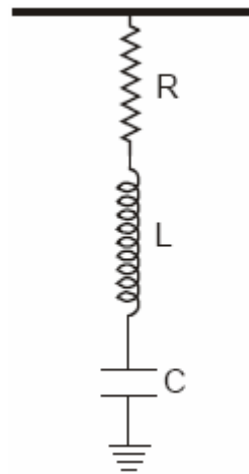
Şönt filtreler, hem yükü kompanze etme özelliği hem de seri filtreye göre ucuz maliyetli olması sebebiyle kullanımı daha yaygındır, dezavantaj olarak güç sistemi ile rezonansa girme problemi vardır.



Şekil 7. 2 Paralel pasif filtre (Sucu [8])

7.1.2.1 Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtreler tek bir frekans değeri için ayarlanan filtreler olup, ayarlandığı frekans değerinde çok düşük empedans ve ya kısa devre halini alan filtrelerdir. Seri R, L, C elemanlarından oluşur.



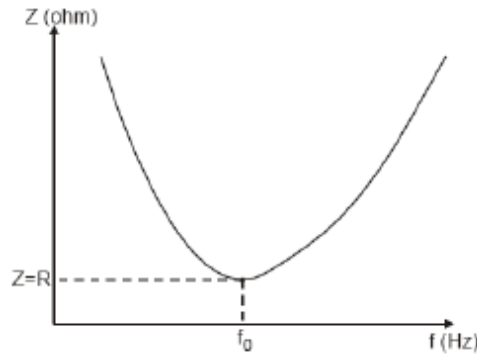
Şekil 7. 3 Tek ayarlı filtre

Bir tesisin birden fazla harmonik akımını elimine etmek istediğimizde sadece tek ayarlı filtre kullanılıcaksa elimine edilecek harmonik sayısı kadar tek ayarlı filtre yüke paralel olacak şekilde eklemek gerekir. Filtre tasarımında filtre elemanlarının değerleri tayininde elimine edilecek harmonik sayısı ve yükün talep ettiği reaktif güç bilgileri önemli rol oynar.

Tek ayarlı filtrenin filtre empedansı,

$$Z_F = R + j.(X_L - X_C) = R + j.(2.\pi.f_n.L - \frac{1}{2.\pi.f_n.C}) \quad (7.1)$$

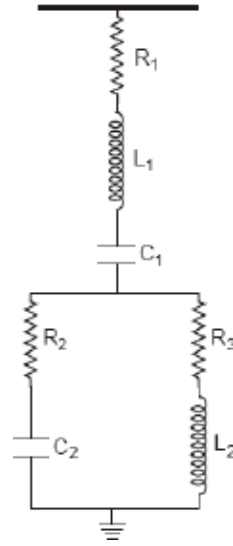
şeklinde hesaplanmaktadır, ayarlanan frekans değerinde $X_L = X_C$ koşulunu sağlayacağı için filtre empedansı minimum değeri alır, bu durum aşağıda Şekil 7.4’de empedans, frekans grafiği ile izah edilmiştir.



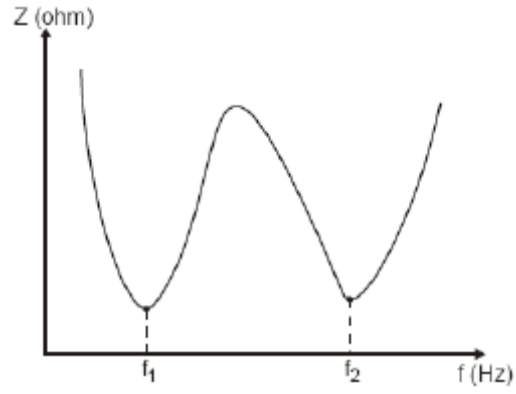
Şekil 7. 4 Tek ayarlı filtrenin empedans değişimi

7.1.2.2 Çift Ayarlı Filtre

Çift ayarlı filtre yok edilmek istenen iki harmonik bileşen için iki ayrı frekans ayarı yapılarak oluşturulan filtrelerdir. Ayarlanan iki ayrı frekansta filtre düşük empedans göstererek harmonik bileşenlerin şebekeye geçmesini engeller. Tek ayarlı filtreye göre avantajı nominal frekanstaki güç kaybı bu tür filtrelerde daha az olmasıdır.



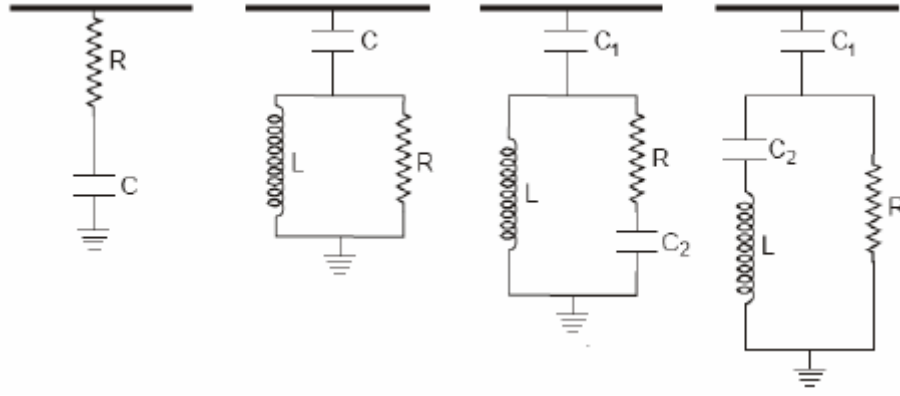
Şekil 7. 5 Çift ayarlı filtre



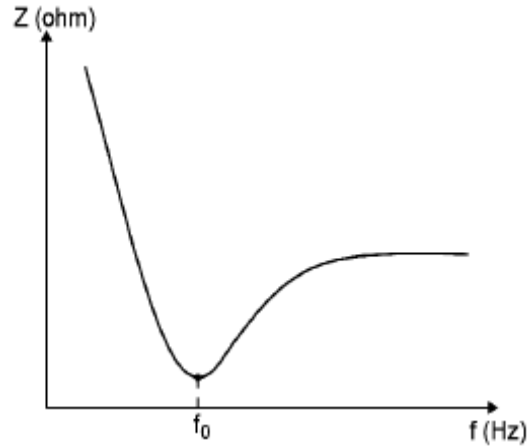
Şekil 7. 6 Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi

7.1.2.3 Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Sönümlü filtreler daha çok yüksek frekanslı harmoniklerin süzülmesinde kullanılır. Yüksek frekanslı bileşenler için düşük empedans göstererek harmoniklerin toprak seviyesine akmasını sağladıkları için yüksek geçiren adını alırlar. Düşük frekanslı harmonikler için sönümlü filtrelerin kullanımı yüksek maliyet gerektirdiği için bu tip filtreler yüksek frekanslı harmoniklerin süzülmesinde kullanılır.



Şekil 7. 7 Yüksek geçiren filtre yapıları

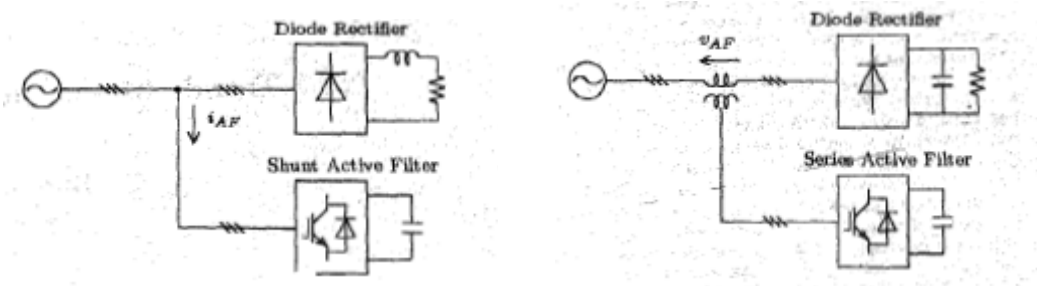


Şekil 7. 8 Sönümlü filtrenin empedans değişimi

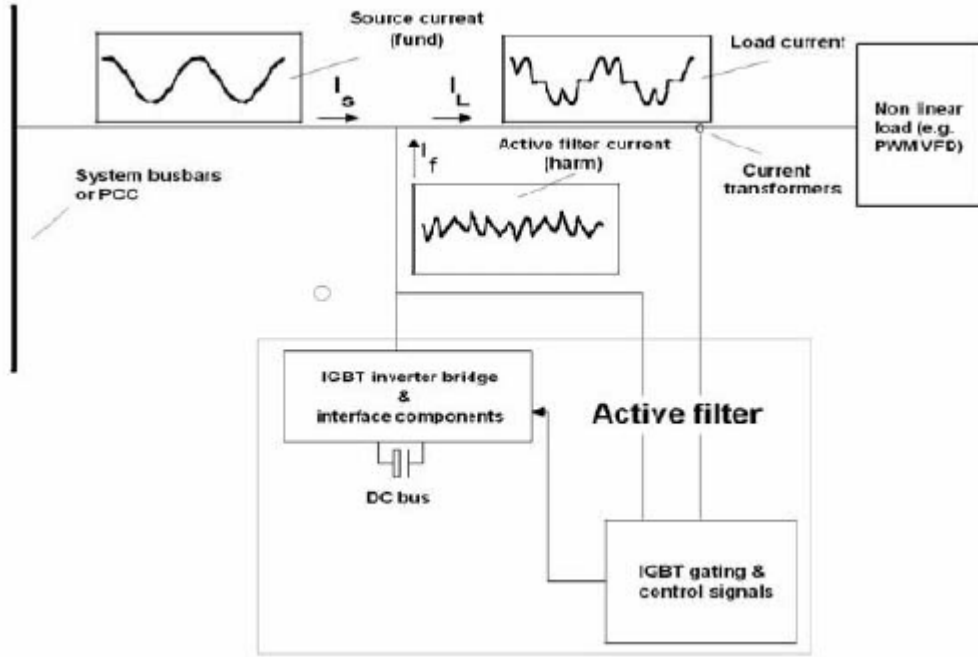
Harmonik filtre tasarımında pasif filtre kullanımında düşük mertebeli harmonikler için genelde tek ayarlı filtreler ve ya çift ayarlı filtreler kullanılır, aynı sistemde yüksek mertebeli harmonik bileşenler varsa bunlar için ayrı ayrı tek ayarlı ve ya çift ayarlı filtre kullanılması yerine yüksek geçiren sönümlü filtreler kullanılır.

7.2 Aktif Filtreler

Pasif filtrelerin yanısıra harmoniklerin giderilmesinde yarı iletken elemanlarla oluşturulan kontrollü akım ve gerilim kaynakları içeren filtreler aktif filtrelerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte hayata dair sorunlarımızın, sıkıntılarımızın, isteklerimizin elektronik cihazlara bırakmanın moda olduğu bu dönemlerde, enerji kalite problemlerinde de bu tür cihazlara sarılmak çok beklendik bir durumdur, nitekim elektronik piyasanın sayısız derecede hayatımıza yansıttığı nice olumlu yanları vardır, bu piyasadan enerji kalitesi sorunu da payını almıştır.



Şekil 7. 9 paralel ve seri aktif filtreler (Akagi [9])



Şekil 7. 10 Şönt tipi aktif filtre blok diyagramı (Evans [2])

Aktif filtreler, pasif filtreler gibi devreye bağlanış şekillerine göre seri ve paralel aktif filtreler olarak sınıflandırılır. Piyasada daha çok şönt tipi aktif filtreler kullanılır. Devreye bağlanış şeklinin yanısıra aktif filtreler çalışması bakımından digital ve analog aktif filtreler olarak da sınıflandırılır.

Şekil 7.10'da görüldüğü gibi aktif filtre ilk olarak şebeke akımı analizi yapmaktadır. Aktif filtrenin lojik yapısına göre kendi stilince şebeke akımının harmonikleri ayrıştırılır. Bu analiz yapıldıktan sonra ayrıştırılan harmonik bileşenlerin ters işaretlileri üretilerek aktif filtrenin kontrollü akım kaynakları vasıtası ile yüke enjekte edilir. Bu şekilde süreç devam eder, böylece yükün ürettiği harmonik bileşenler yok edilip kaynak akımının da sinusoidal forma sokulması sağlanmış olur. Aynı şekilde I_f filtre akımını, I_L yük akımını, I_G kaynak akımını göstermektedir. I_f akımı aktif filtrenin şebekeden çekilen harmonik bileşenlerin ters işaretlisini enjekte ettiği akımdır.

Aktif filtreler istediği sinyali şebekeye enjekte edebildiklerine göre kompanzasyon işleminde de kullanabilirler. Şöyleki, endüktif yükler akım sinyalini gerilime göre geri faza taşır ve devreye kapasitif yükler alarak geri olan akım sinyalini gerilim sinyali ile ayn faza getirtilmeye çalışılır. Aktif filtreler burada kapasitif yüklerin yaptığı işi pekala yapabilmektedir. Yani geri fazda olan akım sinyalinin faz açısına göre yüke ileri faz açılı sinyal enjekte ederek güç faktörünü düzeltmiş olur.

Bu bağlamda aktif filtreler harmonikleri yok etme işleminin yanı sıra yükü kompanse etme işlemini de yapabilmektedir. Enerji kalitesinin temel parametreleri olan harmonikler ve güç faktörünü uygun seviyelere getirerek kaliteli bir enerji kullanımını sağlamaktadır.

7.2.1 Digital Aktif Filtre

Digital aktif filtreler seçici fft aktif filtreler olarak da anılır. Bu tür filtreler harmonikli sinyal bilgisini aldıktan sonra filtre tasarımında yazılan program işlemine göre fast fourrier transform yaparak sinyali 50. harmonik mertebesine kadar ayrıştırır. Temel sinyal haricindeki diğer bileşenlerin eksi işaretlisi aynı şekilde şebekeye enjekte edilir. Burada ayrıştırılan tüm işaretler periyodik formda olduğu için işaretin eksilisini almak yarım periyot faz kaydırmak manasına gelmektedir.

7.2.2 Analog Aktif Filtre

Analog aktif filtreler de genişbant aktif filtre olarak anılır. Bu tür filtreler harmonikli sinyal bilgisini aldıktan sonra filtre tasarımında yazılan program işlemine göre ilgili sinyalden sadece temel bileşeni ayırarak geri kalan bileşenin eksi işaretlisini filtrenin kontrollu akım kaynakları vasıtası ile aynı şekilde şebekeye enjekte eder. Analog aktif filtrede işlem sadece temel bileşeni ayırmak olduğu için digital filtreye oranla şebekeye yanıt verme süresi çok daha kısa olur. Tüm sinyalin fast fourrier transform ile bilgisini tedarik etmeye uğraşmaz.

7.2.3 Aktif Filtrelerin Kıyaslanması

Aktif filtrelerin tasarlanması aşamasında izlenen bu iki lojik yöntem filtrelerin performanslarına, enerji kalitesinin yüksekliğine etki etmektedir. Aktif filtrelerin kıyaslanması aşağıdaki tabloda Çizelge 7.1’de madde madde ele alınmıştır.

Çizelge 7. 1 Aktif filtrelerin kıyaslanması

	digital filtre	analog filtre
cevap verme süresi	~40ms	~15ms
devre sayısı	fazla	Az
harmoniklerde sınırlama	50. harmoniğe kadar	tüm harmonikler
inter harmoniklere etkisi	yok	Var

Tabloda aktif filtrelerin cevap verme sürelerini kıyasladığımızda analog filtrenin digital filtreye oranla yaklaşık 3 kat daha hızlı olduğunu görmekteyiz. 15ms gibi kısa sürede aktif filtrenin yapması gereken işlemleri gerçekleştirmektedir. Analog filtrenin digital filtreye oranla bu denli hızlı işlem yapma sebebi işlem kısıtlılığıdır. Digital filtrede alınan sinyalin fft ile tek tek bileşenlerine ayrışması ve bu sinyallerin eksi işaretlilerinin alınması, alındıktan sonra şebekeye enjekte edilmesi gibi uzun işlemler digital filtre performans hızını analog filtreye göre yavaş kılmıştır.

Tabloda ikinci satırda ise devre sayısı mukayese edilmiş, digital filtrenin fft ile uzun işlemlere girmesi, haliylen analog filtreye göre daha fazla devre elemanı kullanılmasını sağlamıştır. Daha fazla elemanın kullanılması digital filtrenin üretim maliyetini yükseltmiştir.

Diğer bir mukayese konusu ise harmonik eliminasyonunda kaçınıcı harmoniğe kadar harmonikleri yok edebileceği hususudur. Analog aktif filtreler harmonikli sinyali aldıktan sonra sadece temel bileşeni ayıklayıp geri kalan kısmın ters işaretlisini alıp enjekte ettiği için herhangi bir harmonik mertebesi sınırlaması yoktur. Buna karşın digital filtrede 50. harmoniğe kadar ölçüm yapabilme ve cevap verebilme sınırlaması söz konusudur.

Son olarak inter harmonikler dediğimiz konuda analog aktif filtreler başarılı olmasına rağmen digital aktif filtreler bu konuda başarısızdır. Şebekede frekans çarpıcıları, generatörlerin oluk sayı ve şekillerinden ötürü harmonikler kimi zaman temel frekansın tam katları şeklinde oluşmaz. Temel bileşenle 2. harmonik bileşen arası bir sinyal de olabilir, bu tür harmonikler iç harmonikler olarak tabir edilir. Analog aktif filtreler de sadece temel bileşeni ayırıp gerekli işlemleri yaptığı için bu tür iç harmoniklerin de eliminasyonunda etkin bir rol oynar.

7.3 Aktif ve Pasif Filtrelerin Kıyaslanması

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli konularda birbiri ile kıyası aşağıdaki tabloda Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7. 2 Filtrelerin kıyaslanması

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

Pasif filtreler tesise ilave edilirken her harmonik frekansı için ayrı bir filtre oluşturulur. Eğer tesisde 3. 5. 7. 11. harmonik bileşenler yüksek genlikli 17. ve sonrası da küçük genlikli fakat fazla ise bu tesis için 4 adet tek ayarlı filtre ve 1 adet yüksek geçiren sönümlü filtre kullanılması uygun olur. Bu şekilde sorunumuzu pasif filtreler ile halletmek için hesaplarımızın da çok iyi yapılması gerekir. Yükün tüm bilgilerinin yanı sıra sistem ve hat empedanslarını doğru şekilde bilmek gerekir. Tüm bu veriler elde edildikten sonra yükün kapasitif ihtiyacına göre filtrede kullanılacak kondansatör değerleri, bununla birlikte endüktans değerleri, filtrenin keskinliğini ayarlamak için ise kalite faktörü ile birlikte direnç değerlerini tayin etmek gerekir. Ayrıca muhtemel oluşabilecek rezonans riski için de tedbir almak gibi bir takım işlemler süregelir. Bütün bu işlemler yapıldıktan sonra harmonik analizörlerle test sonucu THD_I ve THD_V değerlerine göz atıldığında enerji kalitesi standart değerlerin üzerine çıkmış görünür, bir nebze kalite problemi ortadan kalkmış olur. İleriki bir zamanda yüke ilave edilecek ekstra yüklerde tüm hesaplar değişecek ve tekrar filtre hesabı yapılacaktır.

Bu filtrelerin yerine aktif filtre kullanılsaydı kuruluş maliyeti artmış olacaktı; fakat maliyet artacak diye de çoğu kıstasları göz ardı edemeyiz. Sistemdeki harmonikleri aktif filtre ile yok etme yöntemini kullansaydık bir çok pasif filtre yerine tek bir aktif filtre kullanacaktık, boyut ve ağırlık olarak bayağı bir karımız olacaktı, sisteme ilave yük eklendiğinde tekrar filtre

tasarımı yapma gereksinimi duymayıp filtre için ilave masraftan kaçınmış olacaktık, rezonans riski göz ardı edilecekti. Enerji kalitesi ölçümlerinde yaklaşık sıfır hata ile sorunlarımızı halletmiş olacaktık, harmonik standartların %5 değerlerinin çok çok uzağında kaliteli bir enerjiye sahip olacaktık, filtrelerin periyodik bakım sürelerini uzatmış olacaktık. Neticede enerji kalitesinde aktif filtrelerin kullanılması için önümüzde nice sebep var.

SİMULASYON ORTAMINDA ENERJİ KALİTESİ

Çevresi ile sürekli etkileşim içinde olan, değişken talep ve dinamik iş süreçlerinin oluşturduğu sistemlerin analizinde kullanılan simülasyon, güçlü ve vazgeçilmez bir sistem mühendisliği aracıdır. Lojistik süreçlerinin dinamik yapılarını, sistemi oluşturan tüm birimlerin genel sistem performansına olan etkilerini inceleyerek ortaya çıkaran simülasyon disiplini, çok-kriterli karar alma mekanizmalarının gerekli olduğu alanlarda, kullanıcıya tüm senaryoları deneterek en doğru kararların alınmasını sağlar. Simülasyon, ancak gerçek hayatta deneyebileceğiniz senaryoları sanal ortamda gerçekleştirmenize imkan verir ve yatırımınızı daha gerçekleştirmeden çalıştırmanızı sağlar.

Hayatın ve bilimin her dalında aktif olarak görev alan simülasyon elektrik tesislerinde enerji kalitesi incelemesinde de rol almaktadır. Gerçek ortamlarda riski azaltmak ve yüksek maliyetlerden kurtulmanın en iyi yollarından biri olan benzetim ortamları bu tezde de kullanılmıştır.

Temel bileşen frekansının tam katları şeklinde farklı genlikli sinus bileşenlerinden oluşan harmonik üreten 3 fazlı bir yük bu bölümde modellenmiştir. Harmonik kaynağı şeklinde devrede bulunan yükün enerji kalitesini en üst seviyeye çıkartmak için benzetim ortamında harmonik bileşenleri elimine eden pasif filtrelerin yanısıra güç faktörünü de “1” yapmaya çalışan kompanzasyon bataryası bulunmaktadır. Enerji kalitesi için tasarlanan bu tesisler kesiciler üzerinden devreye alınmaktadır. Enerji sisteminin çeşitli durumlarındaki kalitesini göstermek için ise benzetim ortamında grafikler ve bir takım algoritmalar bulunmaktadır.

8.1 Simulasyon Elemanları

Bu bölümde oluşturulan benzetim ortamının en önemli elemanı nonlinear yüküdür. Harmonik kaynağı olan yük, akım kaynakları ile modellenmiş ve bu modellenmede simulink matematiksel blokları kullanılmıştır.

Harmonik bileşenlerin yok edilmesi için simulink programının tasarlamış olduğu pasif harmonik filtre modelleri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra harmonik bileşenlerinin rezonans anını hesaplayarak seri R L C devreler oluşturularak da harmonik filtreleme modelleri üretilmiştir. Aynı işlevi gerçekleştiren bu iki model A ve B modeli olarak isimlendirilmiştir.

Generatör olarak benzetim ortamına 3 faz gerilim kaynağı eklenmiştir, kaynaktan hemen sonra gerekli ölçümleri yapmamızı sağlayacak ölçü blokları ilave edilmiştir. Devreye hat kayıplarını sembolize etmesi açısından küçük değerde direnç elemanları yüke seri olarak bağlanmıştır. Harmonik filtrasyonun hemen yanında ise güç faktörünü istenilen değere çıkartacak olan kompanzasyon bataryası mevcuttur.

8.2 Simulasyon Teknik Bilgileri ve Çalıştırılması

Doğrusal olmayan yükün a fazının zamana bağlı akım değeri:

$I_{ya} = 100.\sin(\omega t - \pi / 4) + 40.\sin(3.\omega t - 3.\pi / 4) + 20.\sin(5.\omega t - 5.\pi / 4) + 10.\sin(7.\omega t - 7.\pi / 4)$ şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiştir. A fazının fazör açılarının sıfırdan farklı olmasının sebebi yükün endüktif davranışlı bir karaktere sahip olması istenmesidir. Yükün b ve c faz akımları da dengeli bir sistem oluşturacak şekilde eşit açılarla ötelenmiş akım işaretleridir.

Doğrusal olmayan yükün nominal akım değeri:

$$I_n = \sqrt{(100/\sqrt{2})^2 + (40/\sqrt{2})^2 + (20/\sqrt{2})^2 + (10/\sqrt{2})^2} A.$$

Harmonik kaynaklarının daha çok yük ağırlıklı olmasından ötürü generatör harmoniksiz gerilim kaynağı olacak şekilde seçilmiştir. Şöyleki:

$V_a = 308.\sin(\omega t + 0)$ olacak şekilde ifade edilmiştir. Diğer faz gerilimleri de 120'şer derece ötelenmiştir.

Bu durumda nonlinear yükün gücü:

$$S_y = \sqrt{3}.U_{ff}.I_n$$

Temel bileşen akım sinyali ile gerilim sinyali arasında $\pi/4$ derece açı farkı olacak şekilde ayarlanmıştır. Sistemin kompanzasyon ihtiyacını göstermek için akım sinyali, gerilim sinyalinden bu açı kadar geri alınarak yükün endüktif karakterde davranması sağlanmıştır.

Yükün üretmiş olduğu harmonik sinyalleri elimine etmek için tasarlanan filtrelerden A grubu filtrasyonda simulink üç faz pasif filtre bloku kullanılmıştır. Bu blok arayüzünde bizden faz-faz gerilimini, tasarlanacak filtre tipini, ayarlanacak frekans değerini ve filtrenin keskinliğini belirleyen kalite faktörünü girmemiz istenmektedir. Yükte 3., 5., ve 7. harmonikler olduğu için toplamda 3 tek ayarlı filtre 3 adet devre kesicisi ile yüke paralel bağlanmıştır.

Harmonik filtreleme için tasarlanan B grubu filtrasyonda ise seri RLC elemanları kullanılarak 3 adet harmonik mertebesi ve 3 faz sistem için toplamda 9 adet RLC devre ile kalite sağlanmaya çalışılmıştır. Bir takım hesaplamalar sonucu devre elemanlarının değerleri belirlenmiştir. Tüm değerler hesaplandıktan sonra harmonik filtreler 3 erli gruplar haline getirilip tek bir devre kesicisi ile yüke paralel olarak sisteme ilave edilmiştir.

Harmonik sinyallerin yok edilmesinin ardından enerji kalitesi için güç faktörü parametresinin de istenilen seviyeye gelmesi istenir. Bunun için yüke paralel seri RC yükü ile kompanzasyon bloku oluşturularak sisteme devre kasici üzerinden akuple edilmiştir.

Sisteme enerji kalitesi için yapılacak müdahalelerin neticelerini gözlemlemek için benzetim ortamında E bloku oluşturulmuştur. Bu blok ile istenilen anda sistemin güç faktörü, aktif güç, 3 faz gerilim sinyali ve 3 faz akım sinyali görüntülenecektir.

8.3 Pasif Filtre Simulasyonu

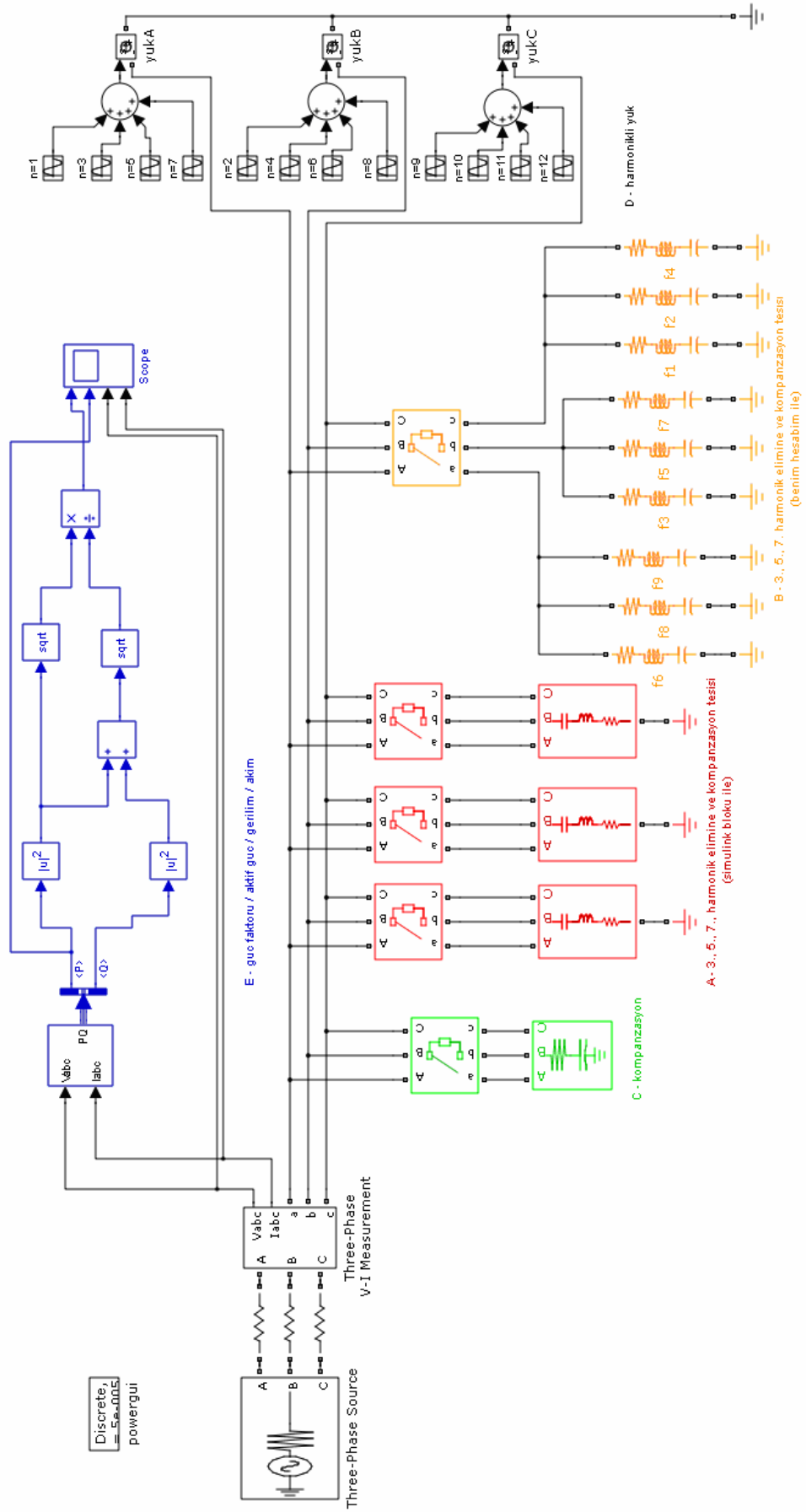
Simulink programının ilk çalıştırma durumunda sadece harmonikli yük devrede iken uygulama yapılmıştır. Bu esnadaki akım, gerilim, güç faktörü ve aktif güç değerlerinin yanı sıra harmonikli bileşenlerden ötürü akım ve gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Simulink programının ikinci çalıştırma durumunda A bloku olarak isimlendirilen harmonik filtreleme devreye alınarak uygulama yapılmıştır. Bu esnadaki akım, gerilim, güç faktörü ve aktif güç değerlerinin yanı sıra harmonikli bileşenlerden ötürü akım ve gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

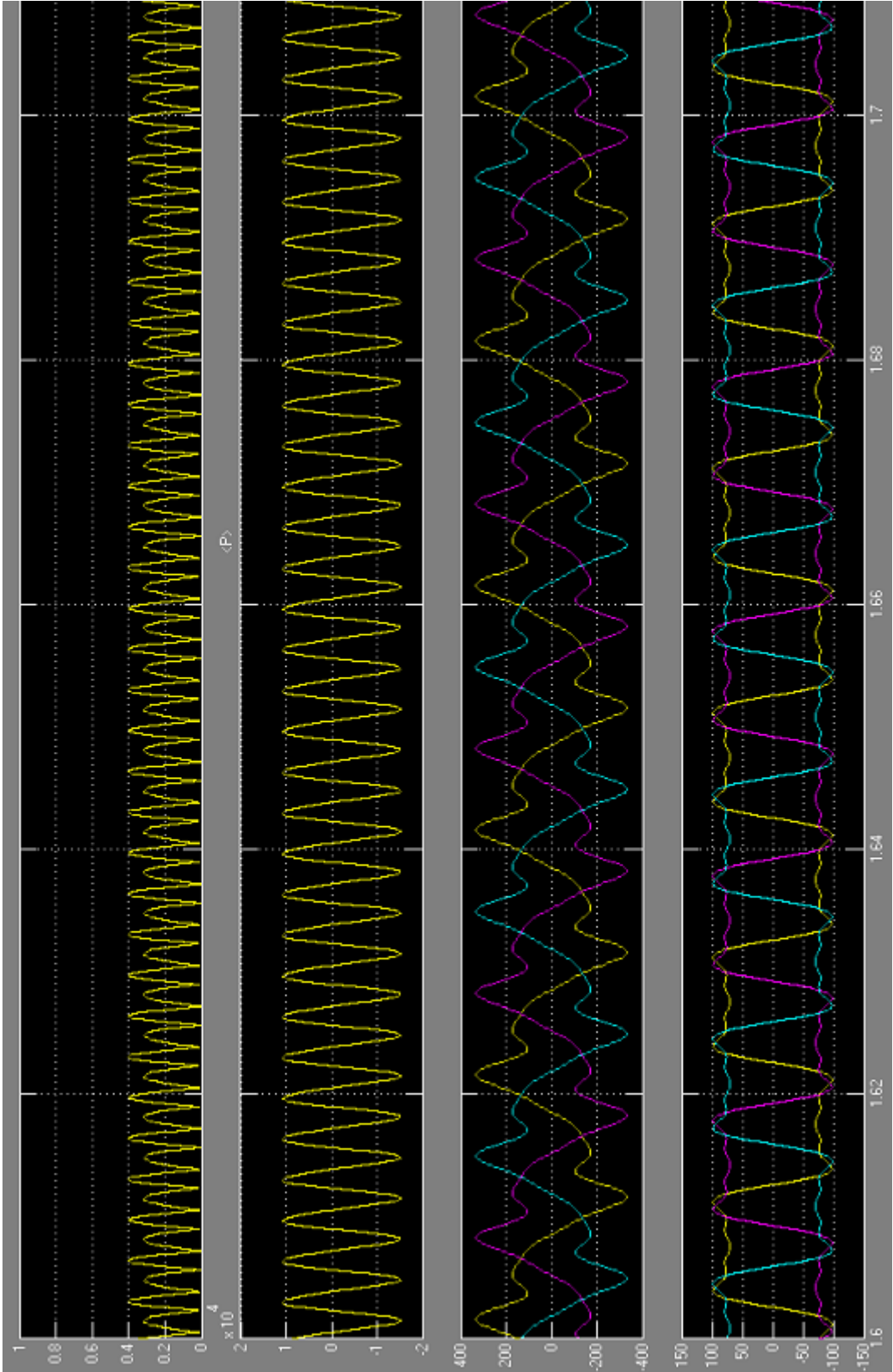
Simulink programının üçüncü çalıştırma durumunda B bloku olarak isimlendirilen harmonik filtreleme devreye alınarak uygulama yapılmıştır. Bu esnadaki akım, gerilim, güç faktörü ve aktif güç değerlerinin yanı sıra harmonikli bileşenlerden ötürü akım ve gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Simulink programının dördüncü çalıştırma durumunda B ve C blokları harmonik filtreleme ve kompanzasyon tesisi devreye alınarak uygulama yapılmıştır. Bu esnadaki akım, gerilim, güç faktörü ve aktif güç değerlerinin yanı sıra harmonikli bileşenlerden ötürü akım ve gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

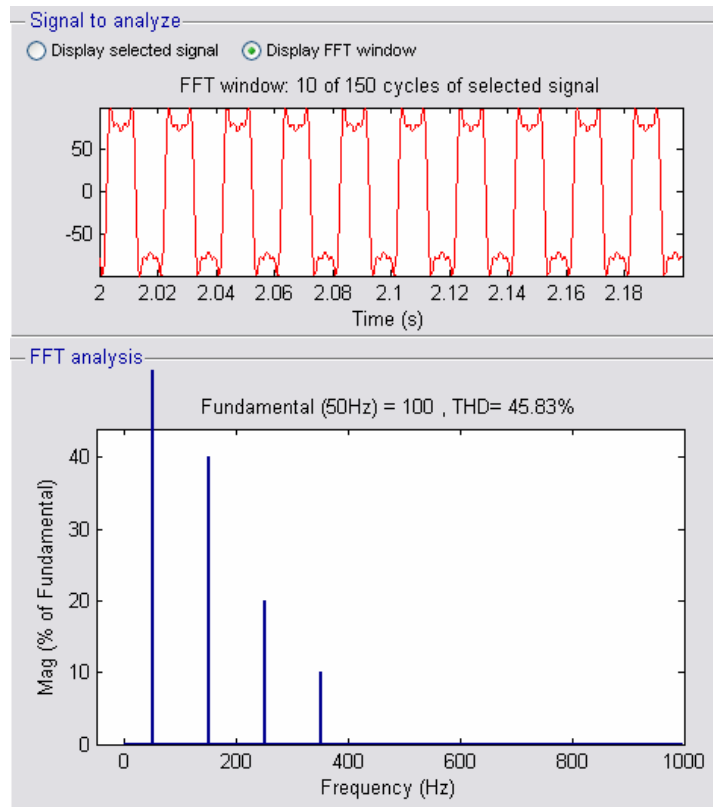
Simulink programının beşinci çalıştırma durumunda harmonikli sinyaller filtre edilmemiş haldeyken kompanzasyon sistemin devreye alınması uygulaması yapılmıştır. Bu esnadaki akım, gerilim, güç faktörü ve aktif güç değerlerinin yanı sıra harmonikli bileşenlerden ötürü akım ve gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



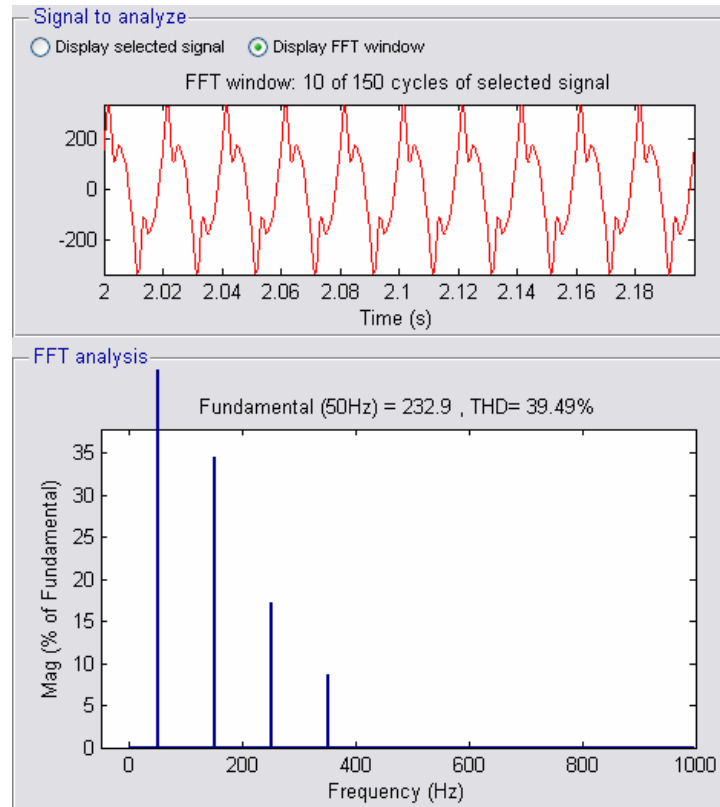
Şekil 8. 1 Sistemin benzetim ortamında görünümü (1. çalıştırma)



Şekil 8. 2 İlk çalıştırma simülasyon sonuçları



Şekil 8. 3 İlk çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu



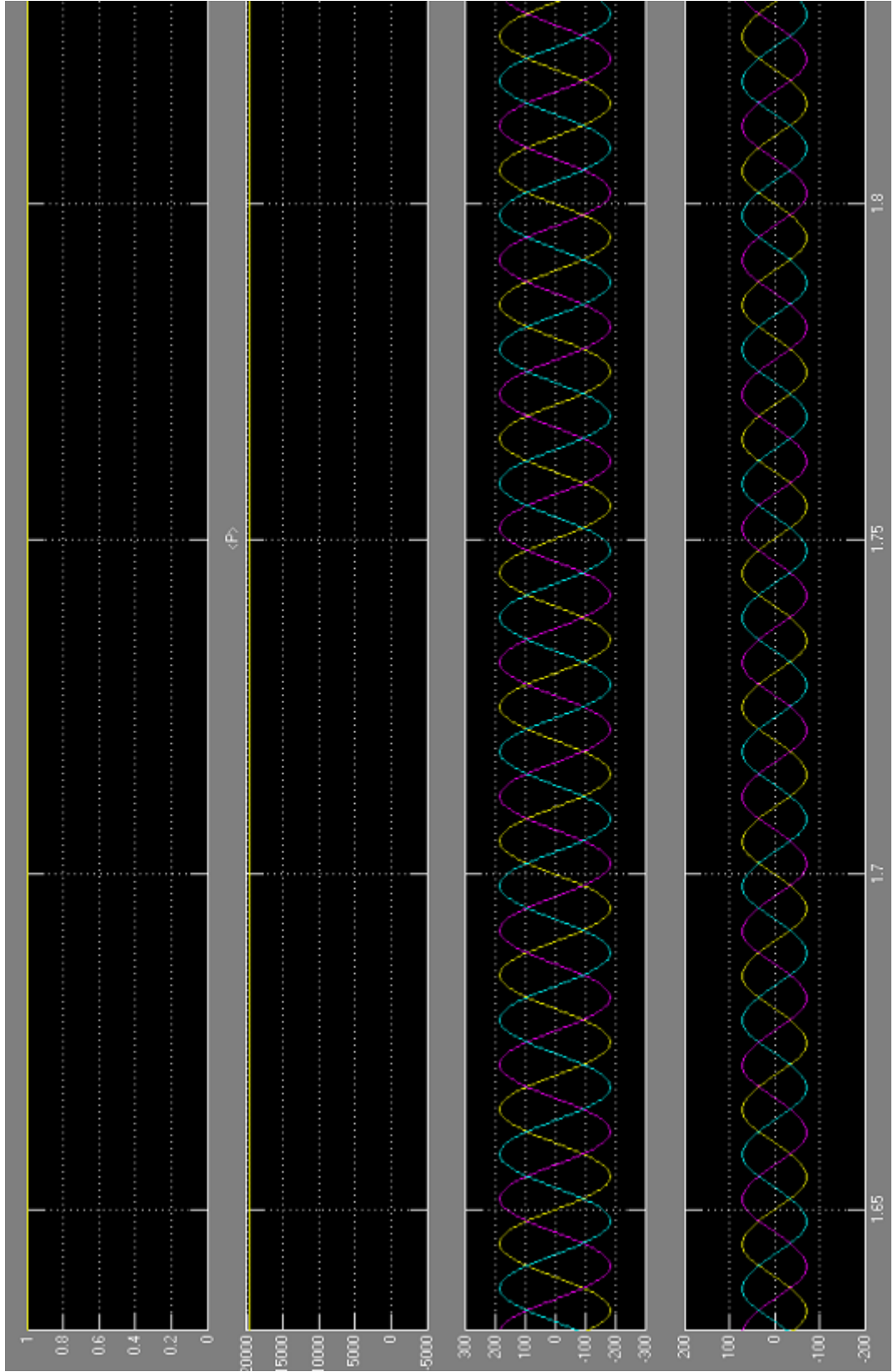
Şekil 8. 4 İlk çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu

İlk çalıştırmada beklendiği üzere Şekil 8.2'deki grafikler nonlineer yükün harmonik kaynağı olarak çalıştığını ve enerji kalitesini düşürdüğünü göstermektedir. Yükün akım ve gerilim sinyallerindeki harmonik bozulmalar fft analizi sonucu değerler $THD_I = 45.83$ ve $THD_V = 39.49$ şeklinde ölçülmüştür. Genel olarak bu değerlere göz atıldığında harmonik sınırlamanın çok çok üzerinde olduğu görülmektedir.

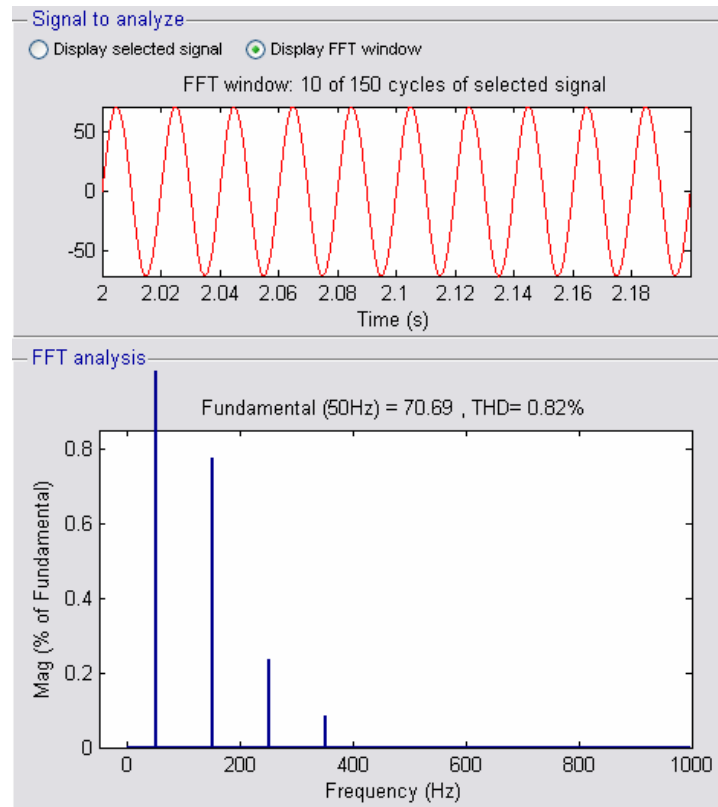
Toplam harmonik distorsiyon değerleri ve temel bileşen değerleri bilinerek yükün üzerindeki gerilim ve yükün çektiği akımı aşağıdaki formüllerle ifade hesap edebiliriz:

$$V = V_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (8.1)$$

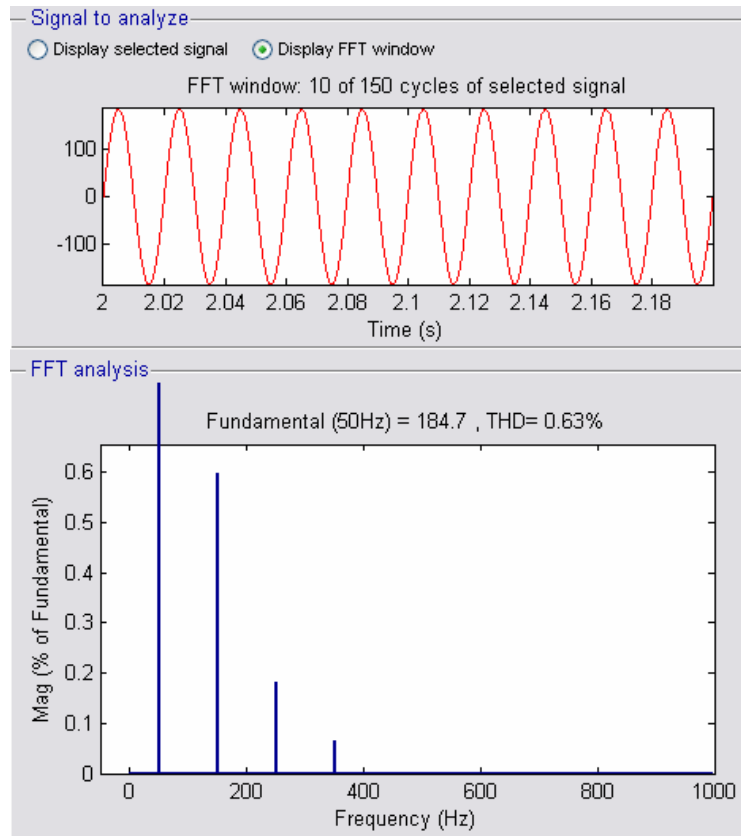
$$I = I_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (8.2)$$



Şekil 8. 6 İkinci çalıştırma simülasyon sonuçları



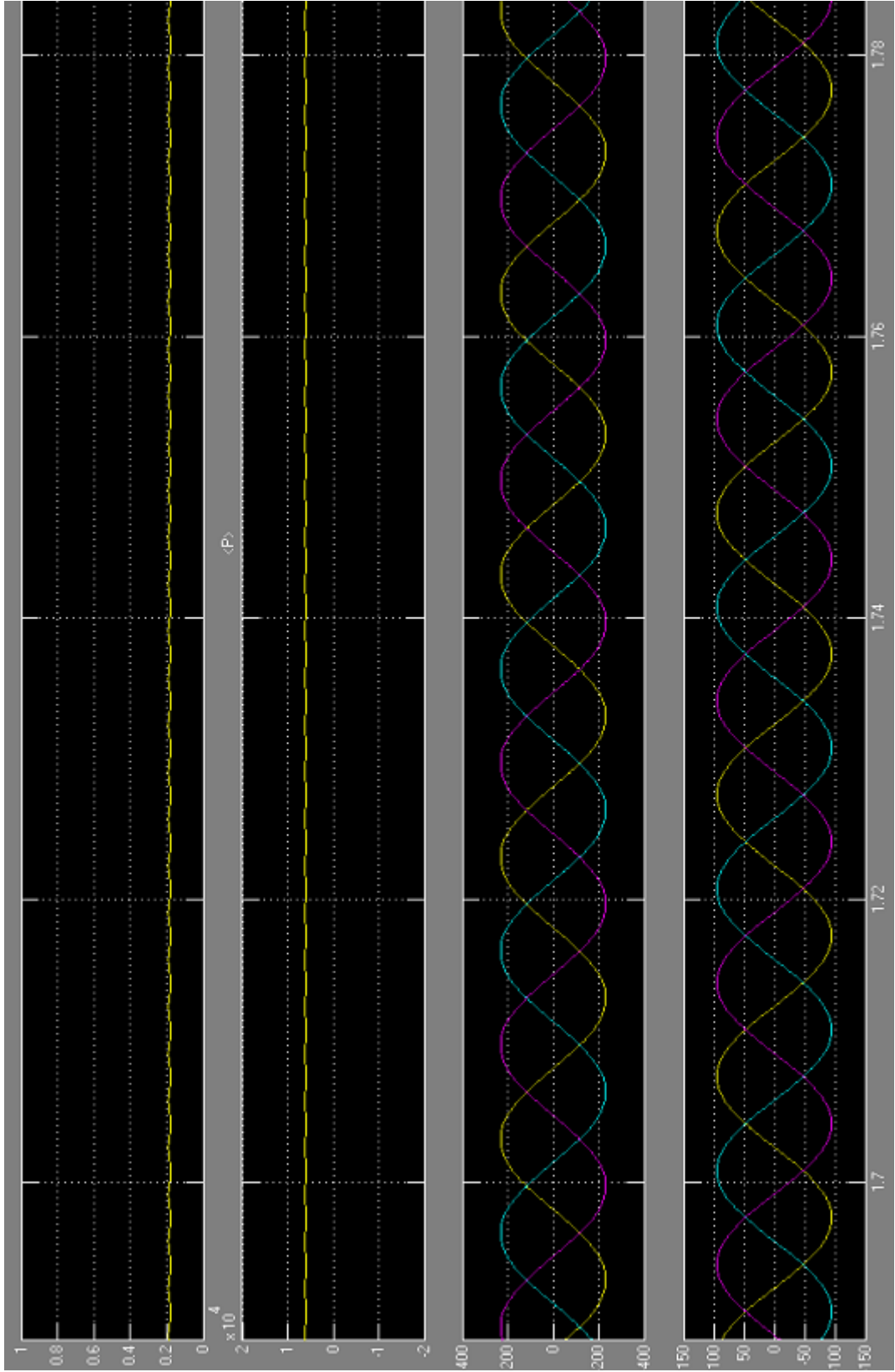
Şekil 8. 7 İkinci çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu



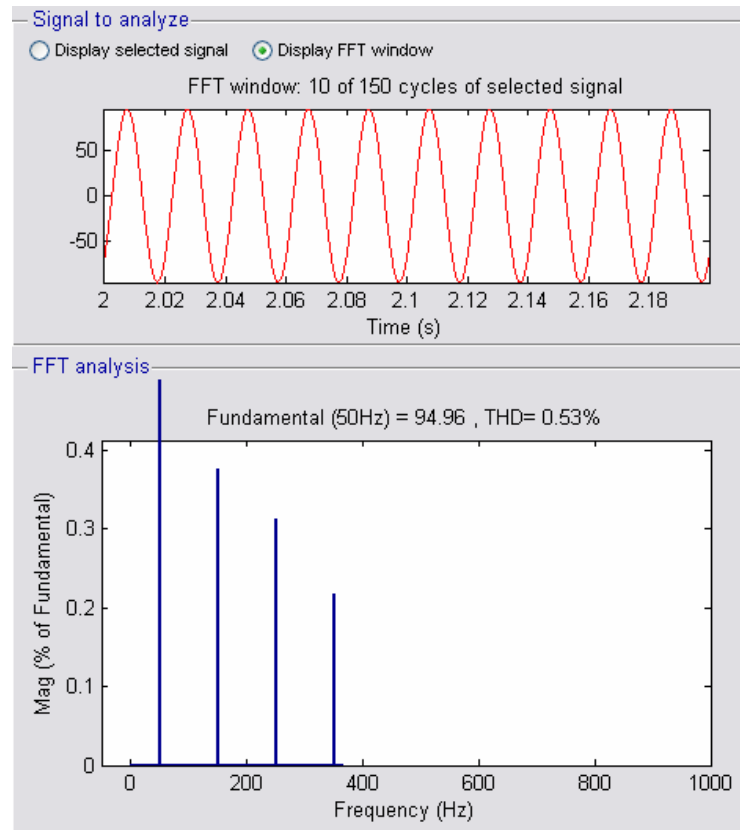
Şekil 8. 8 İkinci çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu

İkinci alıştırma modunda harmonik filtreleme için simulink programının sahip olduğu 3 faz harmonik filtre modeli kullanılmıştır. Bu modelin arayüzünde talep kapasitif gücü de tam değerde girildiği için şekil 8.6'daki gibi akım ve gerilim sinyallerinin sinusoidal forma getirildiğinin yanı sıra g faktörü değeri de istenilen boyutlara getirildiği görülmüştür. Aynı şekilde akım ve gerilim sinyallerine baktığımızda ise, sistem filtresiz çalışırken akım sinyali gerilim sinyalinin gerisindeydi, bu alıştırma modunda ise her iki sinyal de hem sinusoidal formda hem de sinyaller hemen hemen aynı formdalar.

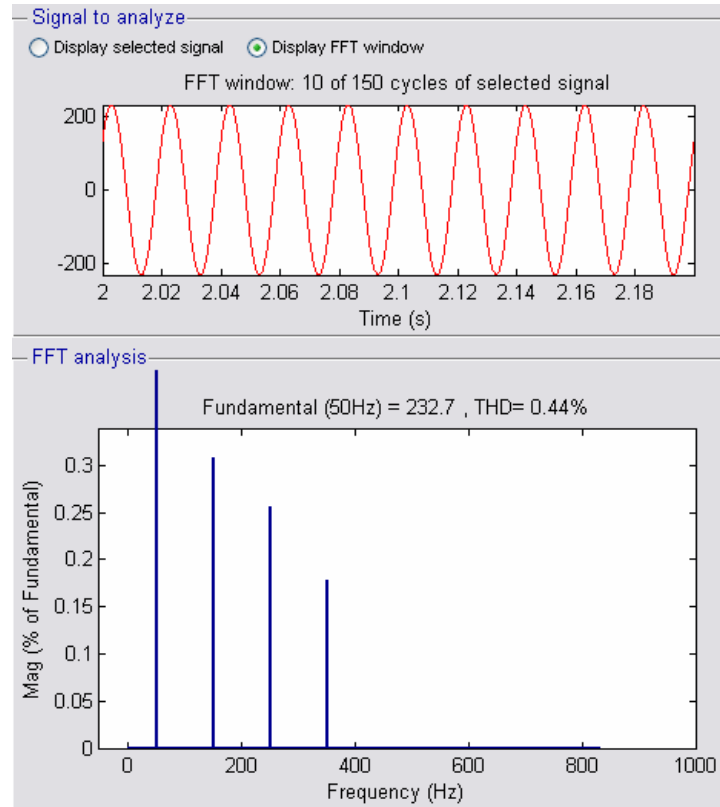
Akım ve gerilim sinyallerinin harmonik bozulmalarının düzeldiğini şekil 8.7 ve şekil 8.8'de Toplam harmonik distorsiyonu değerleri ideal seviyelere yanaşmış şekildedir. Genel olarak harmonik standart değerler ile mukayese ettiğimizde, yapılan filtrasyonda yüzde yüz başarı elde edilmiş olduğu görülmektedir.



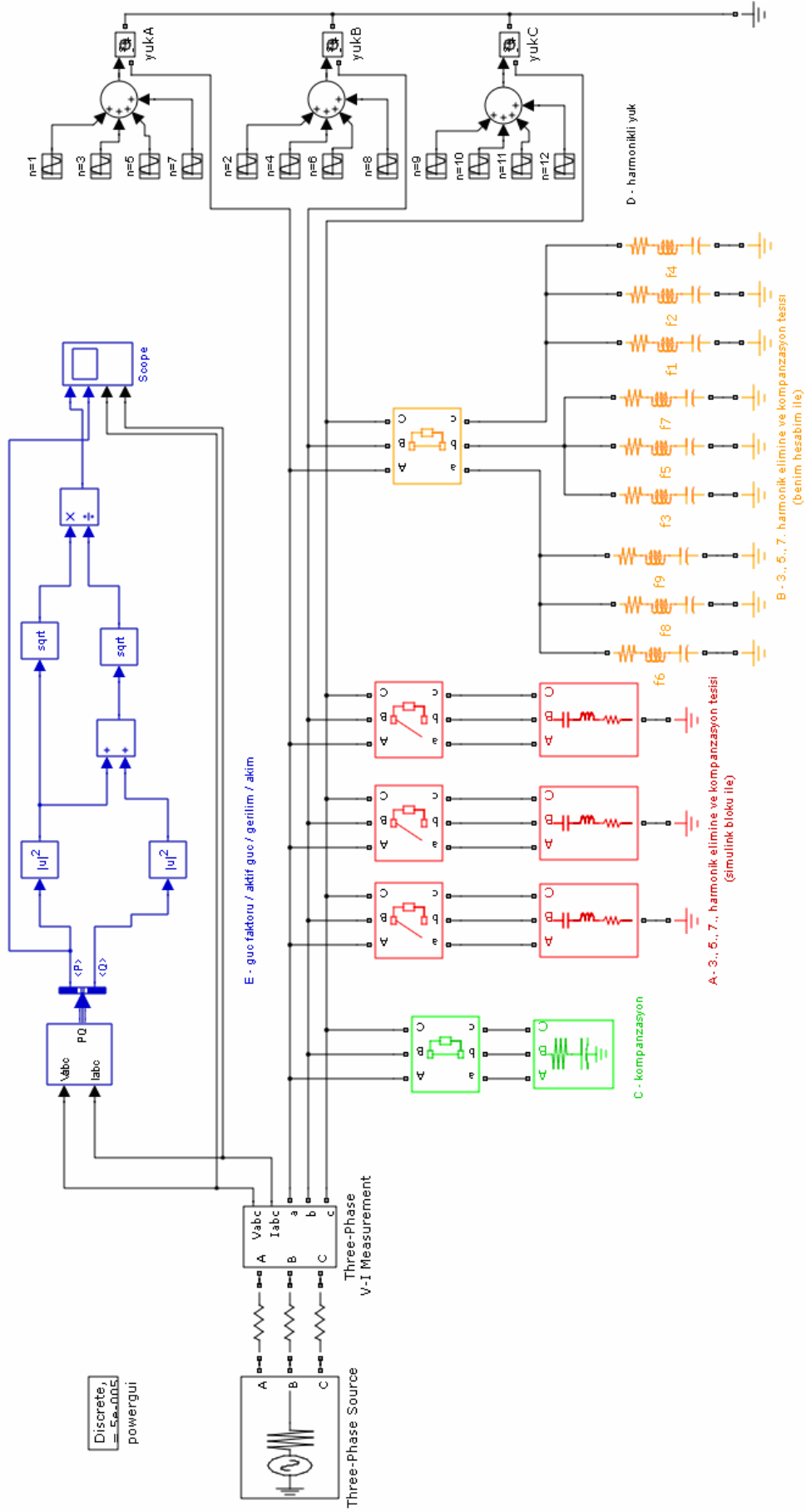
Şekil 8. 10 Üçüncü çalıştırma simülasyon sonuçları



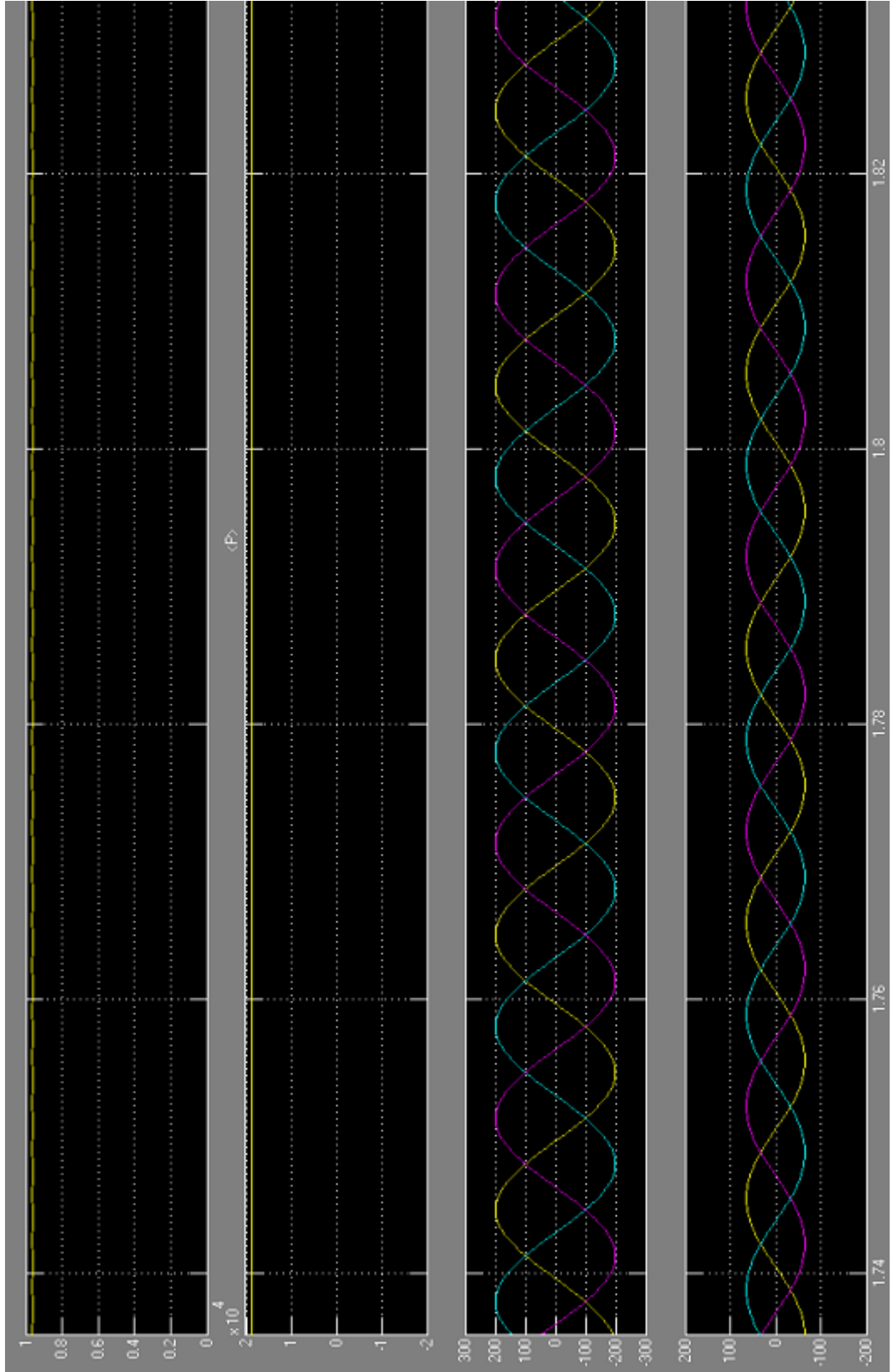
Şekil 8. 11 Üçüncü çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu



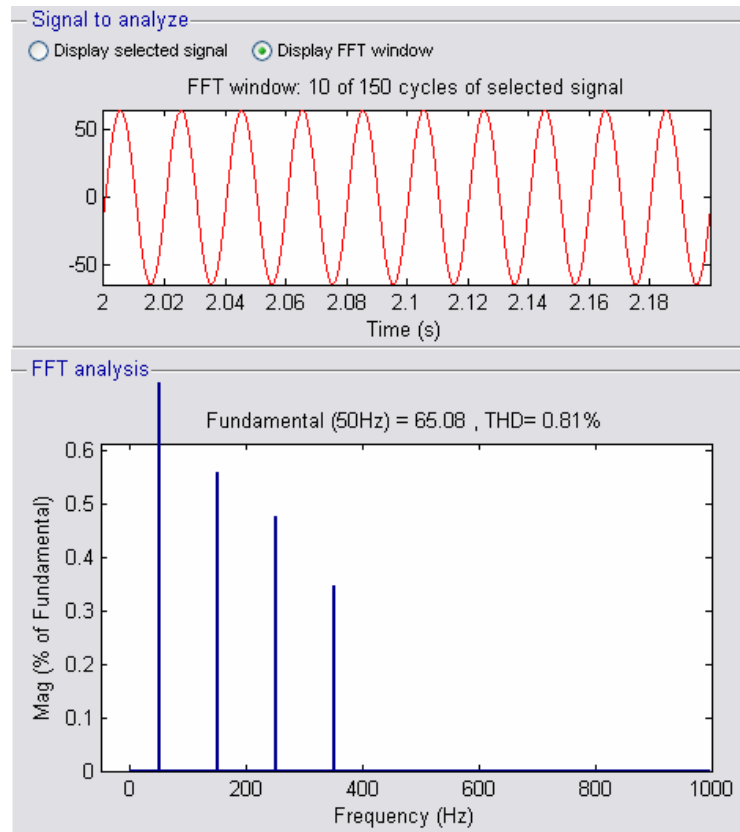
Şekil 8. 12 Üçüncü çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu



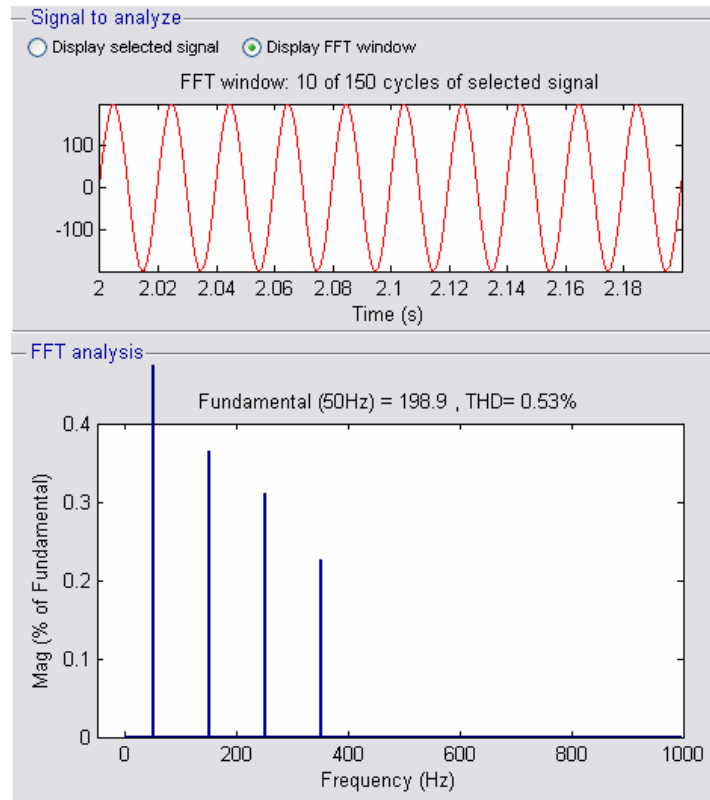
Şekil 8. 13 Sistemin benzetim ortamında görünümü (4. çalıştırma)



Şekil 8. 14 Dördüncü çalıştırma simülasyon sonuçları



Şekil 8. 15 Dördüncü çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu

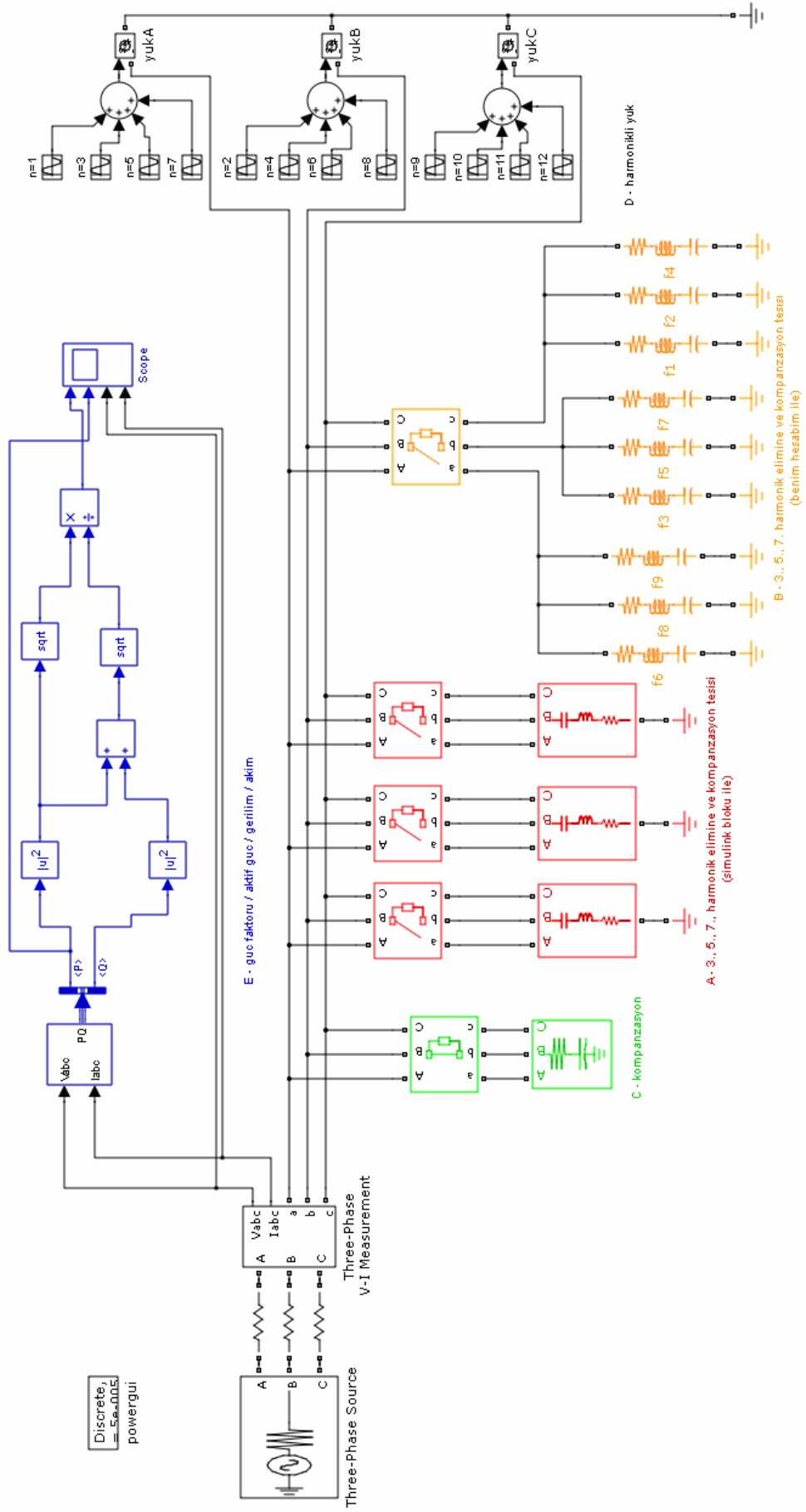


Şekil 8. 16 Dördüncü çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu

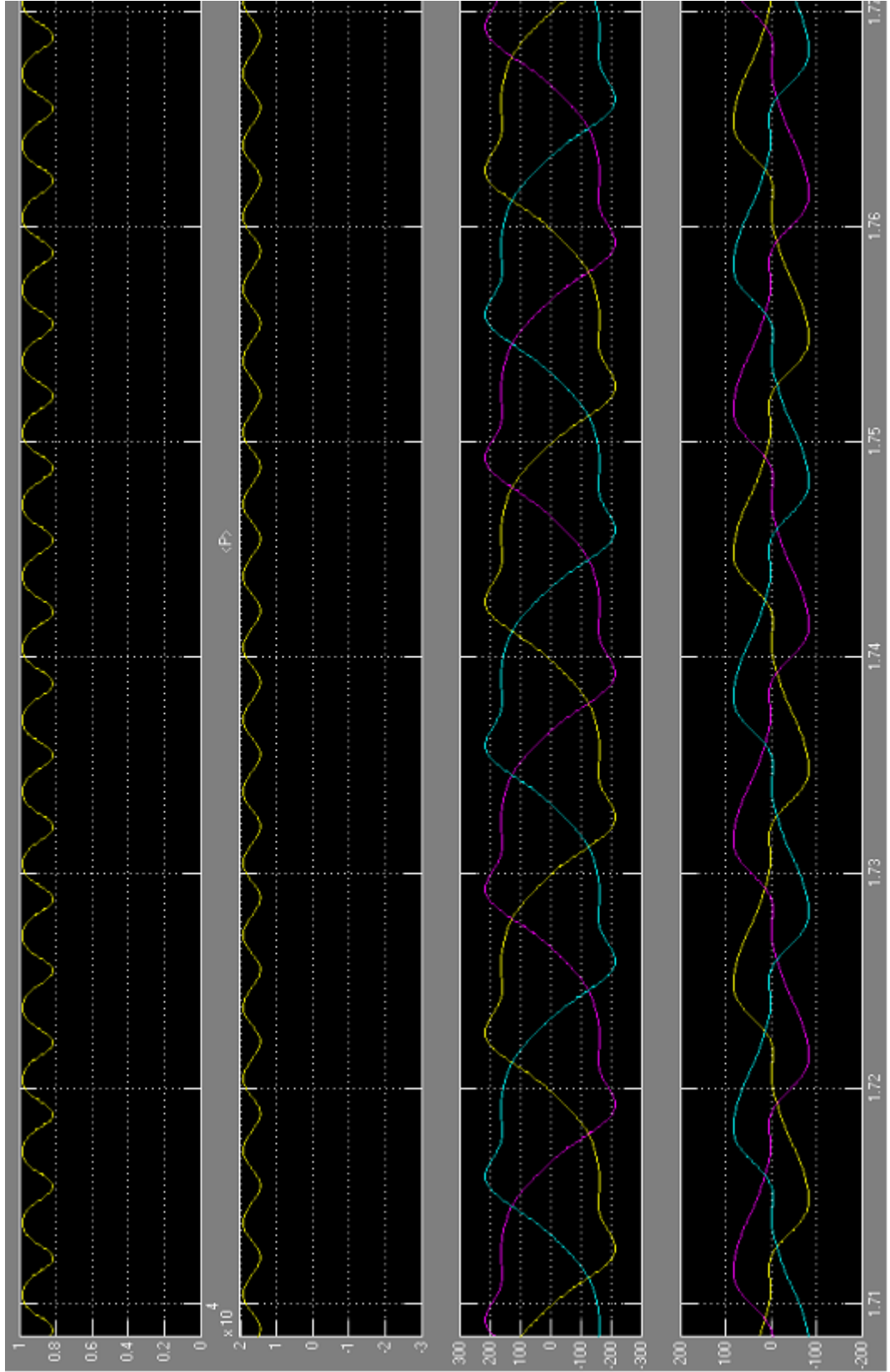
Üçüncü çalıştırmada sadece harmonik bileşenler yok edilmek istenmiştir. Bu yüzden üçüncü çalıştırmada elde edilen grafikler akım ve gerilim sinyallerinin sinusoidal olduğunu göstermektedir; buna karşın yükün kapasitif güç talebi filtre ile karşılanmadığı için güç faktörü çok düşük seviyededir.

Dördüncü çalışma ile birlikte bir önceki çalışmaya ilave olarak kompanzasyon bataryaları devreye alınmıştır. Harmonik sinyallerin eliminasyonu ile birlikte kompanzasyon tesisi de devreye alındığı için güç faktörü 0.96'lar mertebesine ulaşmıştır.

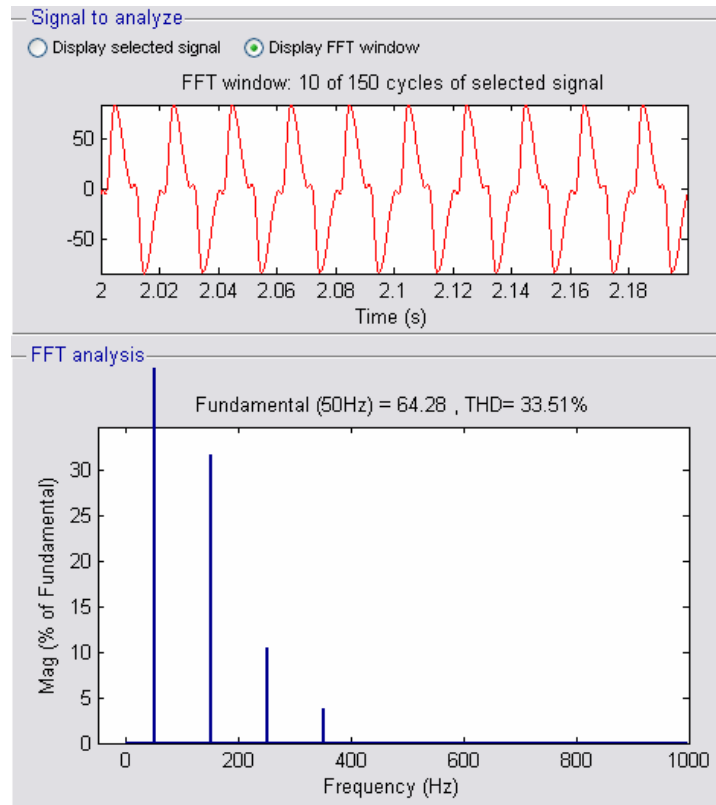
Son olarak, yükün harmonikli sinyallerini filtreler ile yok etmeden kompanzasyon tesisinin devreye alma işlemi benzetim ortamında çalıştırılmıştır. Şekil 8.17, Şekil 8.18, Şekil 8.19 ve Şekil 8.20'deki grafiksel değerler harmonikli durumun yük faktörüne olumsuz etkilerin göstermektedir.



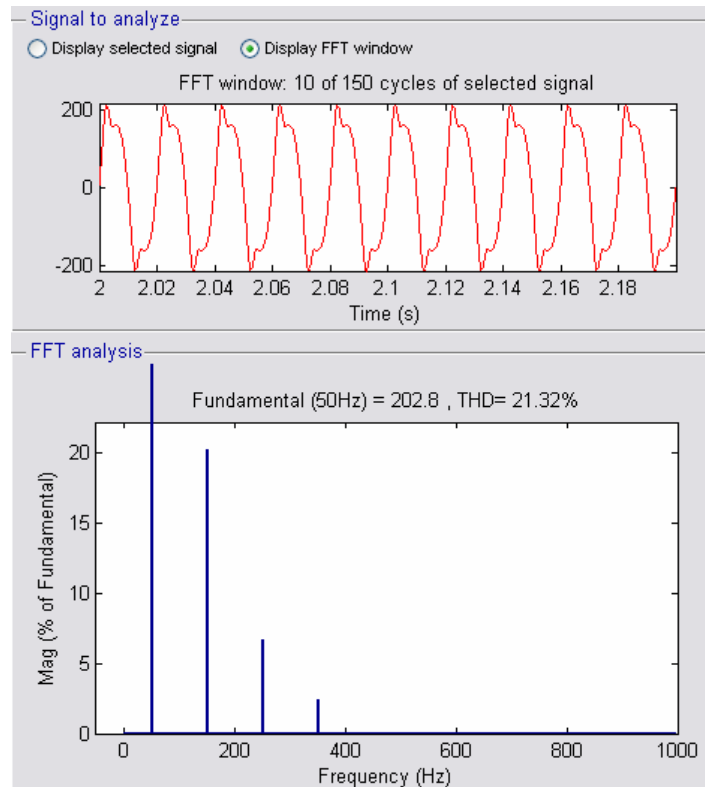
Şekil 8. 17 Sistemin benzetim ortamında görünümü (5. çalıştırma)



Şekil 8. 18 Beşinci çalıştırma simülasyon sonuçları



Şekil 8. 19 Beşinci çalıştırma akım toplam harmonik distorsiyonu



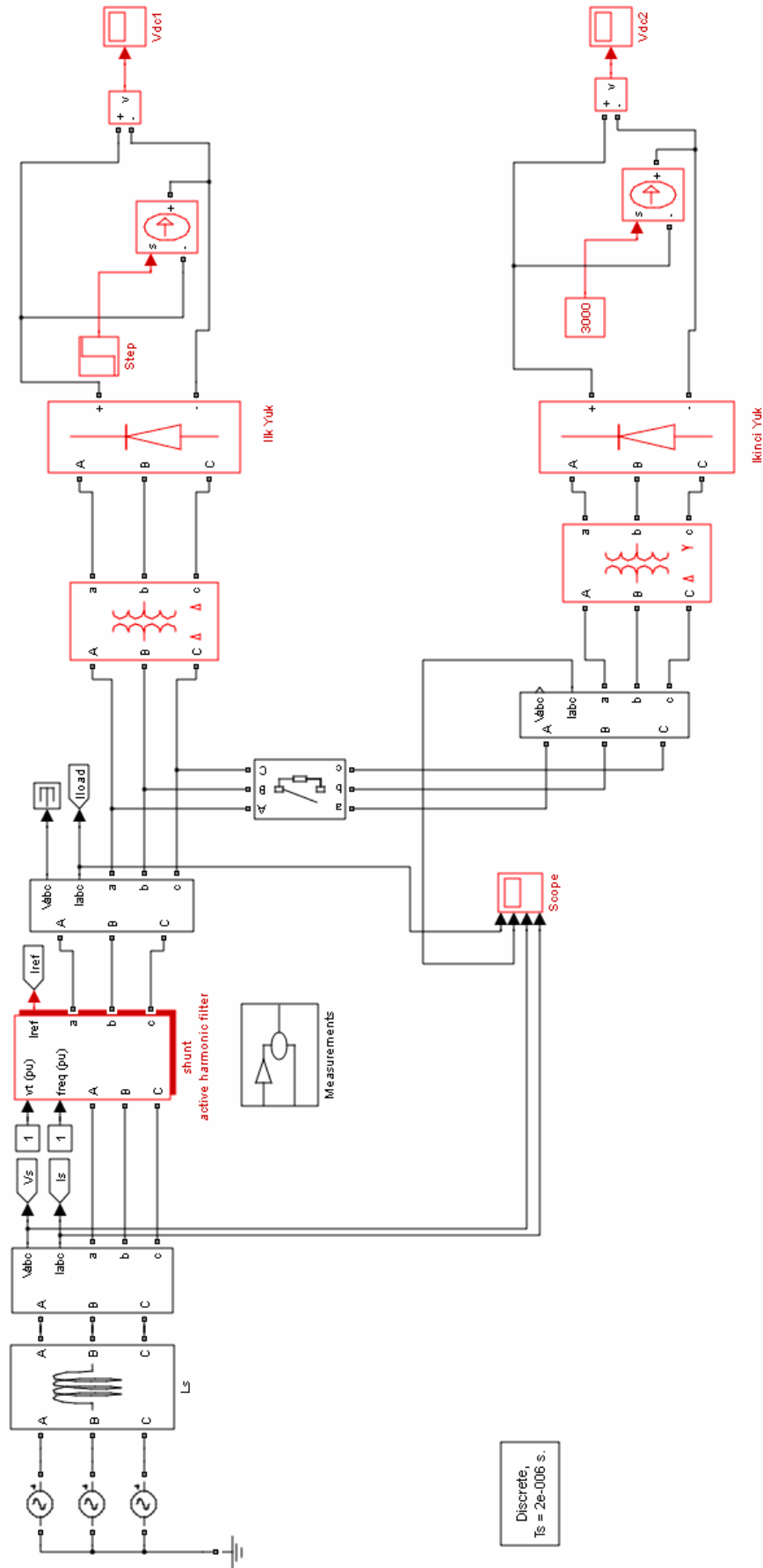
Şekil 8. 20 Beşinci çalıştırma gerilim toplam harmonik distorsiyonu

8.4 Filtrelerin Simulasyon Ortamında Kıyası

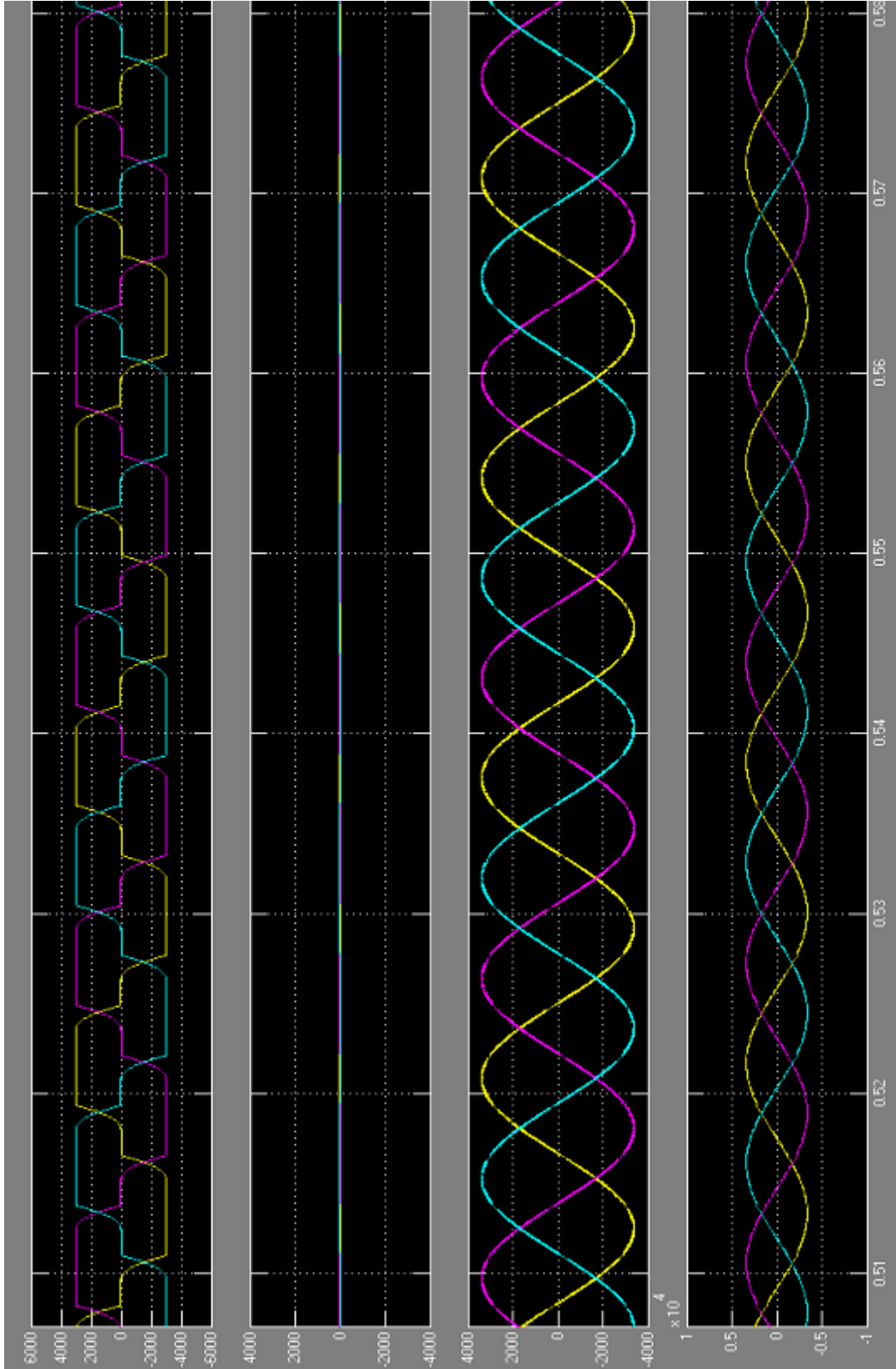
Bu bölümde Matlab Simulink programı benzetim ortamında hem aktif filtreyle hem de pasif filtreyle harmoniklerin giderilmesi durumu ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Filtreleme yöntemleri farklı olan bu iki elektrik sistemine sonradan ilave yükler eklenmiş ve enerji kalitesindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Aşağıda Şekil 8.21’de yarı iletken devre elemanları ve akım kaynakları kullanılarak modellenmiş yükün harmonik bileşenlerini aktif filtre ile yok edilmesi durumu görülmektedir. Sistem sadece ilk yük devrede iken program çalıştırılmış aktif filtreden sonraki yük akımının zamana bağlı grafiği ile aktif filtre sayesinde harmonik bozulmaların giderildiği şebeke akımı sinyallerinin durumları Şekil 8.22’ de verilmiştir. Bu şekilde ilk grafik yükün akım-zaman grafiği, ikinci grafik ilave yükün akım-zaman grafiği, üçüncü ve dördüncü grafik ise sırasıyla şebekedeki gerilim ve şebekeden çekilen akım sinyalini göstermektedir. Aynı zamanda Şekil 8.23 ve Şekil 8.24’te mevcut yükün neden olduğu harmonik bozulmaların aktif filtre ile düzeltildiği toplam harmonik distorsiyonu grafikleri de gösterilmiştir.

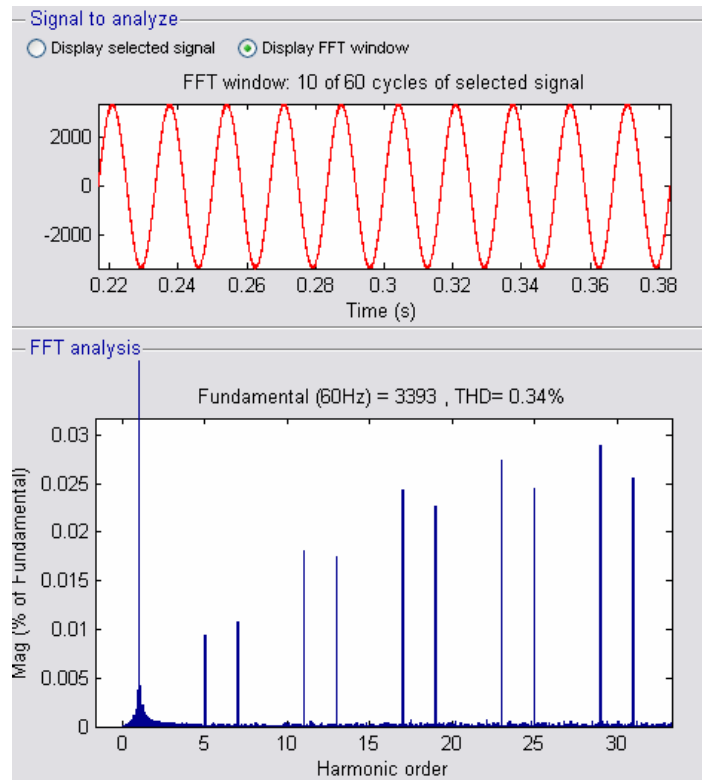
Sisteme daha sonradan başka bir yükün ilavesi durumu aktif filtreli bir enerji sistemi modellemesinde incelenmiştir. Şekil 8.21’deki düzenekte ilave yükün anahtarı kapalı konuma getirilerek ilave yük sisteme alınmıştır. Bu durumun zaman grafiği Şekil 8.25’te verilmiştir. Aynı zamanda ilave yükler sisteme eklense dahi aktif filtrenin vazifesini gerçekleştirdiğinin ispatı görünümündeki harmonik bozulma değerleri Şekil 8.26 ve Şekil 8.27’de gösterilmiştir.



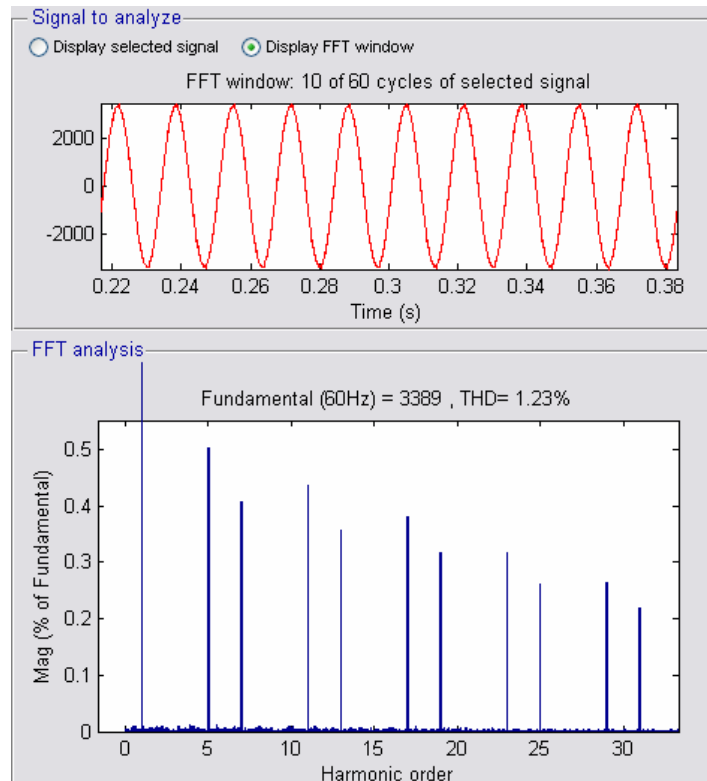
Şekil 8. 21 Aktif filtre ile harmonik eliminasyon



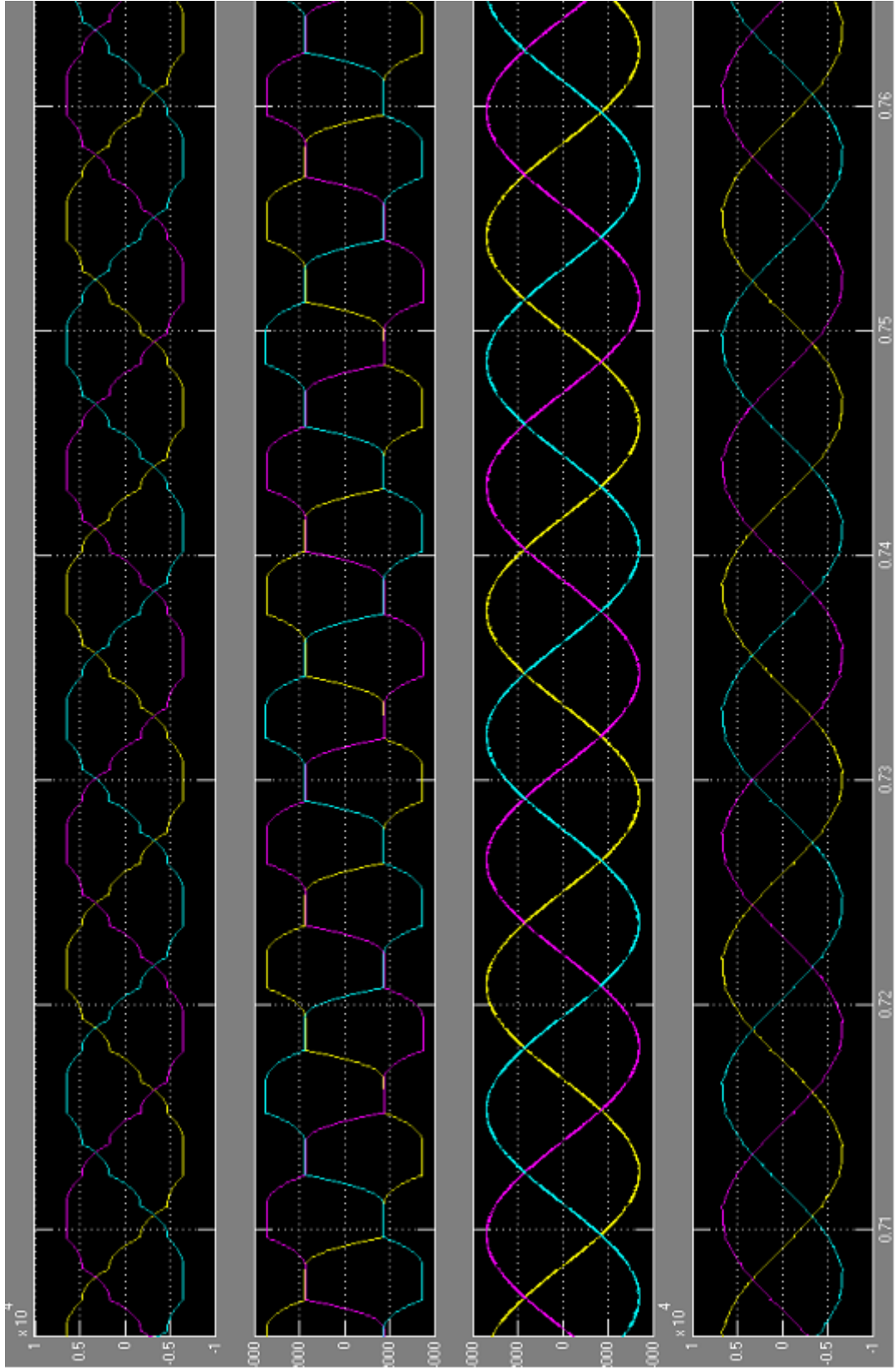
Şekil 8. 22 İlk yük devrede iken aktif filtre grafikleri



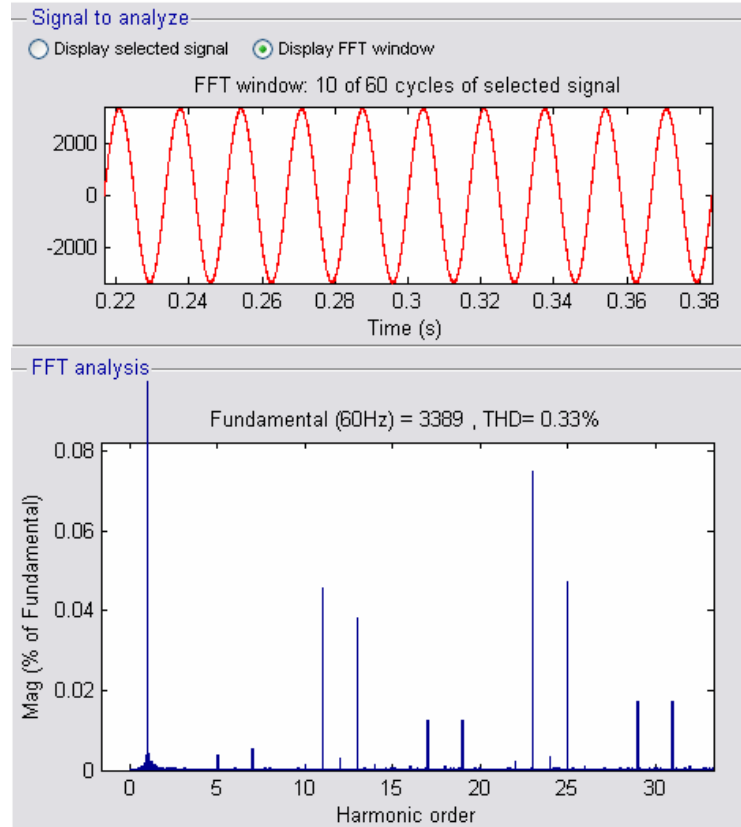
Şekil 8. 23 Aktif filtreli gerilim bozulması (ilk yük devrede)



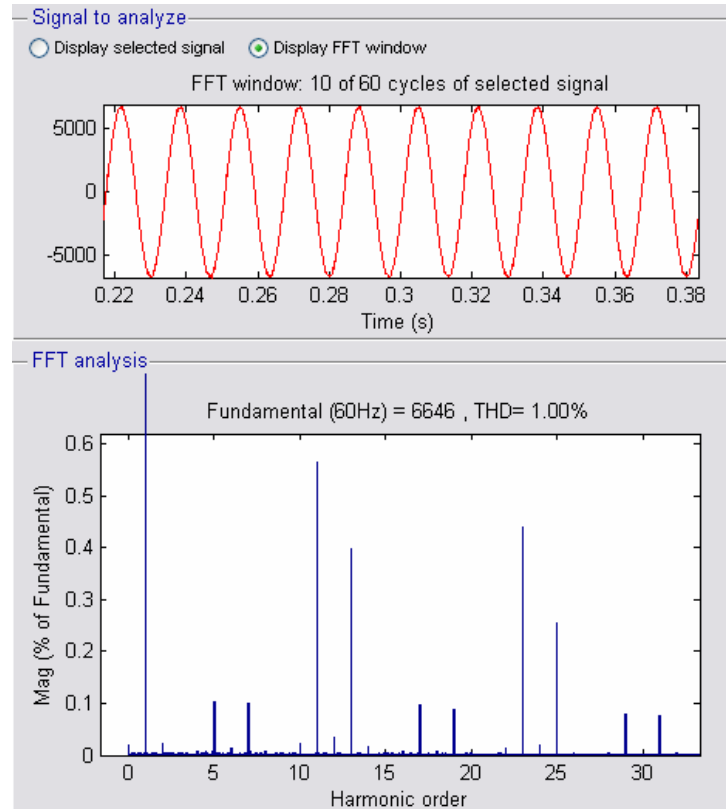
Şekil 8. 24 Aktif filtreli akım bozulması (ilk yük devrede)



Şekil 8. 25 ilave yük devrede iken aktif filtre grafikleri



Şekil 8. 26 Aktif filtreli gerilim harmonik bozulması (ilave yük ile)

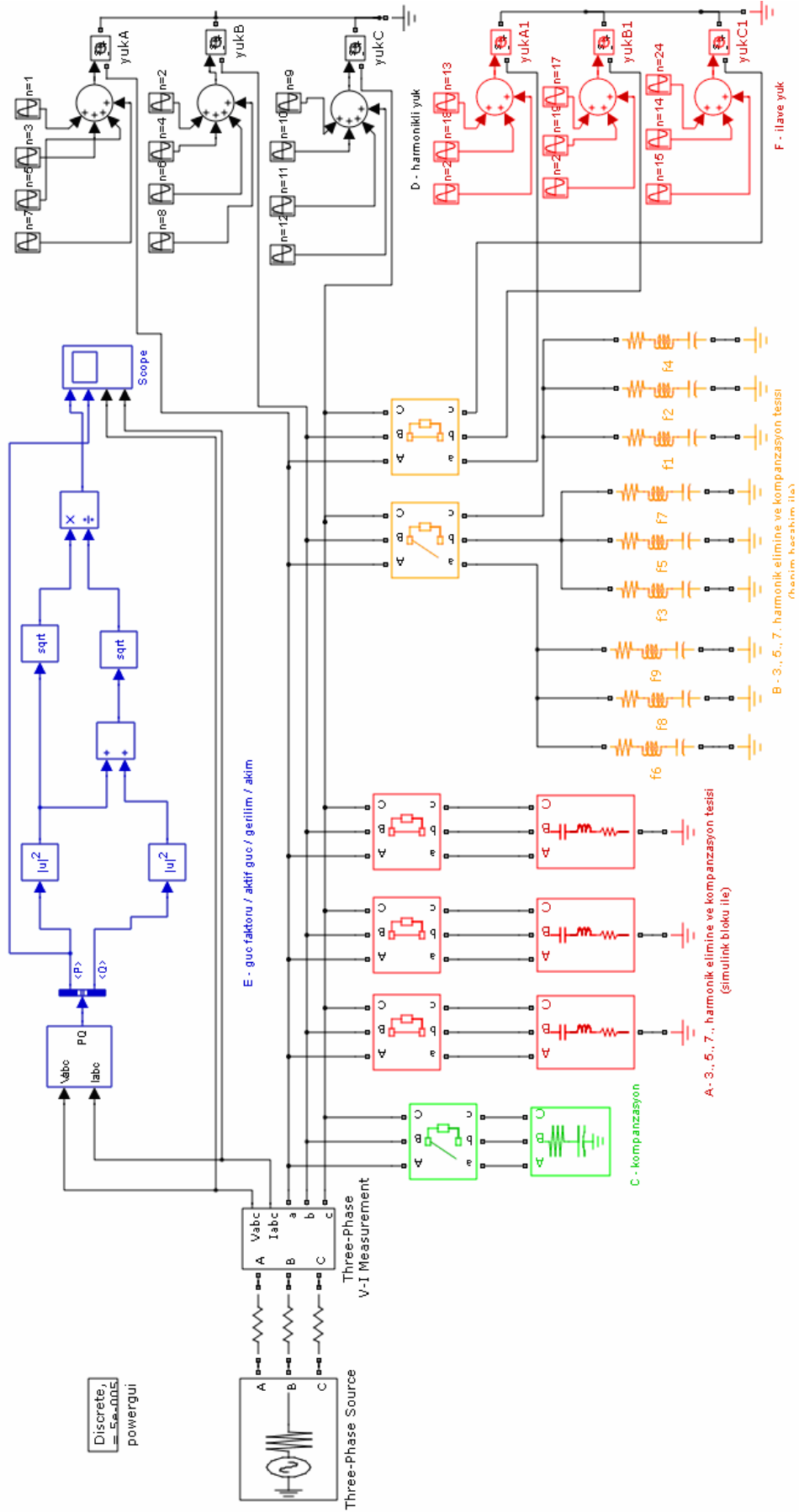


Şekil 8. 27 Aktif filtreli akım harmonik bozulması (ilave yük ile)

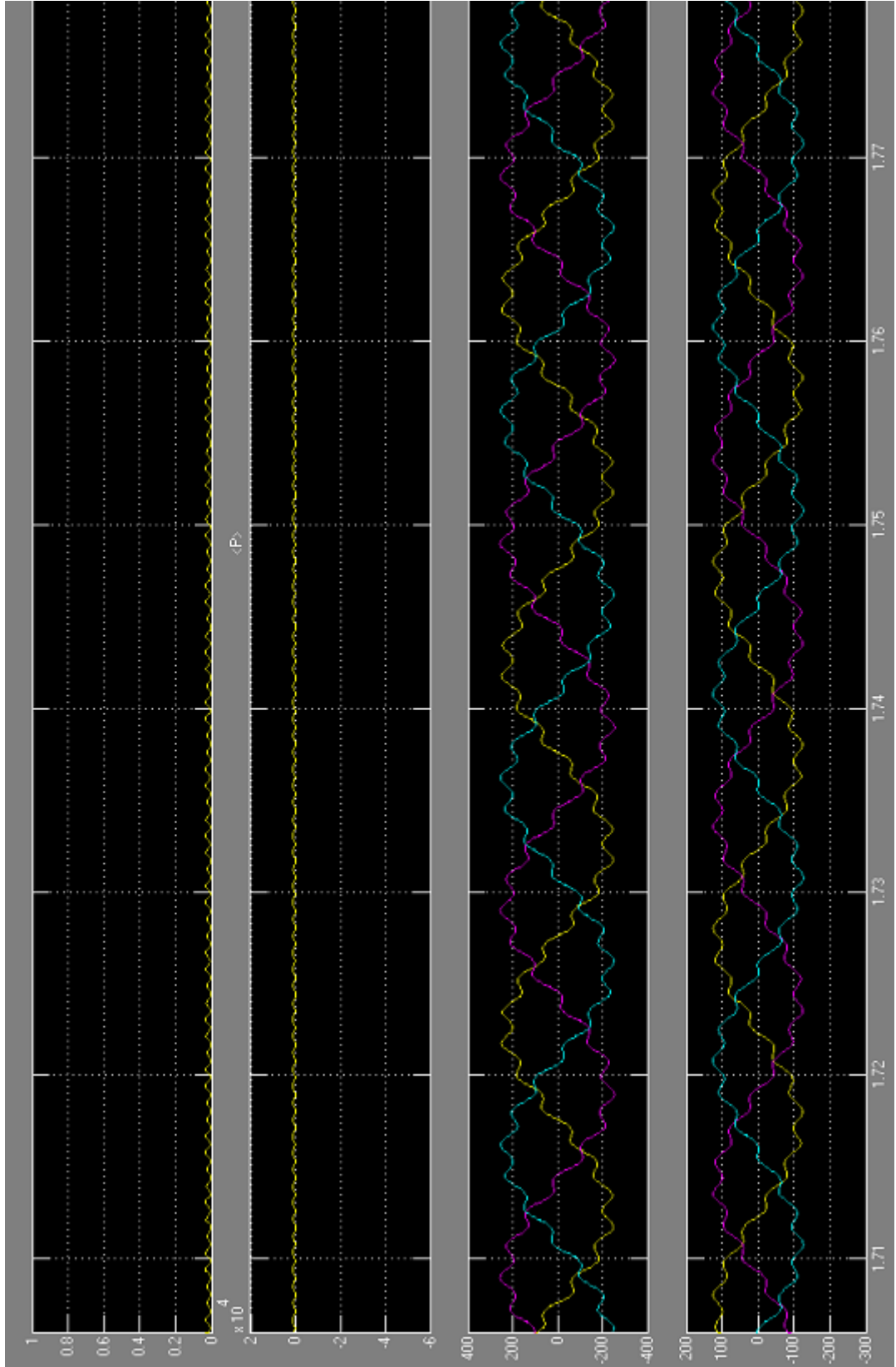
Aktif filtre benzetim ortamında sisteme ilave yüklerde bile çok başarılı olmuştur. Pasif filtrelerdeki yüke göre hesaplamalar aktif filtrelerde söz konusu olmadığı gibi daha sonrası için muhtemel ilave yüklenmelerde işlevini yerine getirmiştir.

Buna karşın kuruluş maliyeti olarak çok daha ucuz olan pasif filtreli tesislerde aynı durum söz konusu değildir. Sistemdeki mevcut yükün karakteristiğine göre hesaplamalar yapılmaktadır. Hesaplara göre uygun güç sistem devre elemanları değerleri seçimiyle filtre tasarlanır. İleride nasıl bir yükün sisteme ilavesi kestirilemeyeceği için ilerisi düşünülemez, birkaç yıl sonra sisteme ne çeşit yükler ilave edileceği bilinip buna göre işlem yapılırsa dahi hesaplamalar şimdiki yükün ihtiyacını ve talebini karşılayamayacak, harmonik bozulmaların önüne geçilemeyecek.

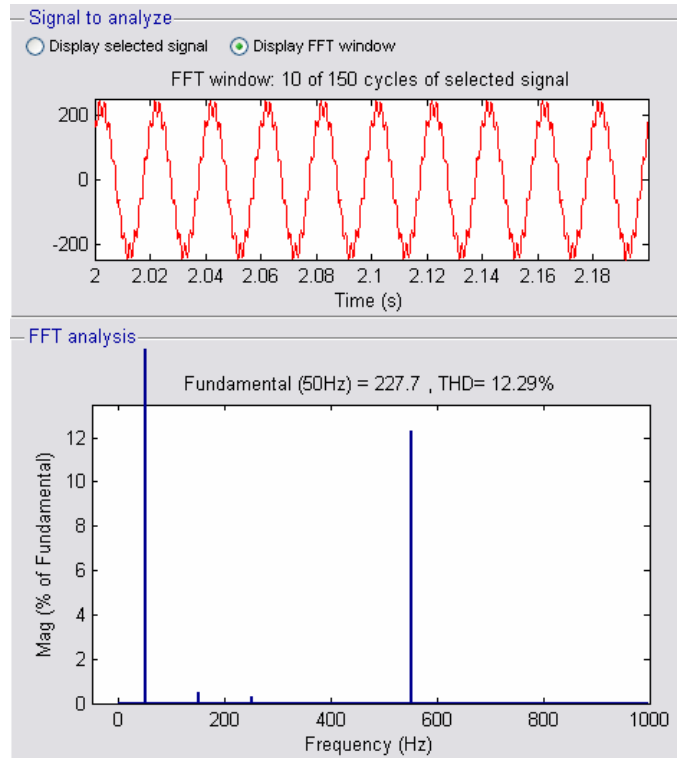
Belirli bir yüke göre hazırlanmış pasif bir filtrenin benzetim ortamında çalışmasını bu konu başlığı altında gözlemlemiştik. Aktif filtrenin sisteme ilave yüklerde bile harmonik bozulmalar konusundaki başarısını pasif filtrelerde de aramak için aşağıda Şekil 8.28'deki gibi ilave yüklü bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. İlave yük anahtar ile sisteme alınmıştır. Bu andan itibaren sistemde ölçülen güç faktörü, aktif güç, gerilim sinyali ve akım sinyali Şekil 8.29'da verilmiştir. Önceki yüke göre hazırlanan filtrelerin bu durum karşısındaki başarısızlığı Şekil 8.30 ve Şekil 8.31'de toplam harmonik distorsiyon değerleri ile izah edilmeye çalışılmıştır.



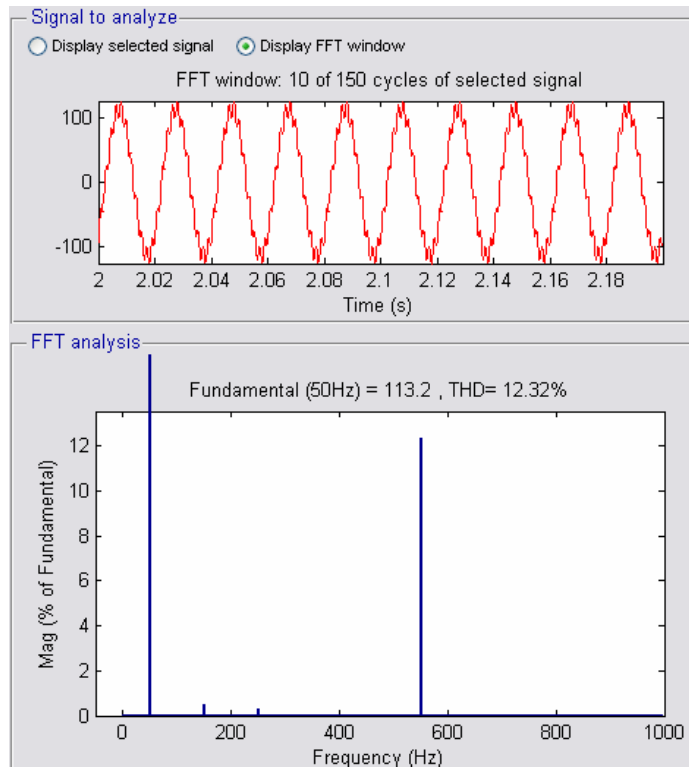
Şekil 8. 28 Pasif filtre ile harmonik eliminasyon



Şekil 8. 29 ilave yük devrede iken pasif filtre grafikleri



Şekil 8. 30 Pasif filtreli gerilim harmonik bozulması (ilave yük ile)



Şekil 8. 31 Pasif filtreli akım harmonik bozulması (ilave yük ile)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik enerji sistemleri kalite problemlerinin en önemlisi durumunda olan harmonikler bu tezde incelenmeye çalışılmıştır. Harmoniklerin nasıl meydana geldiği, harmonik üreten kaynakları, harmoniklerin zararlı etkileri, harmoniklerin nasıl giderilebileceği gibi temel konulardan detaylı olarak bahsedilmiştir. Benzetim ortamında, harmoniklerin neden olduğu kalite problemlerine, harmoniklerin nasıl giderilebileceğine, harmonikli sistemde güç faktörünün nasıl düzeltilebileceğine cevap verecek nitelikte harmonikli sistemler modellenmiştir. Oluşturulan bu modelde filtrelerin devreye alınıp alınmaması, kompanzasyon bataryalarının devreye alınıp alınmaması durumlarında ortaya çıkan grafikler detaylı olarak incelenmiştir.

Harmoniklerin eliminasyonu durumunda sistemin analizi çok önemlidir. Harmonik bileşenlerin yükten ötürü mü yoksa kaynaktan ötürü mü diye harmonik üreticini ilk olarak belirlemek gerekir. Harmonik bileşenler gerilim kaynağından ise transformatör bağlama gruplarına, üreticinin ve dönüştürücülerin kaliteli donanımına ve sargı yapısına, güç sistemlerinin en temel elemanlarının nominal değerlerinde kullanılmasına dikkat ederek kalite probleminden üstesinden gelinebilir. Harmonik bileşenler yükten dolayı oluşuyor ise bu bileşenlerin şebekeye akmasını önlemek gerekir. Bunun için uygun filtreleme yapılarak harmonik işaretler toprak mertebesine akıtılabilir. Böylece sistemlere zarar veren seri ve paralel rezonans durumlarının da önüne geçilmiş olur.

Bu tezde benzetim konu başlığında harmonikli yük, akım kaynaklarınca tasarlanırken, üretici sinusoidal olacak şekilde tercih edilmiştir; zira harmonik kalitesizliğinin olduğu

durumlara bakıldığında en genel olarak karşımıza sinusoidal kaynak ve nonlinear yük durumu çıkmaktadır.

Enerji sistemlerinde meydana gelen harmoniklerin yok edilmesi düşük maliyetli pasif filtreler veya yüksek maliyetli aktif filtreler ile yapılmaktadır, bu tezde düşük maliyetli pasif filtrasyona benzetim ortamında pasif filtreler kullanarak yer verilmiştir. Filtreler hakkında detaylı bilgiler verilirken bilgisayar programında harmonik sinyallerin yok edilmesinde tek ayarlı paralel pasif filtreler kullanılmıştır. Kullanılan filtrelerin içinde bulundurduğu pasif elemanların değerleri iki yöntemle belirlenmiştir; bunlardan ilki simulink programının sahip olduğu filtre bloku ile diğeri ise harmonik sinyallerin rezonans anına denk getiren devre elemanlarının değerlerini hesap ile belirleyerek yapılmıştır. Harmonik sinyallerinin makul değerlere pasif filtrelerce indirilmesinden sonra enerji kalitesinin diğeri bir parametresi olan güç faktörünün düzeltilmesi yapılmıştır. Bunun için ise yüke ve harmonik filtrelere paralel kompanzasyon tesisi tasarlanmıştır. Kompanzasyon tesisinin de devreye alınması ile güç faktörü değeri istenilen seviyelere ulaştırılmıştır.

Böylece kalitesizliğe sebep olan harmonik bileşenler doğru hesaplama ile filtreler tasarlayarak yok edilmiş, ardından yükün çekmiş olduğu akım sinyalinin gerilim sinyaline çok yakın fazda çekmesi sağlanmıştır. Neticede gerilim ve akım işaretlerimiz olması gereken forma ulaştırılmış, elektrik enerjisinde kalitesizlik ortadan kaldırılmıştır.

Bunun yanında, kurulum maliyeti uygun olan pasif filtreler ile kurulum maliyeti pahalı olan aktif filtrelerin sisteme alınan ilave yüklerdeki işlevleri benzetim ortamında incelenmiştir. Aktif filtreli enerji sisteminde ilave yüklerin şebekeden çekilen akımın sinusoidal formunu bozmadığı görülmüştür; buna karşın pasif filtreli enerji sisteminde ilave yüklerin şebekeden çekilen akımın sinusoidal formunu bozduğu tespit edilmiştir, pasif filtreler sonradan eklenen yüklerin oluşturduğu harmonik bileşenleri gidermede başarısız kalmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe, C. vd, (2003), “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi.
- [2] Evans, I., (2007), “American Bureau of Shipping Guidance Notes for Control of Harmonics in Electrical Power Systems.”
- [3] Kavak, M., (2009). Harmonik Devrelerde Güç Katsayısının Düzeltilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Dugan, R., C., Mcgranaghan M., F., Beaty H., W., (1996). “Electrical Power Systems Quality 2nd ed.”, McGraw-Hill Comp., New York, 3-19.
- [5] Acarkan, B., (1999). Enerji Dağıtım Sistemlerin Bilgisayar Destekli İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri, Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Buso, S., Malesani, L., Mattavelli, P. and Veronese, R., (1998). “Design and Fully Digital Control of Parallel Active Filters for Thyristor Rectifiers to Comply with IEC – 1000-3-2 Standarts”, IEEE Transactions on Industry Applications.
- [7] Jintakosonwit, P., Fujika, H., and Akagi, H., (2002). “Control and Performance of a Fully Digital Controlled Shunt Active Filter for Installation on a Power Distribution System”, IEEE Transactions on Industry Applications.
- [8] Sucu, M., (2003), Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [9] Akagi, H., (1997). “New Trends in Active Filters for Improving Power Quality”, IEEE Department of Electrical Engineering, Okayama, 417-425.
- [10] Arrilaga, J., B., (1985), Power System Harmonic.
- [11] Ghausi, M., (1984). “Analog Active Filters”, IEEE Transactions on Circuits and System, 13-31.
- [12] Copper Development Association, Harmonics 3.2.2, (2001)
- [13] Özcan, İ.C., (2006). Endüstriyel Tesislerde Harmonik Sorunları ve Çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [14] Wagner V. E., (1993). “Effects of Harmonics on Equipment”, IEEE Transactions on Power Delivery.
- [15] Matlab, <http://www.mathworks.com> ,24.03.2011.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet AKYEL
Doğum Tarihi ve Yeri : 05/01/1985 Samsun
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : akyelahmet55@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Tesisleri	YTÜ	2011
Lisans	Elektrik Müh.	YTÜ	2009
Lise	FEN bilimleri	Samsun Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	Samsung Electronics	T.Service Engineer