

DİNAMİK REAKTİF GÜÇ DENETLEYİCİSİ TASARIMI

Abdullah ÖZSAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık2013

ANKARA

Abdullah ÖZSAN tarafından hazırlanan DİNAMİK REAKTİF GÜÇ
DENETLEYİCİSİ TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun
olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İbrahim SEFA
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güngör BAL
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. İbrahim SEFA
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Hamit ERDEM
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, B.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 05 / 12 / 2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini
onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Abdullah ÖZSAN

DİNAMİK REAKTİF GÜÇ DENETLEYİCİSİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah ÖZSAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2013

ÖZET

Elektrik enerjisine talebin artması ile enerji temininde ve arzındaki güçlükler beraberinde enerji maliyetlerini arttırmıştır. Bu durumların tesirinde enerjinin verimli kullanımı önem kazanmıştır. Enerjinin verimli kullanılması, kayıpların azaltılması ve enerji sisteminin kararlılığının artması ile temin edilebilmektedir. Özellikle enerji kullanımının fazla olduğu sanayi tesislerinde kayıpların azaltılması ve enerjinin optimum kullanımı için reaktif güç kompanzasyonu yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Günümüzde kullanılan reaktif güç kompanzasyon sistemleri hızlı devreye girip çıkan yüklerin kompanzasyonu için yetersiz kalmaktadır. Bu durum tüketicilerin ceza ödemelerine ve enerji maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Dinamik reaktif güç kompanzasyon sistemleri ile güç sistemlerinin reaktif güç kompanzasyonu hassas ve hızlı yapılabilmektedir. Bu çalışmada üç fazlı sistemin akım ve gerilimini kısa bir sürede ölçebilen ve gerekli olan reaktif gücü hesaplayabilen reaktif güç kontrol rölesi tasarlanmıştır. Reaktif güç kontrol rölesinin kademeleri hem kapasitif hem de endüktif olarak üç fazlı veya bir fazlı olarak bağlanabilmektedir. Bu çalışmada ayrıca gerekli kondansatör kademelerini hızlı devreye alabilecek tristör anahtarlama üniteleri tasarlanmıştır. Bu üniteler akımın sıfır geçiş noktalarında tetiklenerek kondansatörlerin devreye girmesi anında inrush akımlarının çekilmesine ve gerilim dalgalanmalarının önüne geçebilmektedir.

Önerilen sistem ile hızlı devreye girip çıkabilen yüklerin kompanzasyonunun yanında, dengesiz yüklerin kompanze edilmesine olanak sağlamıştır.

Bilim Kodu : 703.3.012
Anahtar Kelimeler : Reaktif Güç, Hızlı Yük, Dinamik Reaktif Kompanzasyon
Sayfa Adedi : 96
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İbrahim SEFA

DESIGN OF DYNAMIC REACTIVE POWER CONTROLLER**(M. Sc. Thesis)****Abdullah ÖZSAN****GAZİ UNIVERSITY****GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES****December 2013****ABSTRACT**

With the increasing demand for electrical energy and difficulties in energy supply and generation increases the energy costs. In this case, the effect of the efficient use of energy has gained importance. Efficient use of energy may be provided by decreasing energy losses and increasing the stability of the system. In particular, reactive power compensation for optimum utilization of energy has emerged to materialize for the reduction of losses and providing optimum utilization of energy in industrial facilities which use high amount of energy. Reactive power compensation systems in use today are insufficient in compensation of the quickly switched on and off loads. This situation causes to pay the penalty and has led to an increase in energy costs. Reactive power compensation of power systems can be made precise and fast with dynamic reactive power compensation system. In this study, of the reactive power controller which can measure the current and voltage of three-phase system in a short time and calculate the necessary reactive power is designed. The proposed reactive power control relay scan control three-phase or single-phase, capacitive or inductive compensation groups. In addition, thyristor controlled unit is also designed to switch on and off the compensation groups in a short time. Since this unit is triggered on the zero crossing of the current, inrush currents and voltage fluctuations are prevented. So, proposed system provides compensation of the unbalanced loads beside the dynamic loads.

Science Code : 703.3.012
Key Words : Reactive Power, Rapid Load, Dynamic Reactive Compensation
Page Number : 96
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İbrahim SEFA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Doç. Dr. İbrahim SEFA'ya değerli görüş ve önerileriyle çalışmaya katkılar sağlayan kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Necmi ALTIN'a, Öğr. Gör. Dr. Şaban ÖZDEMİR'e ve Selami BALCI'ya katkılarından dolayı sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarına 00489.STZ.2009-2 kodlu San-Tez projesi ile destek sağlayan Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Bilim ve Teknoloji Müdürlüğüne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ FAZLI SİSTEMDE GÜÇ EŞİTLİKLERİ	4
2.1. Üç Fazlı Dengeli Sistem	4
2.2. Üç Fazlı Dengesiz Sistem	5
3. HARMONİKLER	10
3.1. Ayırık Zamanlı Fourier Dönüşümü	11
3.2. Hızlı Fourier Dönüşümü	14
3.3. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)	17
3.4. Toplam Talep Distorsiyonu (TDD)	18
3.5. Şekil Faktörü	19
3.6. Tepe (Crest) Faktörü	19
3.7. Harmonik Standartları	19

Sayfa

3.8. Harmoniklerin Elimine Edilmesi.....	24
3.8.1. Pasif filtreler	24
Seri pasif filtreler	25
Paralel pasif filtreler	26
<i>Tek ayarlı (bant geçiren) filtre</i>	28
<i>Çift ayarlı filtre</i>	29
<i>Sönümlü filtre</i>	30
3.8.2. Aktif güç filtreleri	32
Seri bağlı aktif güç filtresi.....	36
Paralel bağlı aktif güç filtresi	37
3.8.3. Aktif ve pasif filtrelerin birlikte bağlanması	38
4. KOMPANZASYON	42
4.1. Şebeke Tipine Göre Güç Kompanzasyonu	44
4.1.1. Orta gerilimde kompanzasyon.....	44
4.1.2. Alçak gerilimde kompanzasyon.....	45
4.2. Güç Sistemlerinde Kompanzasyon Yöntemleri	46
4.2.1. Bireysel kompanzasyon.....	46
4.2.2. Grup kompanzasyonu.....	47
4.2.3. Merkezi kompanzasyon.....	47
4.3. Güç Kompanzasyonunda Klasik Uygulama Yöntemleri.....	48
4.3.1. Senkron motorlar	48
4.3.2. Kondansatör gruplarının kontaktörlerle anahtarlanması.....	49

Sayfa

4.4. Güç Kompanzasyonunda Modern Yöntemler.....	50
4.4.1. Statik VAR kompenzatorü (SVC)	52
Tristör anahtarlamaalı kapasitör.....	53
4.5. Kompanzasyon Sistemlerinde Rezonans Problemi ve Harmonik Filtre Reaktörleri.....	55
4.6. Reaktif Güç Kontrol Röleleri	57
5. DİNAMİK REAKTİFGÜÇ KOMPANZASYONÜNİTESİ TASARIMI	61
5.1. Tristör Modüllerin Tasarlanması ve Prototip Üretimi	62
5.2. Reaktif Güç Ünitesinin Donanım Ve Yazılımının Tasarlanması.....	70
5.3. Kompanzasyon Ünitesi İle Bilgisayar Arasında Veri Alış Verişi.....	79
5.4. Dinamik Reaktif Güç Kompanzasyon Ünitesinin Test Edilmesi.....	80
6. SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	21
Çizelge 3.2. Gerilim harmonikleri için sınır değerler.....	22
Çizelge 3.3. Akım harmonikleri için maksimum yük akımına göre sınır değerler.	22
Çizelge 3.4. EPDK tarafından belirlenen akım harmoniği limitleri.	23

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Discrete fourier dönüşümü ile örneklenen dalga formları.....	13
Şekil 3.2. N=8 için W değerleri.....	16
Şekil 3.3. FFT ve DFT örneklemelerinde çarpma sayısının karşılaştırılması.....	17
Şekil 3.4. Seri pasif filtre.....	26
Şekil 3.5. Paralel pasif filtre.....	27
Şekil 3.6. Tek ayarlı (bant geçiren) filtre ve empedans değişimi.....	28
Şekil 3.7. Çift ayarlı filtre ve empedans değişimi.....	30
Şekil 3.8. Sönümlü filtreler a) birinci derece b) ikinci derece c) üçüncü derece d) C tip.....	32
Şekil 3.9. Seri aktif güç filtresi.....	37
Şekil 3.10. Paralel aktif güç filtresi.....	38
Şekil 3.11. Paralel bağlı aktif ve pasif güç filtresi.....	39
Şekil 3.12. Seri bağlı aktif filtre ile paralel bağlı pasif güç filtresi.....	40
Şekil 3.13. Paralel bağlı pasif filtreye seri bağlı aktif güç filtresi.....	40
Şekil 4.1. Tristör anahtarlamalı kondansatöre ait.....	54
Şekil 4.2. Seri reaktörlü tristör anahtarlamalı kondansatör sistemi.....	55
Şekil 5.1. Tasarlanan sıfır geçiş ve tristör sürme devresi ile güç modülleri.....	65
Şekil 5.2. Mikrodenetleyici için hazırlanan programın akış diyagramı.....	66
Şekil 5.3. 12,5 kVAR, %7 detuned kompanzasyon grubunun kontaktör ile devreye alınması.....	67
Şekil 5.4. 12,5 kVAR, %7 detuned kompanzasyon grubunun geliştirilen güç modülü kullanılarak devreye alınması.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. 12,5kVAR gücünde %7 detuned kompanzasyon grubunun kontaktör ile devreden çıkartılması.....	69
Şekil 5.6. 12,5kVAR gücünde %7 detuned kompanzasyon grubunun geliştirilen güç modülü kullanılarak devreden çıkartılması.....	69
Şekil 5.7. İki işlemcili devre yapısı.....	72
Şekil 5.8. Hioki 3196 ile ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri.....	74
Şekil 5.9. HIOKI 3196 ile ölçülen THD ve güç faktörü güç değerleri.....	75
Şekil 5.10. HIOKI 3196 ile ölçülen aktif güç ve akım değerleri.....	76
Şekil 5.11. Labview yazılımı.....	77
Şekil 5.12. Labview yazılımı.....	78
Şekil 5.13. Labview yazılımı.....	78
Şekil 5.14. Labview yazılımı.....	79
Şekil 5.15. Reaktif güç kontrol ünitesinin bilgisayar arayüzü.	80
Şekil 5.16. Geliştirilen tristörlü reaktif güç kontrol ünitesi.....	84
Şekil 5.17. Kondansatörün devreye alınması.	85
Şekil 5.18. Kondansatörün devreden çıkartılması.	85
Şekil 5.19. Harmonik reaktörlü kompanzasyon grubunun devreye alınması.....	86
Şekil 5.20. Harmonik reaktörlü kompanzasyon grubunun devreden çıkarılması.	86
Şekil 5.21. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.....	88
Şekil 5.22. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.....	89
Şekil 5.23. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.....	89
Şekil 5.24. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.....	90
Şekil 5.25. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Tasarlanan tristör modüllerin güç devresi	63
Resim 5.2. Tasarlanan sıfır geçiş ve tristör sürme devresi kartı.....	67
Resim 5.3. HIOKI 3196 ölçüm sistemi.....	73
Resim 5.4. Tasarlanan sistem ile ölçülen	73
Resim 5.5. Tasarlanan sistem ile ölçülen	74
Resim 5.6. Tasarlanan sistem ile ölçülen harmonik bozunumu	75
Resim 5.7. Tasarlanan sistem ile ölçülen	76
Resim 5.8. Tristör modüllü kompanzasyon panosu, Reaktif ve Omik yük grubu.	82
Resim 5.9. Tasarlanan sistemin test düzeneği.....	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
f	Fonksiyon
$i_{(t)}$	Akımın ani değeri (Amper)
k_f	Şekil faktörü
$v_{(t)}$	Gerilimin ani değeri (Volt)
$\parallel p$	Anlık ani aktif güç (Watt)
C	Kondansatör değeri (Farad)
HD_I	Akım harmonik bozulumu
HD_V	Gerilim harmonik bozulumu
I	Akımın etkin değeri (Amper)
I_{TDD}	Akım toplam talep bozulumu
L	Bobin değeri (Henry)
P	Aktif güç (Watt)
P^+	Pozitif dizili aktif güç (Watt)
P^-	Negatif dizili güç (Watt)
P^0	Sıfır dizili güç (Watt)
P_{FA}	Aritmetik güç faktörü
P_{FV}	Vektörel güç faktörü
PF	Güç faktörü
Q	Reaktif güç (VAr)
Q^+	Pozitif dizili reaktif güç (VAr)
Q^-	Negatif dizili reaktif güç (VAr)
Q^0	Sıfır dizili reaktif güç (VAr)
R	Direnç (Ohm)
S	Görünür Güç (VA)

Simgeler	Açıklama
S^+	Pozitif dizili görünür güç(VA)
S^-	Negatif dizili görünür güç(VA)
S^0	Sıfır dizili görünür güç(VA)
S_V	Vektörel görünür güç(VA)
THD_I	Akım toplam harmonik bozulumu
THD_V	Gerilim toplam harmonik bozulumu
V_{ll}	Faz-faz gerilimi (Volt)
V_{ln}	Faz-nötr gerilimi (Volt)
V	Etkin gerilim (Volt)
X_L	Bobin reaktansı (Ohm)
X_C	Kondansatör reaktansı (Ohm)
Z	Empedans değeri(Ohm)
θ	Faz açısı (Radyan)
α	Gerilimin faz açısı (Radyan)
β	Akımın faz açısı (Radyan)
$\cos\theta$	Faz açısının kosinüsü
$\sin\theta$	Faz açısının sinüsü

Kısaltmalar	Açıklama
CIGRE	Uluslararası Elektrik Sistemleri Konseyi
DFT	Discrete Fourier Dönüşümü
EPRI	Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü
FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
SCR	Tristör
GTO	Kapıdan Kapanabilir Anahtar
HD	Harmonik Bozulumu
HES	Hidroelektrik Enerji Santrali
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

Kısaltmalar	Açıklama
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IGBT	Kapıdan Yalıtımlı Bipolar Transistör
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
STATCOM	Statik Kompenzatör
SVC	Statik Gerilim Kontrolörü
TCC	Tristör Kontrollü Kapasitör
TCR	Tristör Kontrollü Reaktör
TCSC	Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
TCVP	Tristör Kontrollü Faz Değiştirici
TDD	Toplam Talep Bozulumu
THD	Toplam Harmonik Bozunumu
TSC	Tristör Anahtarlama Kapasitör
TSR	Tristör Anahtarlama Reaktör
THD	Toplam Harmonik Bozunumu
UPFC	Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin ve teknolojik gelişmelerin çok hızlı seyrettiği günümüzde bu alanlarda kullanılan elektrik enerjisine olan gereksinimde aynı oranda artmaktadır. Bu gereksinimi karşılamak için yeni enerji üretim tesisi (HES, rüzgâr enerjisi vb.) yatırımı yapmak hem çok maliyetli hem de zaman gereksinimi nedeniyle ihtiyaca hemen karşılık veremeyecektir. Bu nedenle üretilen enerjiyi maksimum verimle kullanmaya yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Ülkemizde binalarda %30, sanayi sektöründe %20 ve ulaşım sektöründe %15 olmak üzere önemli düzeyde enerji tasarruf potansiyeli olduğu tespit edilmiştir [1]. 2007 yılında Enerji Verimliliği, kanunu çıkarılmış, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2008 yılında “Enerji Kaynaklarının ve Enerji Kullanımında Verimliliğin Arttırılmasına Dair” yönetmelik çıkartılmıştır. Bu yönetmelikler ile enerjinin verimli kullanılması teşvik edilmiştir.

Özellikle sanayide ve son zamanlarda da evlerde kullanılan cihazlar şebekeden aktif enerjinin yanında reaktif enerji de çekmektedir. Reaktif enerji “elektromanyetizma” prensibine göre çalışan generatör, transformatör, motor gibi bütün işletme araçların çalışmaları için gerekli manyetik alanı meydana getirebilmek için çektikleri enerjidir. Reaktif enerji, manyetik alanın meydana getirilmesi için şebekeden çekilir ve sonra şebekeye geri gönderilir. Bu nedenle reaktif enerji aktif iş yapmadığı gibi şebekeyi gereksiz şekilde yükler, tesislerin kapasitesinde çalışamamasına ve verimlerinin düşmesine neden olur [2].Reaktif enerjinin iletim ve dağıtım hatlarında gereksiz yüklenmelere sebep olmaması için tüketicinin ihtiyaç duyduğu reaktif enerjiyi kendisinin karşılaması ve tedbirlerini alması istenmektedir. Bu amaçla kurulan sistemlere “Kompanzasyon Sistemleri” denilir. Farklı araçlar ile kompanzasyon işlemi gerçekleştirilebilse de birçok avantajı nedeniyle kondansatörler en çok tercih edilen reaktif dengeleme elemanıdır. İhtiyaç duyulan reaktif enerjinin karşılanması için kondansatörler belirli bir program çerçevesinde devreye alınır ve çıkarılırlar.

9 Ocak 2007’de Resmi Gazetede yayımlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”

ile 1 Ocak 2008 tarihinden itibaren sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin aktif enerjiye oranı %20'yi, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise %15'i geçemez şartını getirmiştir. Şebekeden çekilebilecek reaktif enerji sınırlamalarında yapılan bu kısıtlama mevcut kompanzasyon sistemlerin pek çoğunda revizyon ve/veya iyileştirme yapılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Hatta özellikle ark kaynak makineleri, asansörler, rüzgar türbinleri gibi dinamik yüklerin bulunduğu uygulamalarda var olan reaktif güç kontrol röleleri ve kontaktörler bu şartları sağlamakta yetersiz kalmış ve yeni arayışlar araştırılmıştır. Dinamik yüklerin kompanzasyonu için klasik yöntemler yerine modern yöntemler düşünülmüş ve bu yüklerin dinamik tepkilerine aynı şekilde cevap verebilecek hızlı reaktif dengeleme sistemlerinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu duruma ek olarak güç sistemlerinde tek problemin reaktif güç talebinden dolayı meydana gelen kayıp ve kararsızlıklar olmadığı tespit edilmiştir. Özellikle yarıiletken anahtarların kullanıldığı kontrollü tip doğrultucu, evirici gibi yapıları içeren cihazların kullanımının artması şebekede harmonik olarak adlandırdığımız bozulmalara sebebiyet vermektedir. Harmonikler mevcut güç sisteminde aşırı yüklenmelere, gerilim kararsızlığına, gereksiz kayıplara ve benzeri birçok olumsuz etkiye neden olurken, reaktif güç çekilen sistemleri daha olumsuz etkileyebilmektedir. Zira harmoniklerin olduğu güç sisteminde çekilen reaktif akımının harmonik bileşenleri de bulunacaktır. Klasik kompanzasyon sistemlerinde olduğu gibi sadece kondansatörlerin mevcut olduğu bir kompanzasyon sistemi harmoniklerin bulunduğu güç sisteminde tam kompanzasyon işlemi yapamayacaktır. Bu nedenle, kullanımı giderek yaygınlaşan elektronik sayaçların harmonikli akım ve gerilimleri okuyabildiği göz önüne alınırsa, harmonikli bir güç sisteminde klasik yöntemlerle yapılan kompanzasyonun yetersiz geleceği ve bunun neticesinde tüketicinin cezai ödemeler yapabileceği sonucunu doğurabilecektir. Ayrıca harmonikli bir güç sisteminde klasik yöntemlerle yapılan bir kompanzasyonda, güç sisteminin şebeke ile rezonansa girebileceği ve neticesinde büyük tahriplere neden olabileceği mümkündür. Harmonikler sadece kondansatörlerden oluşan kompanzasyon sistemine de etkileyecek olup, kondansatörlerin delinmelerine, anahtarlama elemanlarının sık arıza yapmasına ve benzeri diğer sonuçlara doğrudan tesir edecektir. Bu sebeplerden ötürü özellikle

dinamik yüklerin ve harmoniklerin mevcut olduğu güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu daha da önem arz etmektedir.

Bu çalışma ile hem dinamik kompanzasyon yapabilecek ve hem de yukarıda sayılan eksikliklere cevap verebilecek nitelikte bir reaktif güç kontrol rölesi ile tristör sürücüsü, tristör, soğutucu bloğundan oluşan kompanzasyon ünitesinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tasarım iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada yükün çektiği akımları ve şebeke gerilimini okuyarak yükün reaktif güç talebini hesaplayacak ve buna uygun olarak gerekli olan kondansatör gruplarının devreye alınması için sinyali üretecek olan reaktif güç kontrol ünitesi tasarlanmıştır. Reaktif güç kontrol ünitesinin tasarımında 32 bit kayan noktalı sayısal sinyal işleyici (DSP) kullanılmıştır. Röle, yükün her bir fazı için akım, gerilim, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri, toplam güçler ve çekilen akımın toplam harmonik miktarı (THD) gibi temel elektriksel büyüklükleri ekranında gösterebilmektedir. Buna ek olarak kompanzasyon sistemi için gerekli tetikleme sinyallerini de üretebilmektedir. Ayrıca hazırlanan bir program yardımıyla bilgisayar ile röle arasında sağlanacak haberleşme ve verilerin bilgisayarda izlenmesi ve kayıt yapılabilmesi mümkün olabilmektedir. İkinci aşamada ise kondansatör gruplarını hızlı biçimde devreye alacak olan tristör modülleri tasarlanmıştır. Mikrodenetleyici tabanlı geliştirilen bu modüller ile röleden tetikleme sinyali geldiğinde en fazla 10 milisaniye gecikme ile kondansatörleri devreye alınabilmektedir. Kondansatörler devreye alınırken büyük inrush akımlarının çekilmemesi için şebekenin sıfır geçişleri takip edilmekte ve kompanzasyon grupları sıfır geçiş anlarında devreye alınmaktadır. Tristör modülleri hem kondansatörlü hem de harmonikli sistemlerin kompanzasyonunda kullanılan harmonik reaktörlü kompanzasyon sistemlerinde kullanılabilecek yapıda gerçekleştirilmiştir.

2. ÜÇ FAZLI SİSTEMDE GÜÇ EŞİTLİKLERİ

Üç fazlı sistemlerde güç hesaplamaları, yüklerin çeşitliğinin artması, yarıiletken anahtarların kullanıldığı elektrik motor sürücüleri, kontrollü doğrultucular, ark kaynakları, elektronik balastlı lambalar gibi yüklerin kullanımının artması ve güç sistemine bağlanacak yüklerin fazlara eşit dağılımının yapılmaması gibi nedenlerden dolayı değişmektedir. Bu belirtilen faktörler göz önüne alınarak güç hesaplamaları uluslar arası standartlar çerçevesinde aşağıda belirtilen hesaplamalarla yapılabilir.

2.1. Üç Fazlı Dengeli Sistem

Üç fazlı dengeli sistemde elektriksel güç IEEE 1459-2000 standardında şu şekilde tanımlanmıştır [3]:

$$v_a = \sqrt{2}V_{ln} \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_{ln} \sin(\omega t - 120^\circ), \quad (2.2)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_{ln} \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (2.3)$$

$$i_a = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta), \quad (2.4)$$

$$i_b = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta - 120^\circ), \quad (2.5)$$

$$i_c = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta + 120^\circ), \quad (2.6)$$

Buna göre dengeli üç fazlı sistemde anlık güç;

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = P, \quad (2.7)$$

ve aktif güç;

$$\|P\| = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p \, dt, \quad (2.8)$$

$$P = 3 V_{ln} I \cos\theta = \sqrt{3} V_{ll} I \cos\theta, \quad (2.9)$$

ile ifade edilebilir. Burada; V_{ln} = Faz Nötr Gerilimi, V_{ll} = Faz-Faz Gerilimini göstermektedir. Yine üç fazlı dengeli sistem için reaktif güç ve görünür güç Eş. 2.10-2.12 ile elde edilebilir:

$$Q = 3 V_{ln} I \sin\theta = \sqrt{3} V_{ll} I \sin\theta, \quad (2.10)$$

$$|Q| = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (2.11)$$

$$\|S\| = 3 V_{ln} I = \sqrt{3} V_{ll} I, \quad (2.12)$$

Bu sistem için güç faktörü ise Eş. 2.13’de tanımlanmıştır:

$$\|PF\| = \frac{P}{S}, \quad (2.13)$$

2.2. Üç Fazlı Dengesiz Sistem

Üç fazlı dengesiz sistem için güç hesabı dengeli sisteme göre bazı farklılıklar içermektedir. Üç fazlı dengesiz sistemin faz-nötr gerilimleri ve faz akımları için Eş. 2.14-2.19 ile yazılabilir.

$$v_a = \sqrt{2} V_{aln} \sin(\omega t + \alpha_a), \quad (2.14)$$

$$v_b = \sqrt{2} V_{bln} \sin(\omega t + \alpha_b - 120^\circ), \quad (2.15)$$

$$v_c = \sqrt{2} V_{cln} \sin(\omega t + \alpha_c + 120^\circ), \quad (2.16)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t - \beta_a), \quad (2.17)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t - \beta_b - 120^\circ), \quad (2.18)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t - \beta_c + 120^\circ), \quad (2.19)$$

Buna göre üç fazlı dengesiz sistem için anlık güç aşağıda verilmiştir:

$$\| p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c, \quad (2.20)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (2.21)$$

$$\| p = v_{ab} i_a + v_{cb} i_c = v_{ac} i_a + v_{bc} i_b = v_{ba} i_b + v_{ca} i_c, \quad (2.22)$$

v_{ab} , v_{bc} ve v_{ca} faz-faz arası ani gerilimlerdir.

Bu sistem için aktif güç ise Eş. 2.23-2.30 ile bulunabilir:

$$\| P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau + kT} p \, dt, \quad (2.23)$$

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (2.24)$$

$$P_a = \frac{1}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + kT} v_a i_a \, dt = V_{aln} I_a \cos \theta_a, \quad (2.25)$$

$$\theta_a = \alpha_a + \beta_a, \quad (2.26)$$

$$P_b = \frac{1}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + kT} v_b i_b \, dt = V_{bln} I_b \cos \theta_b, \quad (2.27)$$

$$\theta_b = \alpha_b + \beta_b, \quad (2.28)$$

$$P_c = \frac{1}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + Kt} v_c i_c dt = V_{c\ln} I_c \cos \theta_c, \quad (2.29)$$

$$\theta_c = \alpha_c + \beta_c, \quad (2.30)$$

Burada P_a , P_b ve P_c fazların aktif güçleridir. Sistemin Pozitif, Negatif ve Sıfır dizili aktif güçleri Eş. 2.31-2.34'da verilmiştir.

$$P^+ = 3 V_{ln}^+ I^+ \cos \theta^+, \quad (2.31)$$

$$P^- = 3 V_{ln}^- I^- \cos \theta^-, \quad (2.32)$$

$$P^0 = 3 V_{ln}^0 I^0 \cos \theta^0, \quad (2.33)$$

$$P = P^+ + P^- + P^0, \quad (2.34)$$

Fazların reaktif güçleri için ise Eş. 2.35-2.38 ile yazılabilir:

$$Q_a = \frac{\omega}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + Kt} i_a \left[\int v_a dt \right] dt = V_{a\ln} I_a \sin \theta_a, \quad (2.35)$$

$$Q_b = \frac{\omega}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + Kt} i_b \left[\int v_b dt \right] dt = V_{b\ln} I_b \sin \theta_b, \quad (2.36)$$

$$Q_c = \frac{\omega}{Kt} \int_{\tau}^{\tau + Kt} i_c \left[\int v_c dt \right] dt = V_{c\ln} I_c \sin \theta_c, \quad (2.37)$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (2.38)$$

Pozitif, Negatif ve Sıfır dizili reaktif güçleri Eş. 2.39-2.42'de verilmiştir.

$$Q^+ = 3 V_{ln}^+ I^+ \sin \theta^+, \quad (2.39)$$

$$Q^- = 3 V_{ln}^- I^- \sin \theta^-, \quad (2.40)$$

$$Q^0 = 3 V_{ln}^0 I^0 \sin \theta^-, \quad (2.41)$$

$$Q = Q^+ + Q^- + Q^0, \quad (2.42)$$

Fazların görünür güçleri Eş. 2.43-2.48'de yazılabilir:

$$S_a = V_{aln} I_a, \quad (2.43)$$

$$S_b = V_{bln} I_b, \quad (2.44)$$

$$S_c = V_{cln} I_c, \quad (2.45)$$

$$S_a^2 = P_a^2 + Q_a^2, \quad (2.46)$$

$$S_b^2 = P_b^2 + Q_b^2, \quad (2.47)$$

$$S_c^2 = P_c^2 + Q_c^2, \quad (2.48)$$

Aritmetik görünür güç Eş. 2.49-2.52 ile elde edilebilir.

$$S_A = S_a + S_b + S_c, \quad (2.49)$$

$$S_A = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.50)$$

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (2.51)$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (2.52)$$

Vektörel görünür güç için ise Eş. 2.53-2.55'de yazılabilir.

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.53)$$

$$S_v = |P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)| = |P + jQ|, \quad (2.54)$$

$$S_V = |P^+ + P^- + P^0 + j(Q^+ + Q^- + Q^0)|, \quad (2.55)$$

Pozitif, Negatif Sıfır dizili görünür güçler Eş. 2.56-2.59'da verilmiştir.

$$S^+ = |S^+| = |P^+ + jQ^+|, \quad (2.56)$$

$$S^- = |S^-| = |P^- + jQ^-|, \quad (2.57)$$

$$S^0 = |S^0| = |P^0 + jQ^0|, \quad (2.58)$$

$$S_V = |S^+ + S^- + S^0|, \quad (2.59)$$

Vektörel ve aritmetiksel güç faktörü ise sırasıyla Eş.2.60 ve Eş. 2.61'de verilmiştir.

$$P_{FV} = \frac{P}{S_V}, \quad (2.60)$$

$$P_{FA} = \frac{P}{S_A}, \quad (2.61)$$

3. HARMONİKLER

Alternatif akım güç sistemlerinde hem akım hem de gerilim dalgalarının sinüsoidal formda olması beklenir. Ancak bazı etkilerden dolayı akım ve gerilimin sinüsoidal dalga formu bozulabilir. Bozulan bu dalga formu artık sinüsoidal olmayıp sinüsoidal olmayan formda olacaktır. Sinüsoidal dalga formunu bozarak sinüsoidal biçimden uzaklaşmaya sebep olan ve şebeke frekansının katları olan bireysel dalga formları harmonikler olarak isimlendirilebilir. Harmonikler, lineer ya da lineer olmayan elemanlı bir devreye sinüsoidal olmayan bir besleme geriliminin uygulanması veya lineer olmayan elemanlı bir devreye sinüsoidal gerilim uygulanmasıyla meydana gelir [4].

Sinüsoidal olmayan dalga formu, ideal sinüsoidal dalga formu üzerine farklı frekanslarda, açılarda ve genliklerde dalga formlarının binmesi nedeniyle oluştuğu için herhangi bir sinüsoidal olmayan sinyalin analizi yapılarak temel sinüsoidal dalga ile bu dalgayı bozan diğer dalga formlarını tespit edilebilmektedir.

Joseph Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, bu tür dalgaların genlik ve frekansları farklı olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “Fourier Serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier Bileşenleri” adı verilir [4]. Elektriksel sistemlerde sinüsoidal olmayan akım ve gerilimlerin ifade edilebilmesi için genellikle o sinyalin Fourier Serisine açılması yolu tercih edilmektedir.

Periyodik bir dalganın Fourier analizi yapılabilmesi için o dalganın bir periyodunda sonlu sayıda süreksizlik olması, sonlu sayıda üst ve alt değerleri ile birlikte ortalamasının sonlu değer olması koşullarına yani Discrete koşullarına uyması gerekmektedir. Akım ve gerilim dalga şekilleri bu koşulları sağladığı için Fourier

Analizi ile bileşenleri bulunabilir. Bu sayede analizi yapılan dalganın temel dalga ve diğer harmonik dalga bileşenleri bulunabilir.

Bir fonksiyon $f(t)$ biçiminde zaman domeninde, $F(\omega)$ biçiminde ise frekans domeninde ifade edilebilir. Fourier ya da ters Fourier dönüşümü ile zaman veya frekans domeninde $(-\infty, \infty)$ aralığındaki bir fonksiyon yine frekans veya zaman aralığında sürekli bir fonksiyon olarak çevrilebilir. Böylece zaman veya frekans domenindeki bir fonksiyon ya da dalga şekli incelenebilir.

Zaman domenindeki bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü;

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt , \quad (3.1)$$

olarak, frekans domenindeki $F(\omega)$ fonksiyonun ters Fourier dönüşümü ise;

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt , \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.

Periyodik herhangi bir sinüsoidal olmayan sinyalin hangi frekanslardaki sinyallerden oluştuğunu frekans domeni analizini ayrık zamanlı Fourier dönüşümü veya hızlı Fourier dönüşümü ile gerçekleştirilebilir.

3.1. Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü, Fourier dönüşümünün eşit aralıklı frekanslardaki örneklerine özdeştir. Frekans domeni fonksiyonunun N noktalı ayrık zamanlı Fourier dönüşümünün hesaplanması Fourier dönüşümünün N örneğinin, N eşit aralıklı frekanslarla ($\omega_k = 2\pi k/N$), zaman düzleminde ki birim çember üzerinde N nokta

ile hesaplanmasıdır. Örneklem zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin, sabit zaman aralığına ayrılan N adet büyüklüğün zaman düzlemi serisi olarak gösterilebilir. N adet örneklem bilgisi örneklem zaman fonksiyonu formunda elde edilebildiği için, ayrık zamanlı Fourier dönüşümü harmonik analizlerinde tercih edilir.

$[0, T_0]$ arasında örneklenen $f_d(t)$ fonksiyonun Fourier dönüşümünden ayrık zamanlı Fourier dönüşümü elde edilir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi örneklenen $f_s(t)$ fonksiyonu $f(t)$ ile örneklem dalga formu $s_T(t)$ çarpımına eşittir ve Eş. 3.3'de verilmiştir:

$$f_s(t) = f(t) s_T(t) = \Delta T \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - n\Delta T), \quad (3.3)$$

Burada δ bir örneklem fonksiyonu temsil etmektedir. Eş. 3.3'e Fourier dönüşümü uygulanırsa;

$$F[k\omega_0] = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f_s(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{\Delta T}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - n\Delta T) e^{-jk\omega_0 t} dt, \quad (3.4)$$

elde edilir. Burada;

$$g(t) = f(t) e^{-jk\omega_0 t}, \quad (3.5)$$

ise ve sonsuz toplam integrale dahil edilir ise;

$$F[k\omega_0] = \frac{\Delta T}{T_0} \int_0^{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \delta(t - \tau) dt, \quad (3.6)$$

olur. Burada;

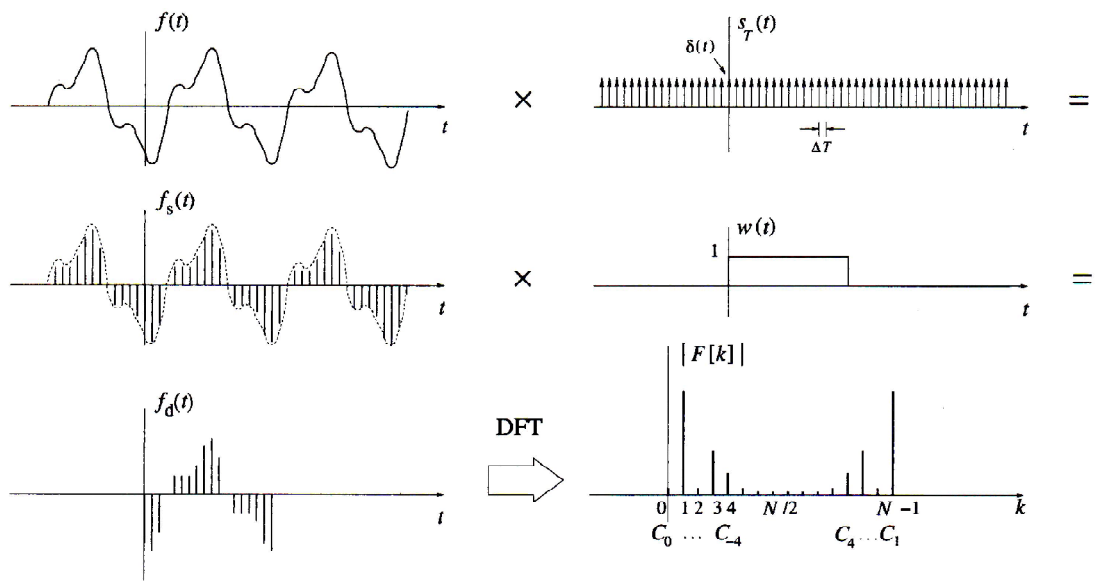
$$\tau = n\Delta T, \quad (3.7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t) \delta(t - \tau) dt = g(\tau), \quad (3.8)$$

Eş. 3.8 eşitliği, Eş. 3.6'da yerine yazılırsa;

$$F[k\omega_0] = \frac{\Delta T}{T_0} \int_0^{T_0} g(\tau) dt = \frac{\Delta T}{T_0} \int_0^{T_0} f[n\Delta T] e^{-jk\omega_0 n\Delta T} dt, \quad (3.9)$$

elde edilir.



Şekil 3.1. Discrete fourier dönüşümü ile örneklenen dalga formları.

Pencere fonksiyonu, $\omega(t)$ uygun dönüşümün elde edilebilmesi için gerekli olan sinyalin uzunluğunu belirlemek için kullanılır. Burada $f_d(t) = f_s(t) \omega(t)$ ve örnekleme sayısı $N = \frac{T_0}{\Delta T}$ 'dir. İntegraller toplandığında;

$$F[k\omega_0] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n\Delta T] e^{-jk\omega_0 n\Delta T}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.10)$$

elde edilir. Yukarıdaki Fourier dönüşümü eşitliğinde, $f[n\Delta T]$ dizisi genellikle ayrık Fourier dönüşümü (DFT) olarak bilinir. Benzer işlemler kullanılarak $F[k\omega_0]$ 'nin ters ayrık Fourier dönüşümü Eş. 3.11 ile verilmiştir.

$$f[n\Delta T] = N \sum_{k=0}^{N-1} F[k\omega_0] e^{-jk\omega_0 n\Delta T}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.11)$$

$\omega_0 = 2\pi/T_0$ ve $\Delta T = T_0/N$ olduğu için eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-jkn2\pi/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.12)$$

$$f[n] = N \sum_{k=0}^{N-1} F[k] e^{-jkn2\pi/N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.13)$$

3.2. Hızlı Fourier Dönüşümü

Fonksiyonu matematiksel olarak yazılamayan herhangi bir dalgayı Fourier dönüşümü ile fonksiyonu matematiksel olarak ifade edebilir dalgalar cinsinden ayrıştırılabilir. Bu işlem yapılırken en etkin yararlanılan yöntem ayrık Fourier dönüşümü olmaktadır. Ayrık Fourier dönüşümünü daha hızlı yapabilmek için ise hızlı Fourier dönüşümü algoritmalarından faydalanılabilir.

$W = e^{-j2\pi/N}$ bağıntısını kullanarak yukarıdaki eşitliği basitçe tekrar yazılabilir.

$$F[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] W^{kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.14)$$

Buda aşağıdaki matris ifadesini ortaya çıkarır.

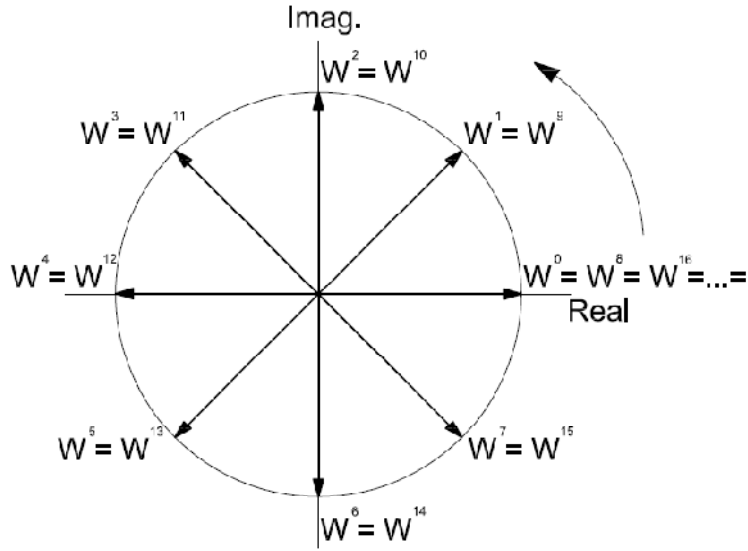
$$\begin{bmatrix} F[0] \\ F[1] \\ F[2] \\ \vdots \\ F[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \dots & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & \dots & W^{(N-1)} \\ W^0 & W^2 & W^4 & \dots & W^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W^0 & W^{(N-1)} & W^{2(N-1)} & \dots & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ f[2] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix}, (3.15)$$

veya en kısa şekliyle;

$$F = Wf, \quad (3.16)$$

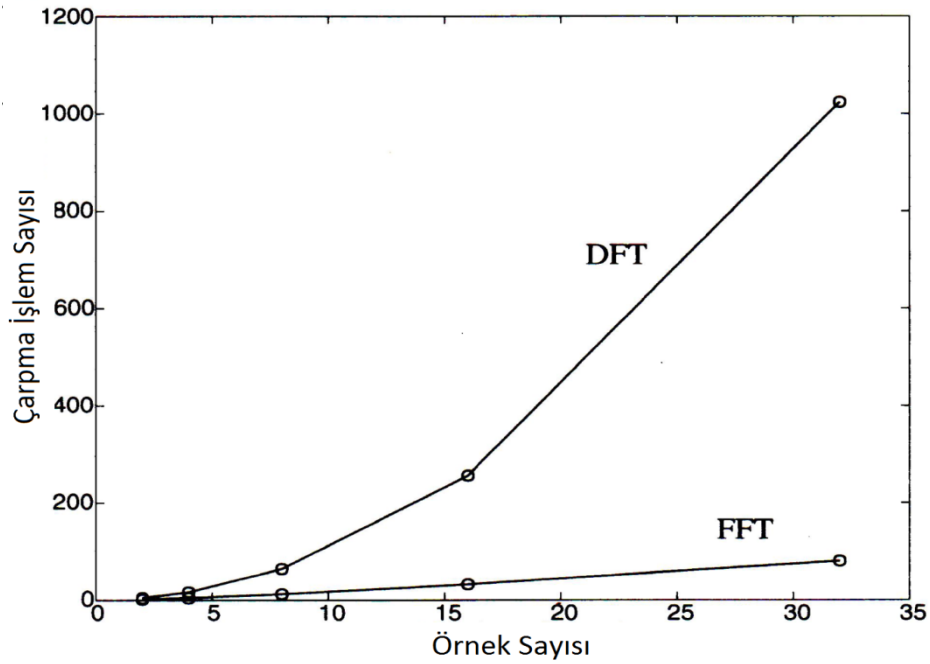
biçiminde yazılabilir.

Örnek de diğer bir yol $N=8$ olduğunda şekilde gösterildiği gibi W^{kn} değeri alınabilir. Bu şekilden basitçe $kn = 7 \times 7 = 49$ gereken işleminde yalnızca 3 değer $(1, \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}, j1)$ ile W matrisini elde edildiği görülebilir. Diğer kalan 46 değer bu 3 değere eşlenebilir veya negatif değerleri denilebilir. Bu basit düşünce FFT'nin temel yapısıdır. Algoritmada kullanılan örneklerin ikinin katları $(N = 2^m)$ olarak limitlendirilmesi basitleştirmeyi sınırlandırmaktadır.



Şekil 3.2. $N=8$ için W değerleri.

Eşitlik 2.36 kullanılarak ayırık bir fonksiyonun Fourier dönüşümünün yapılabilmesi için N^2 çarpma gerekli iken FFT kullanılarak $\frac{1}{2}N \log_2 N$ çarpma ile benzer sonuç elde edilebilmektedir. Şekilde gerekli olan çarpma işlemi sayısı örnek sayısının fonksiyonu olarak iki yöntem için karşılaştırmalı olarak verilmiştir [5].



Şekil 3.3. FFT ve DFT örneklemelerinde çarpma sayısının karşılaştırılması.

3.3. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Bir akım veya gerilim dalgasının sinüs dalga formundan uzaklaşıp harmonikler ile ne kadar bozulduğunu % cinsinden gösteren ifadedir. Gerilim için toplam harmonik bozulum miktarı;

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} \times 100\%, \quad (3.17)$$

ile, akım için ise;

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \times 100\%, \quad (3.18)$$

eşitlikleri ile verilir.

Yukarıdaki gerilim veya akımın toplam harmonik bozulmaları, harmonikli bileşenlerinin etkin değerlerinin temel bileşenin etkin değerine oranı olarak hesaplanabilir. Bu oran ideal bir sinüsoidal dalga için sıfır olmakta, sinüsoidal olmayan sinyal için ise bu dalga'nın sinüs dalga formundan uzaklaşma değeridir. Toplam harmonik distorsiyonunun (gerilim için) diğer ifadeleri ise Eş. 3.19 ve Eş. 3.20 ile yazılabilir.

$$THD = \frac{\sqrt{[V^2 - V_1^2]}}{V_1} \times 100\% , \quad (3.19)$$

$$THD = \sqrt{\left[\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1\right]} \times 100\% , \quad (3.20)$$

Toplam harmonik bozulma yerine istenilen k. harmoniğin bozulmasını görmek için;

$$HD_V = \frac{V_k}{V_1} , \quad (3.21)$$

$$HD_I = \frac{I_k}{I_1} , \quad (3.22)$$

olarak eşitliklerde olduğu gibi yazılabilir [4, 6].

3.4. Toplam Talep Distorsiyonu (TDD)

Herhangi bir yükün 15 veya 30 dakikalık süre içerisinde çekeceği maksimum akımın THD değeridir.

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_L} \times 100\% , \quad (3.23)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada I_L yükün şebekeden çektiği akımın temel bileşenin maksimum değeridir.

3.5. Şekil Faktörü

Sinüsoidal olmayan bir sinyalin, sinüsoidal dalga formundan uzaklaşma ya da sinüsel formunu ne kadar kaybettiğini gösteren değerdir. Sinüsoidal formda olan bir dalga için bu değer 1.11 olmaktadır.

$$k_f = \frac{\text{Efektif Değer}}{\text{Ortalama Değer}}, \quad (3.24)$$

3.6. Tepe (Crest) Faktörü

Harmonik bileşenlerin tespitini basit bir şekilde ortaya koyan bu değer, sinüsoidal olmayan formdaki akım veya gerilim dalgası tepe değerinin o dalganın temel bileşeninin efektif değerine bölümü ile hesaplanabilir. Sinüsoidal formda olan bir dalga için tepe faktörü $\sqrt{2}$ iken doğrusallıktan uzaklaştıkça 5'e kadar yükselebilir.

$$\text{TepeFaktörü} = \frac{\text{Dalga'nın Tepe Değeri}}{\text{Temel Bileşenin Etkin Değeri}}, \quad (3.25)$$

3.7. Harmonik Standartları

Elektrikli motor sürücüleri, ark fırınları, konvertör gibi harmonik kaynağı oluşturan yükler şebekeden harmonik bileşenli akımlar çekerek şebeke geriliminin de bozulmasına yol açarlar. Şebekenin kirlenmesi ise doğrusal olan diğer yükleri de etkiler ve bunun neticesinde mevcut sistemde kayıplarla beraber sistemdeki diğer alıcıların da arızalanmasına sebep olabilirler.

Gelişen teknoloji, sanayileşme vb. ile artan taleple birlikte şebekedeki harmonik kaynaklı kirliliğin önüne geçilmediği takdirde hem elektrik enerjisi üretim-iletim tesislerinde, hem de elektrik enerjisinin tüketildiği kullanıcılarda büyük boyutlarda problemlere sebebiyet vereceği düşünülmüş böylece harmoniklerin sınırlandırılarak belli sınırlar içerisinde kalmasını sağlayacak standartların olması uygun görülmüştür. Buradan yola çıkılarak elektrik şebekesindeki hem gerilim hem de akım değerleri için sistemdeki harmonik varlığını kısıtlamak adına THD, TDD ve HD gibi ifadelerin olması gereken maksimum değerleri standartlaştırma yolu tercih edilmiştir. Elektrik şebekelerindeki harmoniklerin miktarını sınırlamak için iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan birincisi Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission, IEC) tarafından da tercih edilen herhangi bir doğrusal olmayan yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise (IEEE tarafından benimsenen) birden fazla doğrusal olmayan yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

Çizelge 3.1. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1.5
	115≤	8
	Özel	1.5
Almanya	2.4-69	10
	115≤	10
	Tüm Gerilim Değerlerinde	10
	(15. Harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım	5
	33≥	3
	İletim	1.5
	22,33,66	1.5
Finlandiya	110≤	1.5
	1	5
	3-20	4
	30-45	3
Fransa	110	1.5
	Tüm Gerilim Değerlerinde	1.6
İngiltere	0.415	5
	6.6-11	4
	33-66	3
	132	1.5
İsveç	0.43/0.25	4
	3.3-24	3
	84≥	1
		1

IEEE ve IEC gibi uluslararası kuruluşlar harmonik standartları oluşturmuşlardır. Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlandırılmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir [4].

Ülkemizde ise harmonik standartları ‘Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Ve Kalitesi Yönetmeliği’ ve ‘Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari Ve Teknik Kalitesi Yönetmeliği’ ile belirlenen gerilim ve akım harmonikleri için limitler Çizelge 3.2-3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. EPDK tarafından belirlenen akım harmoniği limitleri.

Harmonik Sırası		Orta Gerilim 1<Un<34.5					Yüksek Gerilim 34.5<Un<154					Çok Yüksek Gerilim Un>154				
Grup	No	Ik/II					Ik/II					Ik/II				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K H A R M O N İ K L E R	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
h>3	3	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

Çizelge 3.4’de verilen I_k , güç sisteminin orta bağlantı noktasında maksimum kısa devre akım değerini, I_l ise güç sisteminin orta bağlantı noktasında maksimum yük akımını temsil etmektedir.

3.8. Harmoniklerin Elimine Edilmesi

Harmoniklerin zararlı etkileri ve standartlar ile getirilen zorunlu sınırlamalar harmoniklerin tamamen veya kısmen elimine edilmesi düşüncesini geliştirmiştir. Elektrikli motor sürücüleri, konvertörler, kesintisiz güç kaynakları gibi harmonik üreten cihazların imalat aşamasında uygun standartlara göre tasarımı ile harmoniklerin önlenmesi gibi düşüncelerle birlikte bir sistemde veya herhangi bir cihazdan dolayı meydana gelen harmoniklerin elimine edilmesi için istenilen harmonikli akım veya gerilimi bastırabilen ‘‘Harmonik Filtresi’’ olarak adlandırılan ek devreler tasarlanmıştır. Harmonik filtreler kullanılması düşünülen mevcut sistemde etkin olan temel bileşen frekansı haricindeki frekanslarda mevcut olan akım veya gerilimlerin tamamen veya kısmen sönümlendirilmesi görevini üstlenir. Bu amaçla harmonik filtreler sistemde mevcut olan en etkin harmonikleri sönümlendirmek için tasarlanır. Harmonik filtreler şebekedeki harmonik kirliliğini önlediği gibi, harmonik kaynaklı arıza ve kayıpların önüne geçilmesi yönünden hem ekonomik hem de teknik bakımdan faydalar sağlaması sebebiyle tercih edilirler.

Harmonik filtreler çalışma şekilleri yönünden 3’e ayrılırlar.

- Pasif Filtreler
- Aktif Filtreler
- Hibrit Filtreler

3.8.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile yük arasına konulan ve temel frekans dışındaki istenilen harmonik bileşenlerini yok eden seri bağlı kondansatör (C) ve endüktansın (L)

birlikte bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bazı filtre çeşitleri için omik direnç (R) de ilave edilebilir [4].

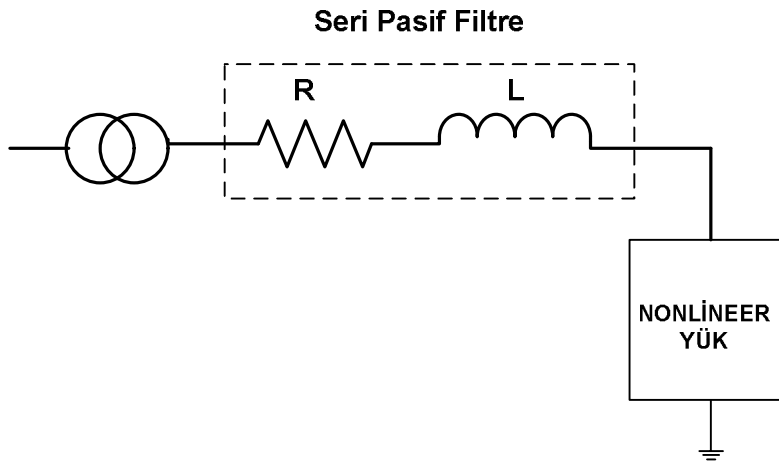
Pasif filtreler sistemde etkin olan frekanstaki harmoniği sönümlemek amacıyla o frekans da rezonansa gelecek kondansatör ve endüktans değerleri hesaplanarak oluşturulurlar. Pasif filtreler sadece tasarlandığı frekanstaki harmoniği sönümlemek için kullanılır. Bir sistemde birden fazla etkin harmonik bileşeni varsa her bir harmonik bileşeni için ayrı ayrı pasif filtreler kullanılmalıdır. Pasif filtreler bağlandığı sistemin hat akım harmoniklerini sönümlendirmesi ile birlikte sistemin güç faktörünün düzelmesine de faydası vardır. Pasif filtreler belirli bir frekanstaki harmoniği bastırmak için tasarlandıklarından sistemdeki bir değişiklik durumunda sistemde oluşabilecek başka frekanslardaki harmonikleri sönümlendiremeyecek olmasından dolayı başka filtrelere ihtiyaç duyulmasına sebebiyet vereceği için bu durumlarda ekonomik olmayacaktır. Pasif filtrelerin düzgün çalışabilmesi yani etkin olduğu harmoniği tam olarak bastırabilmesi doğrusal olmayan yüklerin karakteristiklerine ve şebeke empedansına bağlıdır. Pasif filtrelerin ebatları ve ağırlıklarının fazla olması bu filtrelerin dezavantajlarındanıdır. Ancak harmonik değerinin değişmediği büyük güçlü tesislerde basit yapıları ve düşük maliyetleri sebebiyle tercih edilirler. Pasif filtreler sisteme bağlantı türüne göre iki çeşide ayrılır.

- Seri pasif filtreler
- Paralel pasif filtreler

Seri pasif filtreler

Belli bir frekanstaki harmoniğin güç sistemine veya güç sistemleri elemanlarına etkisini önlemek amacıyla, harmonikli akımların geçemeyeceği yüksek seri bir empedansın varlığı düşüncesi temel alınarak tasarlanırlar. Seri pasif filtreler harmonik üreten eleman ile şebeke arasına seri olarak bağlanırlar. Seri pasif filtreler sadece bir frekanstaki harmoniği engellemek üzere tasarlandığı için sadece o

frekansda yüksek empedans gösterirler. Aynı zamanda temel frekansda ise genellikle düşük empedans gösterirler. Seri pasif filtrelerin avantajlarından biri de rezonans sorunu olmamasıdır. Seri pasif filtrelerin en büyük dezavantajı şebeke ile harmonik üreten yük arasında seri bağlanması sebebi ile tam yük akımına maruz kalması ve filtrenin hat gerilimine göre yalıtılması mecburiyetidir. Bir fazlı sistemlerde 3. harmoniği engellemek için yoğun olarak kullanılır.

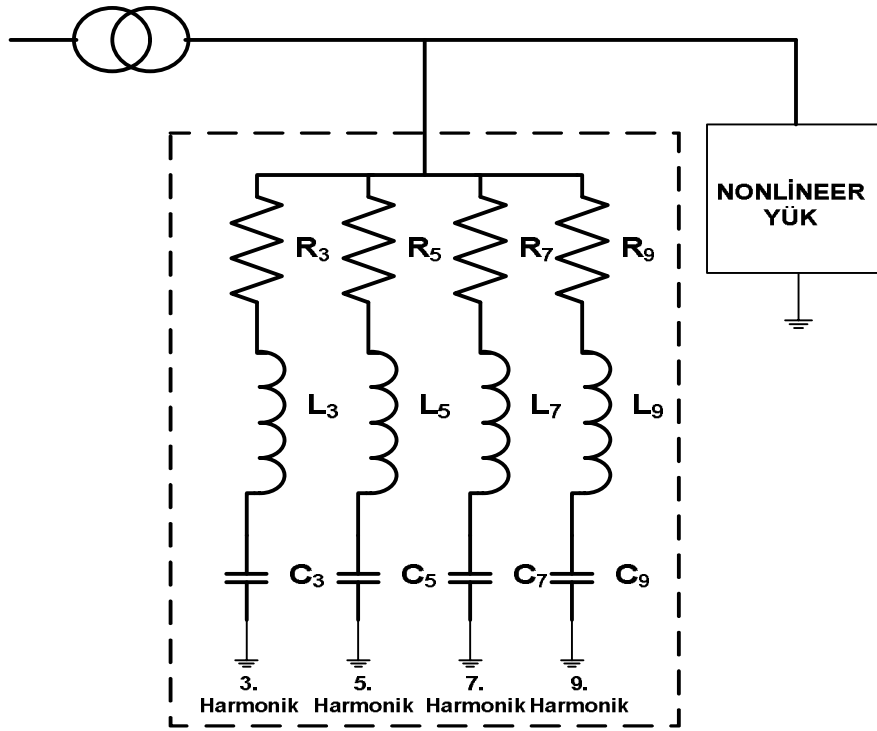


Şekil 3.4. Seri pasif filtre.

Paralel pasif filtreler

Etkin olan harmonik bileşenin düşük empedanslı paralel bir kol vasıtasıyla enerji sisteminde dolaşmasını engelleyerek toprağa aktarılması esasına dayanarak tasarlanırlar. Paralel pasif filtreler şebeke ile harmonik üreten yük arasında paralel bağlanırlar. Sistemden sönmelenmesi istenen harmonik bileşenin frekansında düşük empedans gösteren paralel filtre, harmonik bileşenin bu düşük empedansın olduğu koldan toprağa aktarılması sağlanır. Paralel pasif filtreler kullanılacakları sistemin anma gücüne göre tasarlanıp, bu güçte rahatlıkla çalışabilirler. Paralel pasif filtreler temel frekansda reaktif güç üretirler ve bu sayede sistemin güç katsayısının düzeltilmesine katkı sağlamış olmaktadır. Tasarımları kolay ve ekonomiktir. Paralel pasif filtrelerin en büyük sakıncası ise şebeke ile rezonansa girebilmeleridir. Bu

nedenle bu filtrelerin tesise ilk kurulumundan önce şebeke empedansı ve şebeke karakteristiği çok iyi etüt edilmelidir. Bu etüt neticesinde ayarlı bir paralel filtre dizayn edilerek uygulaması gerçekleştirilebilir. Fakat sistemde daha sonra ki zamanlarda yapılacak değişiklik ve ilave yükler sistemin karakteristiğini değiştirecek olup paralel filtrenin yeniden tasarlanmasını gerektirecektir. Paralel pasif filtrenin kullanılacağı tesisin tamamı için merkezi olarak kullanılması olası bir rezonans durumunda çok büyük zararlara sebebiyet verebileceği için filtrenin bireysel kullanılması daha uygun olabilmektedir.



Şekil 3.5. Paralel pasif filtre.

3 farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır.

- Tek Ayarlı (Bant Geçiren) Filtreler
- Çift Ayarlı Filtreler
- Sönümlü Filtreler

Tek ayarlı (bant geçiren) filtre

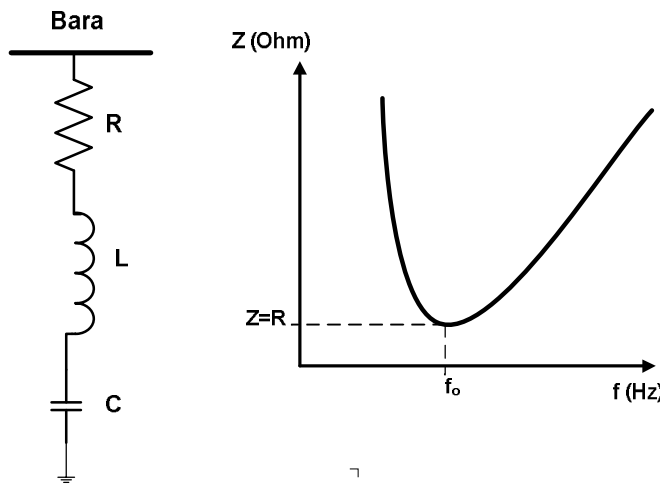
Tek ayarlı filtreler seri bağlanmış direnç, bobin, kondansatör devresinden oluşur. Tek ayarlı filtre yok edilmesi istenilen harmonik akımının frekansında rezonansa girerek, harmonikli akımın toprağa aktarılması işlevini görür. Tek ayarlı filtre ayarlandığı frekans dışındaki frekanslar da daha büyük empedans gösterir ve filtreleme yapmaz. Toplam empedans aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$Z = R + j (X_L - X_C) , \quad (3.26)$$

Harmonikli akımın frekansına ayarlanan filtre de, ayarlanan frekans da rezonans olmasından dolayı $X_L = X_C$ olur ve bu durumda toplam empedans aşağıdaki gibi olur.

$$Z = R, \quad (3.27)$$

Bu durumda düşük empedans değeri sebebiyle harmonikli akım sistemden tasviye edilmiş olur.

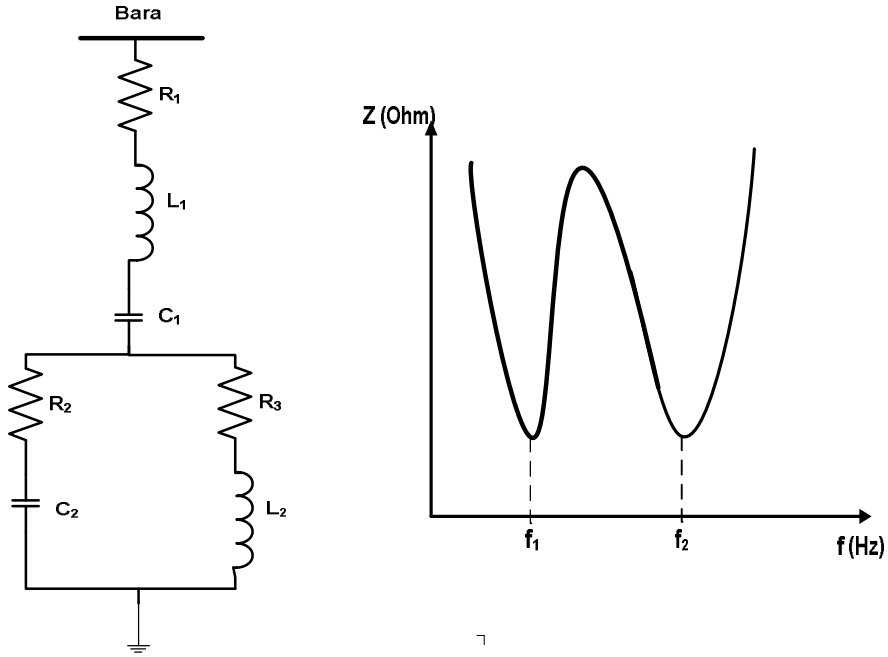


Şekil 3.6. Tek ayarlı (bant geçiren) filtre ve empedans değişimi.

Tek ayarlı filtreler temel frekans ve ayarlandığı harmonikli akım frekansı dışındaki diğer frekanslarda kapasitif etki gösterebilir ve sistemin kompanzasyonu için kullanılabilir. Bu nedenle filtre tasarımı gerçekleştirilirken öncelikle sistemin ihtiyacı olabilecek kompanzasyon değerine göre filtrede kullanılacak kapasitans değeri belirlenir ve daha sonra harmonikli akım frekansında seçilen kapasitans ile rezonansa girebilecek endüktans değeri hesaplanabilir. Sistemde birden fazla harmonikli akım varsa belirlenen kapasitans değerine göre farklı frekanslarda rezonansa girecek endüktans değerleri hesaplanabilir. Böylece sistemde etkin olan harmonikli akımları birden fazla filtre paralel kullanılarak filtrelenebilir. Tek ayarlı filtre etkin olduğu frekansda rezonansa girdiği için filtre devresine bir direnç dahil edilmemiş ise harmonik akımına sıfıra yakın bir empedans gösterir ve kayıplar çok azdır. Yalnız tek ayarlı bir filtrede, filtrelenmesi düşünülen harmonikli akım frekansında kondansatör ve endüktansın rezonansa girmesi için bu elemanların değerlerinin hassas hesaplamalar ile yapılması gerekmektedir. Sistemde oluşabilecek değişimler filtreyi etkileyebilir. Harmonikli akım frekansında rezonans gerçekleşmesi beklenen filtre, rezonansa girmeyebilir ve filtre işlevini yitirebilir. Bu nedenle tek ayarlı filtrelerin sabit güçler için kullanılması uygun olmayabilir.

Çift ayarlı filtre

Çift ayarlı filtre sistemde etkin iki ayrı harmonikli akımın iki ayrı frekansına ayarlanırlar ve her iki frekansta da düşük empedans göstererek iki farklı harmonik mertebesinin filtrelenmesini sağlar. Çift ayarlı filtrenin yapısı iki tane tek ayarlı filtrenin birleştirilmesiyle oluşturulabilir. Filtre belirlenen iki frekansda rezonansa girer ve temel bileşen frekansı ile diğer frekanslarda yüksek empedans göstermektedir. Çift ayarlı filtre, tek ayarlı filtreye göre temel frekansda güç kaybı daha az olabilir.



Şekil 3.7. Çift ayarlı filtre ve empedans değişimi.

Sönümlü filtre

Yüksek frekanslardaki harmonikli akımların sönümlenmesi için tasarlanmış filtrelerdir. Sönümlü filtrelerin diğer bir ismi de yüksek geçiren filtrelerdir. Bu isimden de anlaşıldığı üzere yüksek mertebeli (17, 19, 21 ve üzeri) harmoniklerin filtre edilmesi için kullanılırlar. Bu filtreler düşük frekanslarda yüksek empedans göstermek ve yüksek frekanslarda ise düşük empedans göstermek üzere tasarlanmışlardır. Filtreler tasarlanırken harmonikli akımın sönümlenmesini en etkin şekilde yapması ile birlikte kayıpların da düşük olması istenir. Bu nedenle harmonik filtrelerinde direnç ile reaktans değerlerinin ilişkilendirilmesiyle kalite faktörü belirlenir. Sönümlü filtrelerde kalite faktörü düşük olup, 0,5 ile 5 arasındadır. Sönümlü filtreler diğer filtrelerde olduğu gibi filtre edilmek istenilen harmonikli akımın tam frekansına ayarlanmak yerine biraz daha düşük seçilir.

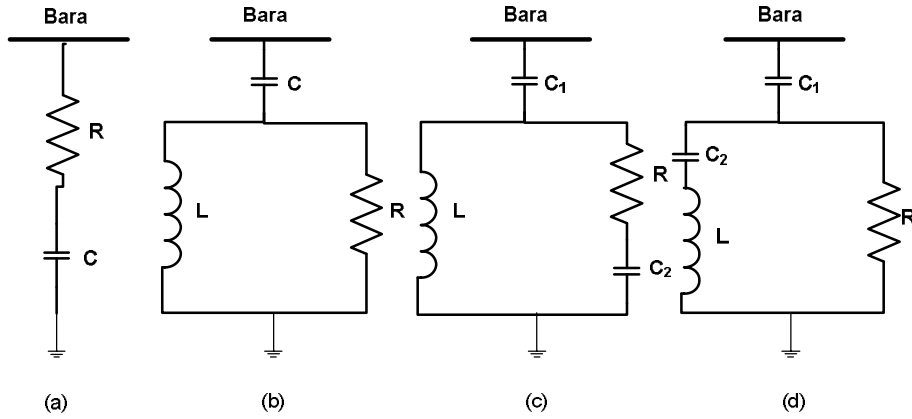
$$Q = R/X_r, \quad (3.28)$$

Ayar keskinliği ifadesi kondansatör ve endüktansın rezonans frekansındaki reaktansı, R filtre direnci ile belirlenir.

Sönümlü filtreler birinci dereceden, ikinci dereceden, üçüncü dereceden ve C tipi olmak üzere 4 farklı şekilde çeşitlendirilebilir.

Sönümlü filtrelerin bu şekilde çeşitlendirilmesi, filtrelerin farklı özellikler göstermesinden kaynaklanmaktadır. Birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansa aşırı kayıplara neden oldukları ve büyük kapasite gerektirdiklerinden çok fazla tercih edilmezler. İkinci dereceden filtreler üçüncü dereceden filtrelere göre daha fazla temel frekans kayıplarına neden olmasına karşın filtreleme performansları yüksektir. İkinci dereceden sönümlü filtre yüksek frekans değeriindeki harmoniklerin sönümlenmesi için tek ayarlı bir filtreden daha etkindir. Üçüncü dereceden sönümlü filtrenin, ikinci dereceden sönümlü filtreye göre üstünlüğü C kondansatöründen dolayı temel frekansa empedansın yüksek olması nedeniyle temel frekans kaybının azlığıdır. C tipi filtrede ise filtreleme performansı üçüncü dereceden ve ikinci dereceden sönümlü filtrelere benzerdir. C tipi filtrenin en büyük özelliği temel frekansa kayıpların düşük olmasıdır.

Sönümlü filtreler yüksek mertebeli harmoniklerin yok edilmesi için tasarlanırlar. Bu filtrelerin düşük frekansa ki harmonikli akımları yok etmek için kullanılması ekonomik olmamaktadır. Sönümlü filtrelerde temel frekansa ki sapmalar, filtrenin sönümlenmesini yapacağı harmonikli akımın frekansına tam olarak ayarlanma ihtiyacı olmaması nedeniyle, filtreyi etkilememektedir. Sönümlü filtreler ayrıca yüksek frekansa geniş bir aralık içinde düşük bir empedans göstererek yüksek frekanslı harmoniklerin sönümlenmesini sağlar.



Şekil 3.8. Sönümlü filtreler a) birinci derece b) ikinci derece c) üçüncü derece d) C tip

3.8.2. Aktif güç filtreleri

Günümüzde doğrusal olmayan yüklerin (statik güç dönüştürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, frekans konvertörleri ve bunu gibi yarıiletken anahtarlama elemanları ile tasarlanmış tüm devreler) kullanımının artması, güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga formlarının bozulmalarını da beraberinde getirmiştir. Bu bozulmadan dolayı harmonik olarak isimlendirilen akım ve gerilim dalga formları enerji güç sistemlerinin iletim, dağıtım ve tüketim gibi tüm boyutlarında hem enerji şirketlerini hem de tüketicileri olumsuz etkilemektedir. Harmonikli akım ve gerilim dalga formları zararlı etkileri sebebiyle, güç sistemlerinde elimine etmek maksadıyla filtre sistemleri geliştirilmiştir.

Harmonikli akım veya gerilim dalga formlarını yok etmek için pasif filtreler tasarlanmıştır. Pasif filtreler sadece bir veya birkaç frekansa ki harmonikli akım veya gerilim harmoniğini yok edebilir düzeyde düşük maliyetli filtrelerdir. Fakat bazı dezavantajları kullanımlarını kısıtlamaktadır. Pasif filtreler belli bir güç veya frekans değerindeki akım veya gerilim harmoniğini sönümlemek için tasarlanırlar. Güç sistemine bir ilave veya sistemdeki değişme filtrenin yetersiz kalmasına yada filtre değerlerinin değişmesine neden olacaktır. Ayrıca güç sistemindeki doğrusal olmayan

yüklerin harmonikli akım veya gerilim dağılımlarının geniş olması her bir frekans değerindeki her bir harmoniğin filtrelenmesi için farklı değerlere sahip pasif filtreler ihtiyaç duyulmasına sebep olur. Pasif filtreler şebeke empedansındaki değişimlerden etkilenebilir ve bunun neticesinde güç sistemi için tehlikeli sonuçlar oluşabilmektedir. Bu ve benzeri nedenlerden ötürü pasif filtreler harmoniklerin filtrelenmesinde istenilen yeterlilik de olmayışı, farklı filtreleme sistemleri üzerinde durulmasına neden olmuş ve aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. Aktif filtreler, harmoniklerin etkin bir biçimde filtrelenmesi için tasarlanmış cihazlardır. 1970'lerde aktif filtrenin temel prensipleri ve pratik uygulamalarına yönelik pek çok araştırma yapılmıştır. Bununla beraber IGBT gibi yarıiletken güç anahtarlarının akım ve gerilim kapasiteleri ile anahtarlama frekanslarında ortaya çıkan ilerlemeler aktif filtrelere olan ilgiyi arttırmış ve gerçek uygulamaların hayat bulmasını sağlamıştır. Japonya'da binden fazla IGBT ve GTO'ların kullanıldığı gerilim kaynaklı PWM anahtarlama evirici tabanlı aktif güç filtresi başarıyla çalışmaktadır. Aktif filtreler aşağıda belirtilen fonksiyonları yerine getirirler.

- Reaktif güç kompanzasyonu
- Harmoniklerin azaltılması
- Negatif dizili akım/gerilim kompanzasyonu
- Gerilim regülasyonu [7]

Genel olarak bir aktif filtre nonlinear yüke paralel bağlı bir akım kaynağıdır. Bu yaklaşımda alternatif akım sistemine harmonikli akım enjekte etme prensibine dayanır. Bu akım, yük akım harmoniğinin aynı genlik ve ters fazında olur [8].

Lineer olmayan yük tarafından şebekeden çekilen akımın bir temel frekanslı bileşeni bir de farklı frekanslarda ki harmoniklerden oluşan bozucu bileşenleri bulunmaktadır. Aktif filtre tarafından yük akımı algılanır ve içerisindeki bozucu bileşeni karşılayacak akım üretilir [9]. Böylece harmonikli akım veya gerilimler filtrelenmiş olur. Aktif güç filtreleri bu özelliklerinin yanında istenildiği takdirde

reaktif güç kompanzasyonu ile güç katsayısı düzeltilmesine de imkân sağlayabilmektedirler. Endüktif reaktif güç tüketiminin olduğu güç sistemlerinde akım gerilimden geri kalmaktadır. Böyle bir durumda aktif filtre tarafından ölçülen endüktif reaktif güce karşılık, akımın gerilimden ileride olduğu kapasitif reaktif güç aktif güç devresi tarafından şebekeye verilir ve bunun neticesinde güç katsayısının düzeltilmesi sağlanır. Nadiren olsa bile tersi durumlarda da aktif güç filtresi sisteme gerekli reaktif enerjiyi sağlamaktadır.

Sayısal denetleyicilerle çalışan aktif güç filtreleri, bağlandığı güç sistemine ait akım veya gerilim harmoniklerinin tespiti için çoğunlukla Fast Fourier Transform (FFT) yöntemini kullanırlar. Sistem içerisindeki harmonikler 50. mertebeye kadar bu yöntem ile ayrıştırılır. Güç sisteminin harmoniklerin arındırılması için aktif güç filtresi tarafından tespit edilen harmonik mertebelerine eş genlik de zıt işaretlisi üretilir ve sisteme uygulanır. Böylece sistemdeki harmonikler filtrelenmiş olur.

Analog mantıkla çalışan aktif güç filtrelerinde ise, güç sisteminde sadece temel bileşenin ayırt edildiği yöntem uygulanır. Güç sistemindeki harmonik mertebeleri tek tek ayrıştırılmadan temel bileşen dışındaki harmonikli bileşenlerin tamamı için aktif güç filtresi tarafından aynı genlikte fakat tersi sinyaller üretilerek sisteme zerk edilerek, harmonik filtreleme işlemi uygulanmış olur. Analog mantıkla çalışan aktif güç filtrelerinde, harmonik bileşenlerinin tamamı ayrıştırılmadığı için güç sisteminde ki harmoniklerin tespiti daha hızlı olur ve harmonik filtreleme en etkili şekilde yapılmış olur.

Aktif güç filtreleri güç devresinde ki kontrol tekniğine göre gerilim kaynaklı aktif güç filtresi ve akım kaynaklı aktif güç filtresi olarak sınıflandırılabilir. Her iki filtre tipinin güç devresinde bir enerji depolayan eleman bulunur. Bunlardan gerilim kaynaklı aktif güç filtresinin doğru akım barasında, şebeke geriliminin tepe değerinden 1,5 kat büyük gerilime sahip bir kondansatör bulunur. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresinde kondansatör gerilimi, şebekeden ölçülen gerilim değerine

kıyaslanarak değiştirilir ve filtrenin kontrolü bu yolla sağlanır. Güç sisteminin ihtiyacı endüktif reaktif güç ise, doğru akım barasında ki kondansatörün gerilimi şebeke geriliminden küçük olacak şekilde ayarlanır ve filtrenin kontrolü gerilim değiştirilerek sağlanmış olur. Tam tersi durumda ise güç sisteminin ihtiyacı kapasitif reaktif güç ise, bu kez kondansatörün gerilim değeri şebeke geriliminden büyük olacak biçimde filtrenin kontrolü gerçekleştirilir.

Akım kontrollü aktif güç filtrelerinde ise, enerji depolama elemanı olarak tüm harmonikli akım bileşenlerinin toplamı değerinde akım geçirebilecek bir bobin bulunur. Bu tip filtreler güç sistemindeki harmonikli akım bileşenlerini yok etmek için doğrusal olmayan bir akım kaynağı gibi davranır ve devrede bağlı bobin değerinin kontrolü değişken akımların üretilmesine imkan sağlar.

Gerilim kontrollü aktif güç filtresi bazı üstünlüklerinden dolayı akım kontrollü aktif güç filtresine nazaran kullanımı daha yaygındır. Gerilim kontrollü aktif güç filtresi, gerilim kontrolü ile sistemin ihtiyacı olan akımı enjekte eder. Bu kontrol yöntemi akım kontrolüne göre daha ucuz, basit ve etkili bir çözüm sağlar. Gerilim kontrollü aktif güç filtrelerinin daha etkin çalışabilmeleri için çok seviyeli yapılabilmelerine karşın, akım kontrollü aktif güç filtrelerinin çok seviyeli çalışabilmeleri daha zordur. Güç sistemlerine entegre edilen aktif filtrelerin kullanım güç aralığı oldukça geniştir. 1-2 KW'lık küçük güç sistemlerinden 10 MW'lık büyük ölçekli güç sistemlerine kadar kullanılabilirler. Daha yüksek güçlerde imalatları ve kullanılmaları, yarıiletken anahtarların henüz çok yüksek akım ve gerilim değerlerinde anahtarlama yapacak kapasitede üretilmemelerinden hem de yüksek maliyetler sebebiyle çok uygun olmamaktadır.

Aktif güç filtreleri düşük güçteki uygulamalarda hem bir fazlı sistemlere hem de üç fazlı sistemlere uygulanabilir. Bir fazlı sistemler genellikle bilgisayar, klima ve benzeri yüklerin yoğun olarak kullanıldığı mahallerde dağıtım hattının ortak bağlantı noktasında akım harmoniklerini filtrelemenin yanında, reaktif güç kompanzasyonu

içinde kullanılabilir. Tüm yüklerin beslendiği hatta uygulanacak büyük güçlü bir aktif güç filtresi yerine bir fazlı yüklerin yoğun olarak kullanıldığı hatlara ayrı ayrı küçük güçlü aktif güç filtrelerinin bağlanması ile yük değişimleri anında daha hassas harmonik filtrelenmesine olanak sağlar. Aktif güç filtrelerinin düşük güç uygulamalarında kullanılmaları yüksek frekansda çalıştırılabilmelerine, böylece filtreleme performanslarının artmasına olanak sağlayan en önemli avantajıdır [10].

Dengeli yüklenebilen üç fazlı güç sistemi için bir faz aktif güç filtresi kullanılarak her bir fazın akım harmoniği filtre edilebilir. Fazları dengesiz yüklenmiş veya simetrik olmayan kaynak gerilimine sahip üç fazlı güç sistemlerinde üç faz dört tel veya üç faz aktif güç filtrelerinin diğer konfigürasyonlarının kullanılması daha makul olabilmektedir [10].

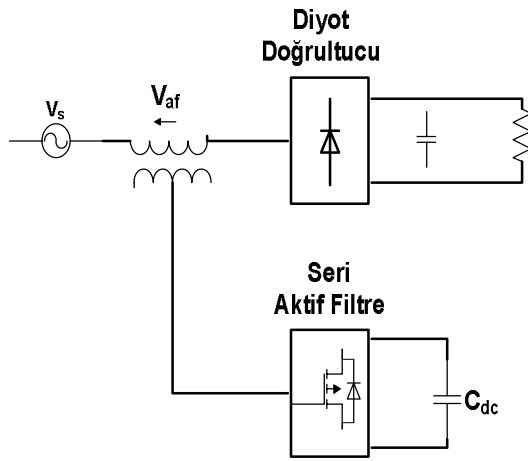
Aktif güç filtreleri güç sistemine bağlantı şekillerine göre 3 kısma ayrılır.

- Seri bağlı aktif güç filtresi
- Paralel bağlı aktif güç filtresi
- Seri/Paralel bağlı aktif güç filtresi

Seri bağlı aktif güç filtresi

Seri aktif güç filtreleri şebeke ile yük arasına seri olarak bir transformatör yardımı ile bağlanır. Gerilim harmoniklerinin olduğu güç sistemlerinde seri bağlı aktif güç filtresi kullanılmaktadır. Seri aktif güç filtreleri gerilim harmonikli nonlineer yükün genliğinde ve ters fazında bir harmonikli gerilim uygulamaktadır. Bir gerilim kaynağı gibi davranan seri aktif güç filtresi, gerilim harmoniklerinin filtrelenmesini sağlamaktadır [8]. Bu aktif güç filtreleri güç sistemindeki gerilim harmoniklerini filtrelemek için şebekeye harmonikli gerilimler enjekte ederler. Gerilim harmoniklerinin filtrelenmesine ek olarak güç sistemlerinde gerilim regülasyonu, gerilim kırpışma, tepe ve çukurlarının yok edilmesi amaçları için de

kullanılabilmektedir [11]. Seri aktif güç filtreleri güç sisteminde seri bağlı olduğu için yük akımının tamamı transformatör ve filtre devresinden geçmektedir. Bu da kullanılan transformatörün, her güç devresi için özel olmasına ve transformatör kayıplarının fazla olmasına sebebiyet verecektir. Ayrıca seri aktif güç filtresinden geçen yük akımı, devredeki elemanları ve yarıiletken anahtarları ısıtacak, böylece anahtarların verimlerinde ve çalışma ömürlerinde azalma olacaktır. Yük akımının filtreden geçmesi aynı zamanda şebeke empedansından etkilenmeleri bu filtrelerin dezavantajlarındandır.

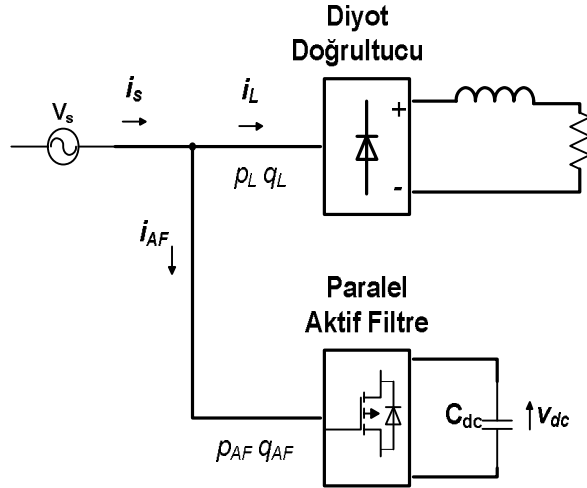


Şekil 3.9. Seri aktif güç filtresi.

Paralel bağlı aktif güç filtresi

Paralel aktif güç filtreleri bir bobin ile yüke paralel olacak şekilde güç sistemine bağlanırlar. Paralel aktif güç filtreleri akım harmoniklerinin olduğu güç sistemlerinde kullanılırlar. Paralel aktif güç filtreleri harmonikli yük akımı genliğinde ve ters fazda harmonikli akım güç devresine enjekte eder ve böylece harmonikli akım sağlayan bir akım kaynağı olur [8]. Paralel aktif filtreler güç sistemindeki akım harmoniklerini filtrelemenin yanında reaktif güç kompanzasyonunu aynı süreç içerisinde yapabilir, yani güç sistemine akım harmoniklerinin bastırılması esnasında diğer bir taraftan da sisteme akımın gerilimden ilerde olduğu kapasitif reaktif enerjiyi enjekte eder.

Paralel aktif güç filtresi ayrıca güç sistemine bağlantı noktasından okuduğu faz akımlarında dengesizlik olduğunda, faz akımlarının dengelenmesini sağlar.



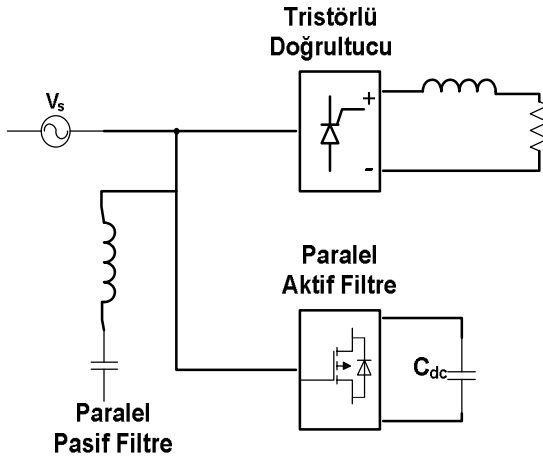
Şekil 3.10. Paralel aktif güç filtresi.

3.8.3. Aktif ve pasif filtrelerin birlikte bağlanması

Harmonikli bir güç sisteminde filtreleme işleminin tamamı aktif güç filtresi ile gerçekleştirildiğinde ilk kurulum maliyetleri çok fazla olmaktadır. İlk kurulum maliyetlerini düşürmek için güç sisteminde yüksek mertebeli harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtreler, diğer harmoniklerin filtrelenmesi için ise aktif filtreleri kullanmak uygun olmaktadır. Aynı zamanda bu güç sisteminde kullanılan filtrelerin de verimini arttırmaktadır.

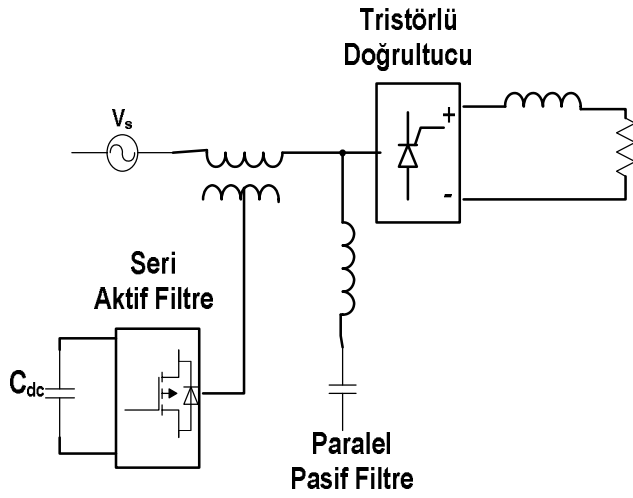
Aktif filtre ile pasif filtrenin güç sisteminin ihtiyacına göre farklı bağlantı şekilleri vardır. Bunlardan biri hem aktif filtrenin hem de pasif filtrenin yüke paralel bağlandığı harmonik filtreleme sistemidir. Bu hibrit yapıda paralel aktif güç filtresi yük akımında küçük genlikli harmonik bileşenlerini filtreler, paralel pasif filtre ise yük akımında ki büyük genlikli harmonikleri filtrelemektedir. Yüksek güçlü anahtarların kullanılmadığı bu tür tasarımların en önemli avantajı, kullanılacak filtre gücünün artmasına rağmen maliyetlerinde büyük artışlar olmamaktadır. Ancak pasif

filtrenin sürekli sistemde bağlı kalması ve bu nedenle kayıpların artması bu tasarımın dezavantajıdır [10].

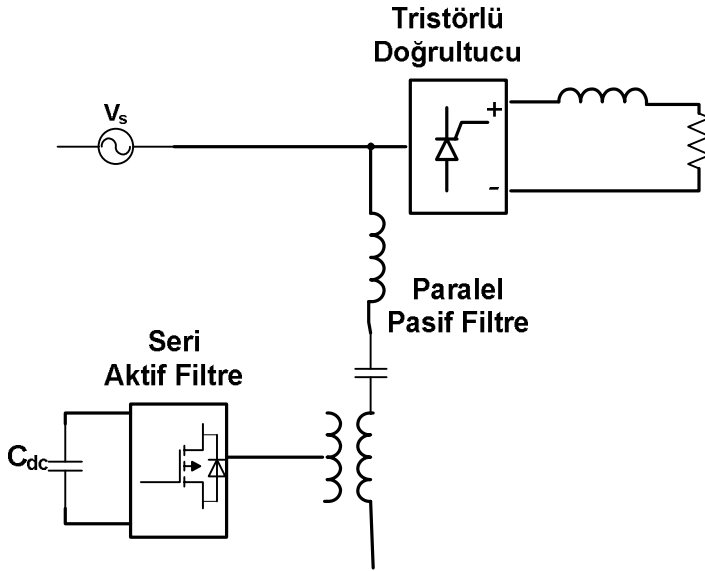


Şekil 3.11. Paralel bağlı aktif ve pasif güç filtresi.

Hem akım harmoniği hem de gerilim harmoniğinin olduğu güç sistemlerinde, seri aktif güç filtresi ile paralel pasif güç filtresi kombinasyonu kullanılabilir. Böyle bir sistemde seri aktif güç filtresi ile yüksek mertebeli gerilim harmonikleri filtre edilirken, aynı zamanda şebeke ile yük arasında harmonik izolasyonu ve gerilim regülasyonu sağlanırken, paralel pasif güç filtresi ile düşük mertebeli harmoniklerin filtre edilmesi sağlanabilmektedir.



Şekil 3.12. Seri bağlı aktif filtre ile paralel bağlı pasif güç filtresi.



Şekil 3.13. Paralel bağlı pasif filtreye seri bağlı aktif güç filtresi.

Güç kalitesini düzeltmek için seri aktif güç filtresi ile paralel aktif güç filtresinden oluşturulan yapıya birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicisi denilmektedir. Bu hibrit tasarımda seri aktif güç filtresi gerilim harmoniklerini filtreler ve aynı zamanda gerilim kararlılığını sağlamaktadır. Paralel aktif güç filtresi ise akım harmoniklerini filtreler ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmektedir. Her iki filtre yapısında

da kullanılan bobin ve kondansatör, filtrelerde ortak kullanılabilir. Kontrol yapısının karmaşıklığı ve yüksek maliyeti bu tasarımın en büyük dezavantajı olmakla birlikte talebin az olmasına neden olmaktadır [10].

Yukarıda bahsi geçen bağlantı tiplerinin yanında gerilim harmoniği içeren nonlineer yükler için seri aktif güç filtresi ile seri pasif filtrenin seri kombinasyonu ve paralel aktif güç filtresi ile seri pasif güç filtresinden oluşan tasarımlarında kullanımları mümkündür.

4. KOMPANZASYON

Teknolojik gereklilik ve ihtiyaçlar neticesinde günümüzde elektrik enerjisine olan bağımlılığımız günden güne daha da artmaktadır ve beraberinde talep yoğunluğunu da beraberinde getirmektedir. Elektrik enerjisinin üretildiği klasik sistemlerle çalışan santraller mevcut talepleri çoğunlukla karşılayabilmekte, enerji talebinin karşılanamadığı durumlarda ise enterkonnekte sistemimize bağlı olan komşu ülkelerden temin edilmek suretiyle elektrik enerji talebi karşılanabilmektedir. Ancak nüfus ve sanayileşme paralelinde artan enerji talebinin gelecek yıllarda daha da artması öngörülmektedir. Enerjiye artan talebi ve dışa bağımlılığımızı azaltmak adına yeni yatırımlarla yeni üretim tesisleri kurmak hem uzun zaman hem de çok büyük maliyetleri peşinden getireceği aşikardır. Ülkemizde hali hazırda elektrik enerjisi üretimini yaptığımız hidroelektrik ve termik santrallerimizin yanında yakın zamanda kurulması planlanan nükleer santraller halen tartışmalara konu olurken, bu santrallerin doğa olaylarından, çevresel etkilerinden, hammadde kıtlığından ya da kitlesel insan ölümlerine sebebiyet verebileceği gibi birçok zararlı yönleri göz önüne alındığında elektrik enerjisinde yeni üretim sahalarının ne denli problemleri beraberinde getireceği de düşündürücü olmaktadır. Bahsedilen bu durumları aşmak için alternatif enerji kaynakları üzerinde durduğumuz günümüzde enerjinin ne kadar kıymetli ve önem verilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Üretim sahasından son kullanıcıya kadar olan süreç içerisinde ürettiğimiz enerjiyi ne kadar verimli kullanabildiğimiz önem kazanmaktadır. Özellikle ülkemizde iletim ve dağıtım hatlarında kaybolan enerjinin 2-3 hidroelektrik santralin bir yıllık ürettiği güce denk olduğu tespit edilmiştir. Mevcut sistemimizde kayıpları azaltıp, enerji verimliliğinin sağlanması ile kaybolan enerjiyi geri kazanmak adına çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunlarla birlikte mevcut elektrik enerjisinin en kaliteli şekilde tüketiciye sunulması da önem arz etmektedir. Elektrik şebekesinde sabit frekans ve gerilim olması, gerilim kırışmalarının önlenmesi ve benzeri birçok durumun düzeltilmesi amaçlanmaktadır. Bu şekilde enerji kalitesini etkileyecek durumlar ve önlemleri gözden geçirilmektedir. Bu bağlamda sadece üreticinin değil, aynı

zamanda tüketicinin de enerjiyi verimli kullanmak ve enerji kalitesi üzerinde sorumluluklar alması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

İletim ve dağıtım hatlarında enerji kaybının birçok sebebi olmakla birlikte bunlardan en etkili olanı şebeke güç katsayısının birim değerden uzaklaşması ve aynı zamanda tüketicii de olumsuz etkileyen bir durum olarak ortaya çıkmasıdır. Zira iyi bir iletim hattı ve iyi bir şebeke için güç katsayısının ideal şartlar içerisinde 1 olması istenmektedir. En büyük enerji tüketiminin sanayide olması ve burada kullanılan yüklerin bir çoğunun reaktif güç çekmesi neticesinde güç katsayısının bozulması kaçınılmaz olmuştur. Şebekede güç katsayısını ve kalitesini etkileyen diğer bir husus akım ve gerilim harmonikleri olmuştur. Reaktif akım harmoniği içeren şebekelerde güç katsayısının bozulması daha zor durumlara ve istenmeyen koşulların oluşmasına neden olmaktadır. Güç katsayısını düzeltmek adına yapılan tüm işlemleri kompanzasyon olarak adlandırabiliriz. Bu bağlamda bir şebekede sadece reaktif gücün karşılanması yeterli kalmayıp, harmonikli akım ve gerilimlerin bastırılması da güç katsayısının düzeltilmesi bir kompanzasyon işlemi olarak yapılabilmektedir.

Kompanzasyon sistemleri hem elektrik enerjisinin üretim sahasında hem de tüketicinin kendi tesisinde yapılabilir. Üretim sahasında yapılan kompanzasyon daha genel bir çözüm olup, her bir tüketicinin kendi tesisinde yapacağı kompanzasyon iletim ve dağıtım hatlarındaki yüklenmeyi ve kayıpları azaltır, bununla birlikte gerilim ve frekans kararlılığı elde edilebilmektedir. Böylece kararlılığı ve verimliliği arttırılmış güç sistemi sağlanabilmektedir.

Kompanzasyon sistemlerinin hem şebekeye hem de tüketiciye faydaları şöyle sıralanabilir.

Şebekeye Faydaları:

- Şebekenin güç kapasitesi artar.
- Gerilim düşümü azalır.
- Şebeke kayıpları azalır, verimliliği artar.

Tüketiciye Faydaları

- Güç sistemi için ilk kurulum maliyeti azalır.
- Dağıtım şirketlerine cezai ödemeler gerçekleşmez.
- Toplam enerji maliyeti azalır.
- Gereksiz yüklenmeler azaldığı için kayıplar azalır, verimlilik artar.

4.1. Şebeke Tipine Göre Güç Kompanzasyonu

Güç kompanzasyonu hem orta gerilim şebekelerinde hem de alçak gerilim şebekelerinde yapılabilmektedir. Mevcut güç sisteminin durumuna ve en etkin kompanzasyonun gerçekleştirilebilme imkanları göz önüne alınarak yöntem seçimi yapılabilir. Alçak gerilimde kompanzasyon yöntemi genellikle tercih edilmekte ve bunun da tüketici tarafından yapılması talep edilmektedir.

4.1.1. Orta gerilimde kompanzasyon

Orta gerilim hatlarında, hatta ait omik, endüktif ve kapasitif değerlerin vektörel toplamı hattın empedansını vermektedir. Enerji hattından çekilen akımın karesi ve hat endüktansının çarpımı neticesinde, enerji hattından endüktif reaktif enerji çekilmektedir. Benzer şekilde enerji hattından çekilen akımın karesi ve hat kapasitansının çarpımı neticesinde ise enerji hattında kapasitif reaktif enerji üretilmektedir. Bir enerji hattından karakteristik güç olarak tabir edilen bir güç çekildiğinde, enerji hattında ki endüktif ve kapasitif reaktif güç birbirine eşittir. Bu nedenle iletim hattından çekilen reaktif güç sıfıra düşürüldüğünden dolayı enerji hattının kayıpları ve gerilim düşümünün azalması yanında gerilim kararlılığı da artar. Enerji iletimi için bu durum en ideal halidir. Ancak karakteristik güç, termik yükleme sınırının çok altında olduğundan ekonomik değildir. İletim hattından karakteristik gücün altında bir güç çekildiğinde, enerji hattında üretilen kapasitif reaktif güç, enerji hattından çekilen endüktif reaktif güçten fazla olmaktadır. Bu

durumda enerji hattındaki kapasitif reaktif gücün generatörler, reaktörler ve tüketiciler tarafından talep edilmemesi halinde, enerji sisteminde gerilim yükselmesi olur. Karakteristik gücün üstünde bir güç çekilmesi halinde ise, enerji hattından çekilen endüktif reaktif enerji, enerji hattında üretilen kapasitif reaktif enerjiden büyük olmaktadır. Bu durumda enerji hattından endüktif reaktif enerji çekilmekte, buna bağlı olarak enerji hattının kayıpları ve gerilim düşümü artmakta, hattın verimliliği azalmaktadır [12]. Orta gerilim hatlarında kompanzasyon karakteristik güç değeri göz önüne alınarak, senkron motorlar ve orta gerilim için özel üretim kondansatör bankaları vasıtasıyla yapılmaktadır.

Orta gerilim tarafında yapılan kompanzasyonun tasarımında reaktif güç bileşenini ortadan kaldırmanın dışında, gerilim regülasyonu, kırpışma etkisini azaltma, harmonik süzme gibi etkileri de büyük oranda göz önüne alınır.

Genellikle ergitme fırınlarının kullanıldığı demir-çelik endüstrisinde, orta gerilim motorlarının olduğu kömür ve maden işletmelerinde, maliyet ve işletme kolaylığı sebebiyle orta gerilimde kompanzasyon tercih edilmektedir.

4.1.2. Alçak gerilimde kompanzasyon

Alçak gerilimde güç kompanzasyonu genellikle tüketici tarafında olup, şebekeden çekilen endüktif reaktif enerjiyi karşılamak üzere yapılır. Tüketicie ait güç sistemindeki aygıtların ihtiyaç duydukları endüktif reaktif enerjiye karşılık tüketici tarafındaki kompanzasyon sisteminden şebekeye kapasitif reaktif enerji verilir. Böylece tüketici kendi güç sisteminde reaktif güç katsayısının düzeltilmesini temin etmiş olur. Alçak gerilim tarafında yapılan kompanzasyon sistemlerinde çoğunlukla kondansatörler tercih edilir.

4.2. Güç Sistemlerinde Kompanzasyon Yöntemleri

Güç sistemlerinde kompanzasyon uygulama yöntemleri, sistemin ihtiyacına ve elektrik yüklerinin özellikleri göz önüne alınarak genellikle 3 şekilde yapılabilmektedir.

- Bireysel Kompanzasyon
- Grup Kompanzasyon
- Merkezi Kompanzasyon

4.2.1. Bireysel kompanzasyon

Devamlı olarak devrede olan büyük güçlü yüklerin reaktif güç ihtiyacını temin etmek için, kondansatörler yüke paralel bağlanırlar ve müşterek bir anahtar üzerinden yük ile birlikte devreye alınıp çıkarılmaktadırlar[2].

Bireysel kompanzasyon güç sisteminde bulunan büyük güçlü tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını karşılamak üzere yapılan bir yöntem olduğu için küçük güçlü yüklere uygulanması ekonomik olmayacaktır. Bağlandığı yükün şebekeden çektiği endüktif reaktif güce karşılık güç sistemine kapasitif reaktif güç veren kondansatör değerinin ilk kurulum haricinde tekrar ayarlanmasının mümkün olmaması nedeniyle kondansatör kapasitesi dikkatli seçilmelidir. Kondansatörler yük ile birlikte devreye alınıp çıkarıldıkları için, merkezi kompanzasyondaki gibi kondansatörleri devreye alıp çıkaracak özel devrelere ihtiyaç duymazlar. Büyük güçlü asenkron motorların, transformatörlerin ve aydınlatma devrelerinin kompanzasyonun da bu yöntem tercih edilebilmektedir.

4.2.2. Grup kompanzasyonu

Aynı güç sisteminde birden fazla tüketicinin eş zamanlı çalışmaları mümkün olabilmektedir. Böyle bir sistemde her tüketicinin bireysel kompanzasyonu maliyet, işçilik ve bakım açısından sorun teşkil edebilmektedir. Birlikte devreye alınıp çıkarılan endüktif reaktif güç tüketicilerinin kompanzasyonunu birlikte yapabilmek mümkündür. Kondansatör grupları kontaktör ve benzeri diğer anahtarlama elemanları vasıtasıyla yüklerle birlikte devreye alınır veya çıkarılırlar. Grup kompanzasyonda birçok yükün ortak bir kondansatör grubuyla kompanse edilmeleri daha pratik ve daha düşük maliyetli olabilmektedir.

4.2.3. Merkezi kompanzasyon

Güç sistemindeki yüklerin çeşitliliği ve çalışma zamanlarının birbirlerinden farklı olması bireysel kompanzasyon ve grup kompanzasyon yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olur. Çok değişken yüklerin var olduğu sistemlerde kompanzasyonun bir merkezden yapılması esasına dayanır. Sürekli olarak devreye girip çıkan yüklerin şebekeden çektiği reaktif güç de sürekli farklılık gösterecektir. Bu reaktif gücün şebekeden sürekli olarak ölçülüp karşılığında kondansatörlerin devreye alınması otomatik olarak yapılmaktadır.

Merkezi kompanzasyonun yapılacağı sistemler iyi etüt edilmek zorundadır. Bu etüt neticesinde kompanzasyon sisteminin reaktif güç kapasitesi belirlenecektir. Aynı zamanda belirlenen bu gücün en aktif şekilde kompanzasyon yapılabilmesine olanak sağlaması, sisteme ait kondansatör sayısının ve güçlerinin belirlenmesine bağlıdır. Bu da kompanzasyonu sağlayacak merkezi sistemin kademelerinin belirlenmesiyle sağlanır. Yüklerin devreye alınıp çıkarılmasında değişen reaktif güce göre kompanzasyon kademeleri en uygun şekilde devreye alınır veya çıkarılır. Eğer kompanzasyon gücü ve kademeleri yanlış belirlenmiş ise güç sistemi yetersiz

kompanzasyondan dolayı güç katsayısı düzeltilmemiş olacak veya fazla kapasitif reaktif enerjinin şebekeye verilmesiyle aşırı kompanzasyona neden olacaktır.

Günümüzde uygulanan merkezi reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde, kompanzasyon sisteminin kademe sayıları arttırılmıştır. Böylece daha hassas kompanzasyona imkan sağlanmıştır. Ayrıca üç fazlı güç sistemlerinde kompanzasyon kademelerinden bazıları bir fazlı kullanılarak aydınlatma, bilgisayar ve benzeri bir fazlı yüklerin kompanzasyonuna olanak sağlayacaktır. Bir fazlı kompanzasyonun yapılması güç katsayısının düzeltilmesinin yanında, güç sisteminde aşırı ve dengesiz yüklenmeleri önleyecek hem de faz gerilimlerinin birbirinden farklı olmasının önüne geçecektir. Çok kademeli merkezi kompanzasyon sisteminin bir diğer avantajı ise kademelerden bazılarında bobin bağlanmasıyla aşırı kompanzasyon durumunda şebekeye verilen kapasitif reaktif enerjinin dengelenmesini sağlamasıdır. Merkezi kompanzasyonun dezavantajı ise ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

4.3. Güç Kompanzasyonunda Klasik Uygulama Yöntemleri

4.3.1. Senkron motorlar

Senkron motorlar rotatif mekanik işlevlerinin yanında, uyartım akımı değiştirildiğinde dinamik kompenzator olarak çalışan bir elektrik makinasıdır. Nominal uyartım akımının altındaki değerlerde şebekeden endüktif reaktif güç çekerken, uyartım akımı nominal değerinin üzerine çıkarılıp aşırı uyartım yapıldığında ise şebekeye kapasitif reaktif enerji sağlamış olurlar. Uyartım akım miktarının değiştirilmesi hem reaktif güç miktarını hem de reaktif gücün endüktif veya kapasitif değerde olmasını belirleyecektir. Senkron makinaların tepki süreleri hızlı değişimler için yavaş kalabilir. Genellikle orta gerilim seviyesinde ve büyük güçlerde kullanılmaları daha ekonomik ve uygun olmaktadır. Senkron makinalar kompenzator olarak boşta çalışırken şebekeden kayıplarını karşılayacak kadar aktif

güç çekerler. Senkron makinelerin hareketli parçaları olması nedeniyle bakım ve işletme masrafları fazladır. Bununla birlikte senkron makineler dengesiz yüklerin kompanzasyonunda da uygun olmayabilirler.

4.3.2. Kondansatör gruplarının kontaktörlerle anahtarlanması

Kontaktörler mekanik anahtarlardır. Bobinlerine uygun enerji verildiğinde bir elektromıknatıs olarak çalışır ve kontaklarını yer değiştirir. Günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerden biri kondansatörlerin kontaktörlerle anahtarlandığı sistemlerdir. Kontaktör anahtarlamalı kondansatör kompanzasyonu küçük ve orta ölçekli kompanzasyon sistemlerinde hızlı yüklerin bulunmadığı güç sistemlerinde etkin bir kompanzasyona imkan sağlar. Özellikle merkezi kompanzasyon sistemlerinde reaktif güç kontrol röleleri ile kontrol edilen kontaktörler, kondansatör gruplarının istenilen şekilde anahtarlanmalarına olanak sağlarlar. En büyük avantajlarından biri ekonomik olmalarıdır. Fakat bunun yanında bazı mühim dezavantajları da vardır. Mekanik çalışma sistemleri nedeniyle çok sık arıza verebilirler. Kontaktörlerin kapanma ve açılma zamanlarında kontaklar arasında ark oluşması hem kontakların ömürlerini azaltacaktır hem de güç sisteminde ani gerilim dalgalanmalarına neden olacaktır. Gerilim dalgalanmaları da hassas yüklerin üzerinde olumsuz etkilere sebebiyet verecektir. Aynı zamanda kontaktör kontaklarında arkaların sürekli oluşması belli bir çalışma zamanından sonra kontakların birbirine yapışmasına da sebep olacaktır.

Kontaktörle anahtarlanan kompanzasyon sistemlerinde kontaktörün bobinine gelen sinyal kesildiğinde kondansatör grubunu devreden çıkarır. Kondansatörlerin devreden çıkma anı istenildiği şekilde belirlenemediğinden ve anlık bir olay olmadığından ki kontaktörlerin güçlerine göre açma zamanları artış göstermektedir, böyle bir durum kondansatörlerin devreden şarjlı olarak devreden çıkmalarına neden olur. Kondansatörlerin şarjlı iken devreye tekrar alınmaları şebekede çok büyük ani akım ve gerilim dalgalanmalarına sebebiyet verecektir. Bu durumun önüne geçebilmek için kondansatörler üzerine deşarj dirençleri eklenir. Deşarj dirençlerinin

değerleri kondansatörün belli bir süre içinde deşarj olmasını sağlayacak şekilde seçilirler. Deşarj direnç değeri küçük seçilirse kondansatörün deşarj süresi kısılır, fakat kondansatör devrede iken direnç tarafından harcanan güç miktarı artar ve direnç ısınır, bu da istenmeyen bir durumdur. Deşarj direnç değeri büyük seçilirse kondansatör devredeyken direnç tarafından harcanan güç azalır, fakat bu kez kondansatör deşarj süresi dolayısıyla kondansatörün tekrar devreye girme zamanı uzamış olur. Tüm bu durumlar kondansatörlerin kontaktörle anahtarlama durumunda, hızlı devreye girip çıkan yüklerin kompanzasyonunda bu yöntemin yetersiz kalacağını göstermektedir. En uygun şartlar içerisinde kontaktör ile anahtarlanan kondansatörün devreden çıkıp tekrar devreye girme süreleri 5-10 saniye de gerçekleşebilecektir. Asansörler, ark kaynakları ve benzeri diğer ani yükler kondansatörün devreye girme süresi olan 5-10 saniye aralığında bir veya birkaç defa devreye girip çıkma ihtimalleri mümkün olabilmektedir. Böyle bir durumda reaktif güç rölelerinin kompanze edilecek gücü algılamaları mümkün olsa bile, kontaktörle anahtarlanan kondansatörlerin bu denli hızlı devreye girip çıkmaları mümkün olamamaktadır. Bu durumda ani yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde kontaktörler ile yapılacak bir kompanzasyon uygun olmayacak ve yetersiz kalacaktır.

4.4. Güç Kompanzasyonunda Modern Yöntemler

Güç sistemlerinde uygulanan klasik kompanzasyon sistemleri, gerek yük çeşitliliğinin ve kullanımının artması, gerek enerji verimliliği konusundaki enerji şirketlerinin tutumu nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonunun yetersizliği hem tüketiciyi hem de şebekeyi olumsuz etkileyebilmektedir. Yetersiz kompanzasyon tüketicinin güç sisteminde akım ve gerilim dalgalanmalarına, enerji kayıpları ve maliyetlerinin artmasına neden olacaktır. Şebeke tarafında ise en büyük sorun gerilim kararsızlığına sebebiyet verecek olmasıdır. Bu durumların önüne geçebilmek için daha hızlı ve esnek anahtarlama yapabilen sistemler düşünülmüştür. Bunun neticesinde reaktif güç kompanzasyonunda tristör anahtarlama üniteleri tasarlanmıştır.

Var olan alternatif akım iletim sistemlerinde, yük dalgalanması gerilim kararlılığı ve gerilim çökmeleri en önemli problemleri oluşturmaktadır. Enerji sistemlerinde fiziksel değişiklik yapmadan kapasite artırımına gitmenin yolu FACTS (Flexible AC Transmissions Systems) cihazlarını kullanmaktır. FACTS cihazlarının geliştirilmesi için uzun yıllardan beri araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir [13].

Reaktif güç kompanzasyon sistemi uygulamalarında karşılaşılan problemlerinden en önemlisi, büyük ve dengesiz yükler tarafından çekilen reaktif güçteki hızlı değişimlere hızlı cevap verilememektedir. Bu nedenle dinamik yüklerin kompanzasyon ihtiyacı karşılanamamakta ve eksik yada fazla kompanzasyon yapılmaktadır. Yük kompanzasyonu amacıyla klasik yöntemler yerine Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri – FACTS olarak ifade edilen modern kompanzasyon yöntemlerinin kullanımı uygun bir çözüm olmaktadır. FACTS’ler özellikleri ve yapıları itibariyle, hızlı cevap verebilme, her fazı ayrı ayrı kontrol edebilme ve bu sayede dengesiz yükleri kompanze edebilme özellikleri sayesinde, enerji sistemlerinin kompanzasyon problemlerine çözüm olmaktadır. En genel tanımıyla FACTS’ler, şebeke gerilimiyle güç elektroniği elemanlarını ve metotlarını birleştiren elektronik yapılardır [14].

FACTS kontrolörlerin farklı tipleri IEEE, CIGRE ve EPRI dokümanlarında tanımlanmaktadır. FACTS cihazları şu şekilde sınıflandırabiliriz [15].

1. Tristöre Dayalı FACTS Cihazları

I. Statik VAR Kompenzatörü (SVC)

- Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)
- Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR)
- Tristör Kontrollü Kapasitör (TCC)
- Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

II. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

- III. Tristör Kontrollü Faz Değiştirici (TCVP)
2. Kapıdan Kapanabilir Anahtara (GTO) Dayalı FACTS Cihazları
3. Statik Kompensatör (STATCOM)
4. Birleştirilmiş Güç Akış Cihazı (UPFC)

4.4.1. Statik VAR kompenzatoru (SVC)

IEEE tarafından statik VAR kompensatör, elektrik güç sisteminde reaktif güç akışını kontrol edecek şekilde ayarlanabilir kapasitif veya endüktif akım çıkışlı, paralel bağlı statik VAR generatörü veya tüketicisi olarak tanımlar.

Bir SVC sisteminin kurulumunda dört temel amaç vardır.

- Sabite yakın seviyelerde gerilimi korumak
- Güç sistem kararlılığını geliştirmek
- Güç faktörünü iyileştirmek
- Faz dengesizliğini düzeltmek [16]

İdeal bir SVC aktif veya reaktif güç kaybı olmayan, gerilimi referans gerilime eşit değişmeyen ve çok hızlı cevap verebilen bir kontrolör olarak tanımlanmaktadır [17]. Hızlı reaktif güç ve gerilim ayarlama desteği sağladıkları için yaygın olarak kullanılırlar. SVC’de tristör tetikleme açısı kontrolü hemen hemen anında hızlı bir tepki vermeye olanak sağlar [18].

Güç sisteminde, reaktif güç değişimleri, yüklerin devreye alınması ve çıkarılması ile benzeri durumlar gerilim dalgalanmalarına neden olurlar. Özellikle ani yüklerin güç sistemindeki varlığı ve sayısı gerilim dalgalanmalarını daha sık ve müzmin bir hal almasına neden olur. Nominal değerinde stabilize tutulmayan gerilim hassas alıcıların olduğu sistemlerde büyük sorunlara ve arızalara mahal verebilir. Bu nedenle anahtarlamalı reaktif güç kompanzasyon yöntemleri kararlı durum sistem gerilimlerini öncelikle kontrol etmek için kullanılır [19].

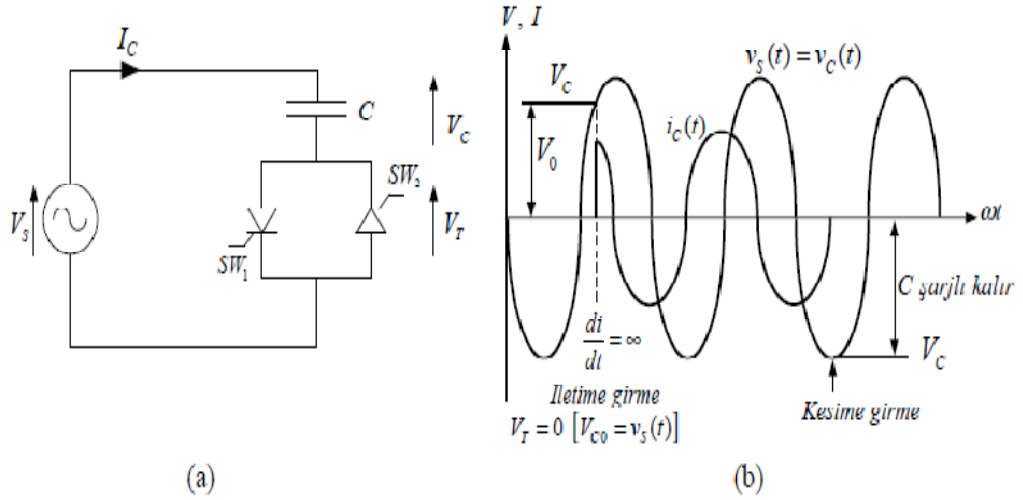
Bir fazlı yüklerin yoğun olarak bulunduğu veya fazların eşit yüklenmediği güç sistemlerinde fazlar arasındaki dengesizlikler ve bir faz kompanzasyonu klasik yöntemlerle çözülemeyen problemlerdendir. Fakat SVC sistemleri dengesiz yüklenmelerin olduğu sistemlerde de başarılı bir gerilim kararlılığı ve kompanzasyon sağlarlar.

SVC'ler günümüzde reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kararlılığını sağlamak için geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Hem orta gerilim seviyesinde, hem de alçak gerilim sistemlerinde kullanılabilirler. Ark kaynakları, asansörler gibi hızlı yüklerin bulunduğu sistemlere ek olarak rüzgar türbinlerinde kullanımları da yaygındır.

Tristör anahtarlamalı kapasitör

Tristörün tam veya sıfır iletim kontrolü ile etkin reaktansı adım adım değiştirilen, paralel bağlı tristör anahtarlamalı bir kapasitördür. TSC, alternatif akım kısıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelmektedir. Buna ilaveten devresindeki indüktansın iç direnci bulunmaktadır. Bu indüktans tetiklemenin olmadığı durumlarda meydana gelecek anlık akım yükselmelerini sınırlamak için kullanılır [15, 20].

Şekil 4.1'de gösterilen devrede TCS, çift yönlü tristör anahtar ile seri bağlı bir kondansatörden oluşmaktadır. İdeal bir gerilim kaynağından beslenen bu devrede ne direnç ne de reaktans bulunur. Mevcut analiz anahtarın kapatıldıktan sonra akımda kısa süreli iki durum meydana getirir [20].

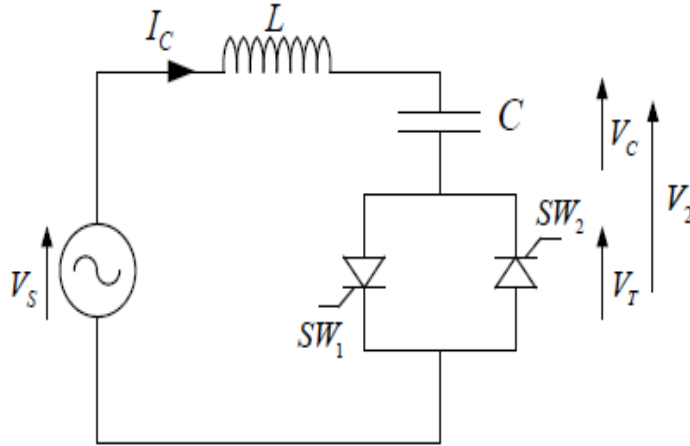


Şekil 4.1. Tristör anahtarlama kondansatöre ait
(a) basit güç sistemi modeli ve (b) akım ile gerilim dalga şekilleri

- Tristörlerden biri iletme sokulduğunda, eğer kondansatör gerilimi kaynak gerilimine eşit değilse, tristör üzerinden ani büyük bir akım akmaya başlar ve kısa bir zamanda kondansatör kaynak gerilimiyle şarj olur. Tristör, üzerinden geçen akımın meydana getirdiği zorlanmaya karşı dayanamaz ve bozulur.
- Kondansatör gerilimi, kaynak gerilimine eşit olduğunda tristörlerden biri ateşlenirse, tristör üzerinden geçen akım Şekil 4,1’de gösterildiği gibi ani olarak kararlı durum akım değerine ulaşır. Akımın büyüklüğü, kararlı hal değerini aşmamasına rağmen, di/dt değeri tristörün dayanabileceği di/dt değerinden büyük olacaktır. Burada di/dt sonsuza yakındır ve tristör bu zorlanmaya dayanamaz ve bozulur.

Bu nedenlerden dolayı TCS devresinin basit modeli uygun değildir [14, 20].

Yukarıda bahsedilen problemlerin üstesinden gelmek için Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kondansatör ile seri bağlı sönümleyici bir reaktör sisteme dahil edilir.



Şekil 4.2 Seri reaktörlü tristör anahtarlama kondansatör sistemi.

4.5. Kompanzasyon Sistemlerinde Rezonans Problemi ve Harmonik Filtre Reaktörleri

Güç sistemlerinde karşılaşılan büyük problemlerden biri de rezonans hadisesidir. Rezonans, endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın birbirine eşit olup, güç sisteminin empedansının hat direncine eşit olması durumudur. Seri ve paralel rezonans olarak ikiye ayrılabilir. Seri rezonans durumunda güç sisteminde empedans ihmal edilebilecek kadar küçük olan dirence eşit olacağından, güç sisteminden çok büyük ve sonsuz akımların geçişini meydana getirecektir. Paralel rezonans ise hattın empedansı büyük olup, hattan geçecek akım da küçük olacaktır. Fakat bu durumda güç sisteminde gerilim seviyesinin aşırı yükselmesine sebep olabilecektir. Hem seri rezonans hem de paralel rezonans anında güç sistemini teşkil eden iletkenler, transformatörler, kondansatörler, sisteme bağlı alıcılar ve benzeri bütün elemanlar akım ve gerilim yükselmelerinden etkilenecek olup, güç sisteminde büyük hasarlara sebep olabilecektir.

Güç sistemlerinde rezonans hadisesinin temel frekans mertebesinde gerçekleşmesi olası bir durum olmayabilmektedir. İdeal bir kaynakla beslenen alıcıların lineer karakteristikli olup, sinüsoidal akım çekmeleri durumunda sistemde hem temel frekans hem de diğer frekans mertebelerinde rezonans oluşması öngörülmemektedir. Fakat bu tip lineer sistemler ile karşılaşmak çok nadir olabilmektedir. Günümüzde yarıiletken anahtarlarla yapılan cihazların artması, enerji tüketiminin en yoğun olduğu sanayi dallarında ark fırınları, ark kaynakları ve benzeri lineer karakteristikli olmayan yüklerin kullanılması neticesinde hem tüketici tarafında hem de şebeke tarafında harmoniklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Harmoniklerin hem şebekeye hem de tüketicilere zararlı birçok etkilerinin yanında, kompanzasyon sistemlerinin bulunduğu güç sistemlerinde rezonansa sebebiyet verebilmektedirler. Kompanzasyon için tesis edilen kondansatörlerin reaktansı ile şebeke empedansı, sistemde baskın olan harmoniklerin etkisiyle rezonansa girebilmektedir. Örneğin bir fazlı doğrultucuların olduğu bir güç sisteminde etkin olan 3. dereceden harmonikler nedeniyle 150 Hz frekans mertebesinde güç sisteminin rezonansa girme olasılığı artabilmektedir. Benzer olarak 3 fazlı doğrultucuların bulunduğu güç sisteminde ise 5. ve 7. derecedeki harmoniklerin etki etmesi neticesinde 250 Hz veya 350 Hz mertebesinde sistemin rezonansa girme riski mevcut olabilmektedir.

Harmoniklerin varlığı hem şebeke hem de tüketici tarafındaki olumsuz etkileri sebep olması nedeniyle, harmoniklerin belirli standartlar ile kontrol altına alınması öngörülmektedir. Harmoniklerin yoğun olduğu işletmelerde pasif filtre, aktif filtre ve benzeri uygulamalar gerçekleştirilerek, harmoniklerin elimine edilmesi temin edilebilmektedir. Kompanzasyon sistemlerinin mevcut olduğu güç sistemlerinde ise harmoniklerin etkisi, hem sistemin tam kompanze edilememesine hem de rezonansa girmesine sebebiyet verebilmektedirler. Kompanzasyon sistemlerinin bulunduğu güç sistemlerinde harmoniklerin etkisiyle meydana gelebilecek rezonans hadisesini engellemek için harmonik filtre reaktörleri kullanılmaktadır. Harmonik filtre reaktörleri, güç sisteminde baskın olan harmonik frekansında meydana gelebilecek rezonansı önlemek adına, şebeke empedansına ek olarak endüktif reaktans olarak etki

edebilmektedirler. Harmonik filtre reaktörleri her bir kademedeki kondansatör grubuna seri olarak bağlanırlar ve o kondansatör grubu ile devreye alınabilir veya çıkartılabilirler. Harmonik filtre reaktörlerinin, seri bağlanacağı kondansatörün kapasitif reaktansına, sistemde baskın olan ve olası rezonansa sebebiyet verebilecek harmoniklerin alt bir frekans mertebesi göz önüne alınarak endüktans değerleri hesap edilebilmektedir. Bu nedenle kompanzasyon sistemi tasarımı yapılırken harmonik filtre reaktörlerinin, kondansatör grupları ile birlikte belirlenmesi ve uygulanacak sistemde değişken yük durumlarına göre etkin olabilecek harmoniklerin ölçümleri yapılmak suretiyle belirlenmeleri gerekebilmektedir. Belirlenen standartlara göre harmonik filtre reaktörleri 3. harmoniğin baskın olduğu sistemler için 134 Hz mertebesinde, 3. ve 5. harmoniğin baskın olduğu sistemler için 189 Hz mertebesinde ve 5. ve 7. harmoniğin etkin olduğu sistemler için ise 210 Hz mertebesinde rezonans frekansı baz alınarak üretilmektedirler. Harmonik filtre reaktörleri sistemde rezonans hadisesini önlemenin yanında, sistemde pasif harmonik filtre görevi yapabilmekte ve kondansatör akımlarını sınırlandırmasına da yardımcı olabilmektedir.

4.6. Reaktif Güç Kontrol Röleleri

Özellikle merkezi kompanzasyon yönteminin uygulandığı tesislerde, güç sisteminden aldığı örnekleme bilgilerine dayanarak reaktif güç kompanzasyon işlemini yöneten ve yönlendiren aygıtlar olarak tanımlanabilir. Reaktif güç kontrol rölesi yapısı itibariyle güç sistemine ait 3 faz akım ve gerilimleri örnekleyebilecek ölçme devrelerinden ve kondansatör gruplarını yönetecek bir kontrol devresinden oluşmaktadır. Alçak gerilimde kullanılan tiplerinde üç faza ait gerilimler doğrudan bağlanmakla beraber, faz akımları için 1 veya 5 amperlik girişler bulunmakta ve bu girişlere genellikle akım trafoları vasıtasıyla bağlantı yapılabilmektedir. Akım ve gerilim ölçümlerini gerçekleştirmekle beraber reaktif güç rölesi, güç sistemine ait aktif güç, reaktif güç, görünür güç, güç katsayısı, frekans ve harmonik seviyesini hesaplayabilmektedir.

Reaktif güç kontrol rölesi kullanıcı tarafından belirlenen ayarlara, kademe sayısına ve kademelere bağlı olan kondansatör gruplarının kapasitif reaktif güç değerlerine göre, güç sisteminin kompanzasyon ihtiyacını karşılayabilmektedir. Günümüzde üretilen reaktif güç kontrol rölelerinin kademe sayıları genellikle 6, 10, 12 gibi olmakla beraber 18 kademeye kadar çıkabilmektedir. Kademelere bağlanan kondansatörlerin kapasitif reaktif güçleri manuel olarak kullanıcı tarafından reaktif güç rölesine tanıtılırken, yeni nesil reaktif güç kontrol röleleri hangi kademelere kondansatör bağlı olduğunu ve bu kondansatörlerin kapasitif reaktif güç değerlerini tespit edebilmektedirler. Reaktif güç kontrol röleleri güç katsayısını düzeltmek için, kademeleri yeterli kompanzasyon sağlanıncaya kadar sırasıyla devreye almakta veya çıkarabilmektedirler. Fakat kademelerin sırayla devreye alınıp çıkarılmaları her koşulda yeterli kompanzasyonu sağlayamadığı için, reaktif güç rölelerinin kondansatör kademelerini rastgele ve en iyi reaktif güç talebini sağlayacak biçimde devreye alınıp çıkarılabilmelerini sağlayacak tipleri de üretilmektedir. Kondansatörlerin şarjlı olarak devreye girmelerinde ortaya çıkabilecek yüksek akım ve gerilim dalgalanmalarını önlemek adına, reaktif güç kontrol röleleri her kademenin devreden çıkışına mukabil bir zamanlayıcı ile kondansatörün deşarj süresi boyunca tekrar devreye girmesini önlemektedirler. Reaktif güç kontrol röleleri ayrıca, kademelerde bağlı olan kondansatörlerin arızalanmalarını tespit edebilmekte ve arıza ikazı verebilmektedirler.

Kullanıcıların anlık olarak kompanzasyon ve güç sistemi ile bilgilendirilebilmelerini sağlamak adına, bilgisayar haberleşmeleri de mevcut olabilmektedir. Bilgisayar haberleşmesi ve kullanıcı arayüzü ile güç sistemine ait ölçülen üç faz akım ve gerilim bilgileri ile hesaplanan güç değerleri, güç katsayısı, frekans, harmonikler, kademelerde bağlı olan kondansatör güçleri ve sistemde aktif olan kademeleri göstermekle birlikte bir arıza sayfası ve arıza geçmişinin kullanıcı tarafından izlenebilmesini temin edebilmektedir.

Günümüzde reaktif güç kontrol rölelerinin özelliklerinin yanında bazı yetersizlikleri de mevcuttur. Ark kaynakları, asansörler ve benzeri gibi devreye hızlı girip çıkabilen

yüklerin kompanzasyonu bir sorun teşkil etmektedir. Zira bu yükler çok hızlı devreye girip çıkabilmekte ve bu esnada reaktif güç kontrol rölesinin güç sistemini ölçümlendirmesi, kademeleri devreye alma işlemi belli bir zaman aldığı için gecikmeler yaşanabilmektedir. Hatta reaktif güç kontrol rölesinin gerekli kademeyi devreye alması için geçen sürede, hızlı yük birkaç kez devreye girip çıkmış olabilmektedir. Aynı zamanda kondansatör kademesi devrede iken, hızlı yük devreden çıkmış olabilmektedir. Bu durum güç sisteminde ya eksik kompanzasyona yada aşırı kompanzasyona sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca devreden çıkan kademelerin tekrar devreye girmesi için belirli bir süre beklenmesi, günümüzde üretilen reaktif güç rölelerinin hızlı yüklerin kompanzasyonunda yeterliliklerini daha da azaltmaktadır.

Yük çeşitliliğinin artması sadece endüktif reaktif güç kompanzasyonunun yanı sıra kapasitif reaktif güç kompanzasyonunu da ihtiyaç haline getirmiştir. Bazı yüklerin şebekeden kapasitif reaktif güç çekmesi kompanzasyon kademelerinde endüktansların bulunma zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Buna ek olarak sıradan bir kompanzasyon sisteminde kondansatör kademeleri ve kapasitif reaktif güç değerleri sabit olup, reaktif güç kontrol rölesi sistemin ihtiyacı için gerekli optimum kademeyi devreye aldığı anda, sistemin ihtiyacı olandan fazla kapasitif reaktif enerjiyi şebekeye verebilmektedir. Buda hassas bir kompanzasyonu sağlayamamaktadır. Bu nedenlerden ötürü reaktif güç kontrol rölelerinin kademelerine endüktansların bağlanması da gerekmektedir. Fakat günümüz reaktif güç kontrol rölelerinde hem kademe sayısı yetersizliği hem de endüktif kademeleri devreye alacak yeterlilikleri olmadığı için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle bilgisayar yükleri ve aydınlatma gibi bir fazdan besleme yapılan güç sistemlerinde hem dengesiz yüklenmeler oluşmakta hem de bir fazlı kompanzasyon ihtiyacı doğmaktadır. Günümüzde üretilen reaktif güç kontrol röleleri bir fazlı reaktif güç ihtiyacını tespit etmekte yetersizdirler. Ayrıca bir fazlı kompanzasyonun yapılması durumunda bile, kademe sayısının azlığı sebebiyle gerekli kompanzasyon sağlanamayacaktır.

Çok sayıda küçük güçlü yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde kademe sayıları 6, 10, 12, 18 gibi sınırlı kademe sayısına sahip reaktif güç kontrol röleleri ile güç sisteminin ihtiyacı olan yeterli kompanzasyonu yapmak mümkün olmayacaktır. Zira sabit kapasiteli ve az sayıdaki kondansatör kademeleri gerekli reaktif gücü karşılayamayacak, bunun sonucunda eksik veya aşırı kompanzasyon yapılmış olacaktır.

5. DİNAMİK REAKTİFGÜÇ KOMPANZASYONÜNİTESİ TASARIMI

Güç sistemlerinde hızlı ve ani yükler olarak tabir edilen ark kaynakları, asansörler, vinçler, kaynak makineleri, rüzgar türbinleri, cer sistemleri ve benzeri yüklerin bulunduğu sistemlerin kompanzasyonu için geleneksel kompanzasyon yöntemleri yeterli performansı gösterememektedir. Geleneksel kompanzasyon sistemlerinde kondansatör gruplarını devreye almak için kullanılan kontaktörler kompanzasyon grubunu en az 6-7 saniye gecikme ile devreye alabilmektedir. Ayrıca devreden çıkan bir kondansatör grubunun tekrar devreye alınabilmesi için yaklaşık 30 saniye beklenmesi gerekmektedir. Yüklerin hızlı biçimde devreye girdiği ve çıktığı uygulamalarda kondansatör gruplarını devreye almak için kontaktörler yerine çok daha hızlı tristörler kullanılması gerekmektedir. Kullanılan bu tristörler kondansatör gruplarının devreye alınma zamanlarını en aza indirmektedir ($<10\text{ms}$). Ayrıca bu sistemlerde kondansatör şebeke geriliminin sıfır geçişlerinde tetiklendiği için kondansatörün ilk devreye alındığı anda çektiği yüksek inrush akımları engellenebilir. Dolayısıyla kondansatör grubunun ömrü uzamaktadır. Ayrıca kontaktör tarafından kondansatör grupları devreye alınırken veya devreden çıkartılırken oluşan geçici bozukluklarda ortadan kaldırılabilir.

Kompanzasyon işleminde kullanılan üçgen bağlı kondansatör gruplarını devreye almak için diyot-tristör modüller ile gerçekleştirilen statik anahtarlar kullanılabilir. Mevcut ticari ürünlerin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Ticari ürünlerin bazıları sadece bir faz akımını ölçmesi ve/veya sadece üç fazlı grupları kontrol edebilmeleri nedeniyle dengesiz sistemler için uygun değildirler.
- Mevcut reaktif güç kontrol rölelerinin grup sayısı genellikle 12 ile sınırlıdır. Hem üç fazlı hem bir fazlı grupların kontrol edilmesi durumunda bu grup sayısı 6+6 olmakta ve hassas bir kompanzasyon işlemini yerine getirmek mümkün olmamaktadır.

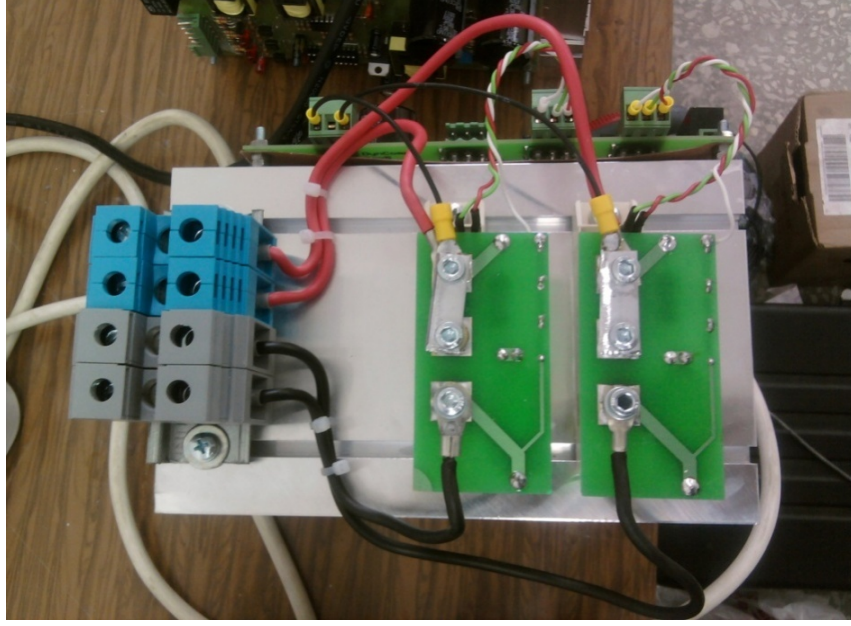
- Ticari olarak piyasaya sürülmüş reaktif güç kontrol rölelerinin bir kısmı tristör modülleri ile kullanılabilmektedir. Ancak bu reaktif güç kontrol rölelerinin ve tristör modüllerin fiyatlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu tip rölelerinde en fazla 12 grup kontrol edebildiği ve bunun 12 üç fazlı tristör çıkış, 6 üç fazlı tristör çıkış ve 6 bir fazlı tristör çıkış veya 6 üç fazlı tristör çıkış ve 6 üç fazlı kontaktör çıkış şeklinde belirlendiği görülmektedir. Her üç durumda da grup sayısının önemli oranda sınırlandırıldığı görülmektedir.

Bu bölümde yapılan çalışma; dinamik reaktif güç kontrol birimi (tristörlü güç kontrol modülleri), reaktif güç kontrol rölesi ve uzaktan izleme yazılımı olarak 3 bölüme ayrılarak incelenmiştir.

5.1. Tristör Modüllerin Tasarlanması ve Prototip Üretimi

Bu kısımda çalışmanın iki temel donanım bileşeninden birisi olan tristörlü güç kontrol modüllerinin güç devrelerinin tasarımı ve prototip üretimi açıklanacaktır. Bu güç kontrol modüllerinde statik anahtarlar kullanıldığından mekanik ömür ve kontak açma-kapama zamanı gibi sınırlamalar söz konusu değildir. Böylece kondansatör ve bobin kondansatör gruplarından oluşan kompanzasyon gruplarının hızlı biçimde devreye alınması ve çıkartılmasına imkan tanıyan statik güç modülleri tasarlanmıştır.

Bu amaçla tristör modüllerin güç devresi tasarlanmış ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Resim 5.1’de tasarlanan tristör modüllerin fotoğrafları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan güç modülleri AS27 tip soğutucu, tristör-diyot güç modülleri ve snubber devresinden oluşmaktadır. Şebeke geriliminde güvenle çalışabilmesi amacıyla 1700V’luk tristör-diyot modüller kullanılmıştır. Anahtarlama anında oluşan kısa süreli yüksek gerilimlerden anahtarların korunması amacıyla uygun değerlerde snubber elemanları kullanılmıştır.



(a)



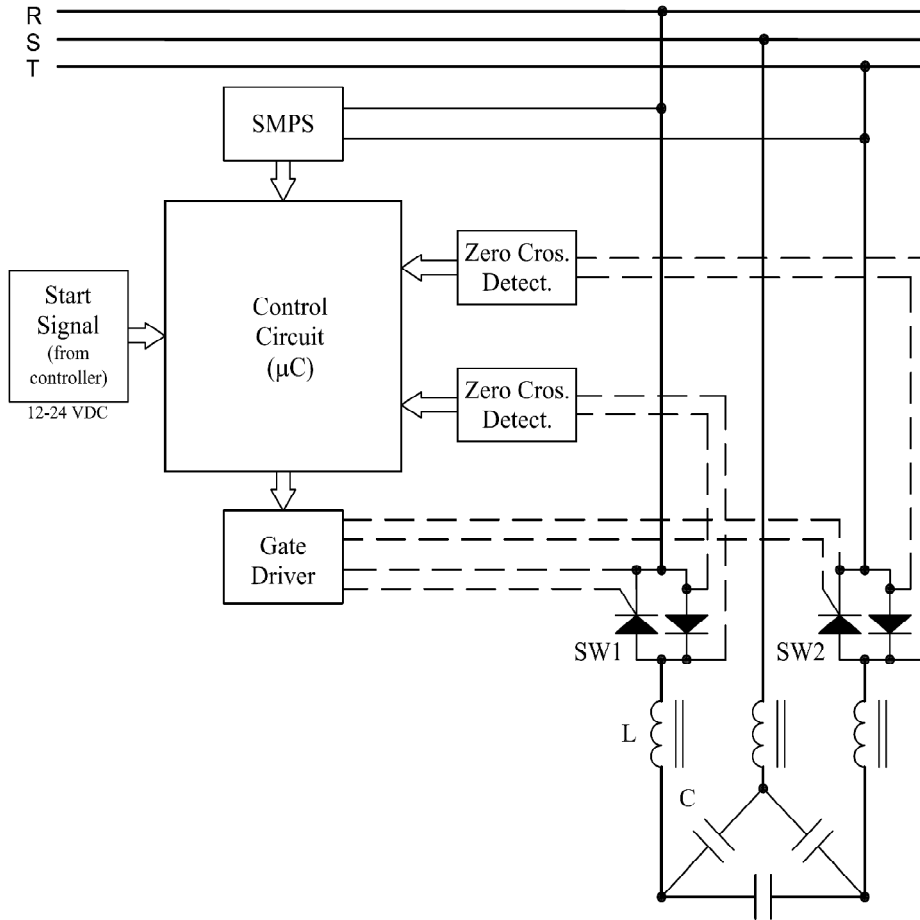
(b)

Resim 5.1. Tasarlanan tristör modüllerin güç devresi
a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü

Kondansatör gruplarının devreye alındığı ilk anda oluşan yüksek akımların engellenmesi için şebeke gerilimlerinin sıfır geçişlerinin algılanması ve tristörün bu sıfır geçiş noktalarına göre tetiklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle hem üç fazlı hem de bir fazlı gruplar için dinamik reaktif güç kontrol ünitesi tarafından üretilen sayısal sinyaller ile şebeke geriliminin sıfır geçiş anlarında tristörlerin tetiklenebilmesi için gerekli olan sürme kartı ve sıfır geçiş algılayıcıları tasarlanmıştır.

Kondansatörler devreye alınma anlarında uygun açıda ilettime geçirilmediklerinde nominal akımlarının 30 katına kadar geçici akımlar çekerler. Bu akımlar özellikle kondansatörlerin çok sık devreye alınıp-çıkarıldığı sistemlerde kullanılan elemanlar açısından olduğu gibi şebekede de ciddi problemlere neden olabilmektedir. Bu problemlerin önlenmesi için kondansatör gruplarını devreye alacak olan tristörlerin, kondansatör akımının sıfırdan başlayarak akmasını sağlayacak şekilde sürülmesi gereklidir. Bu amaçla tristörlerin sıfır geçiş noktalarında ilettime sokulması için mikrodnetleyici tabanlı bir devre tasarlanmıştır. Tasarlanan kartın üstünde sıfır geçiş algılayıcının yanında tristör sürme devresi ile bütün kartı besleyen bir güç kaynağı da bulunmaktadır. Bu güç kaynağı doğrudan üç fazdan beslenecek ve modülü besleyecek güçte tasarlanmıştır. Kartın giriş gerilim değeri modern kompanzasyon sistemleri ile klasik kompanzasyon sistemlerine uyum gösterebilmesi için hem 24 Volt DC, hem de 220 Volt AC ile çalışabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Geliştirilen kartta sinüsoidal şebeke gerilimi sürekli takip edilmektedir. Kondansatörün devreye girmesi gerektiği bilgisi herhangi bir kontak vasıtası ile verildiğinde, tasarlanan sıfır geçiş dedektörü sıfır geçiş noktasında tristörün ilettime geçirilmesi için gerekli girişi tristör sürme devresine iletmekte ve tristör en geç yarım periyot yani 10 ms. gibi küçük bir zamanda ilettime geçmesi temin edilmektedir. Tristör sürme devresinde primer gerilimine göre sekonder gerilimi 2 kat büyük olan darbe transformatörleri kullanılmıştır. Şekil 5.1’de tasarlanan sıfır geçiş ve tristör sürme devresi ile güç modülleri, Şekil 5.2’de ise mikrodnetleyici için hazırlanan

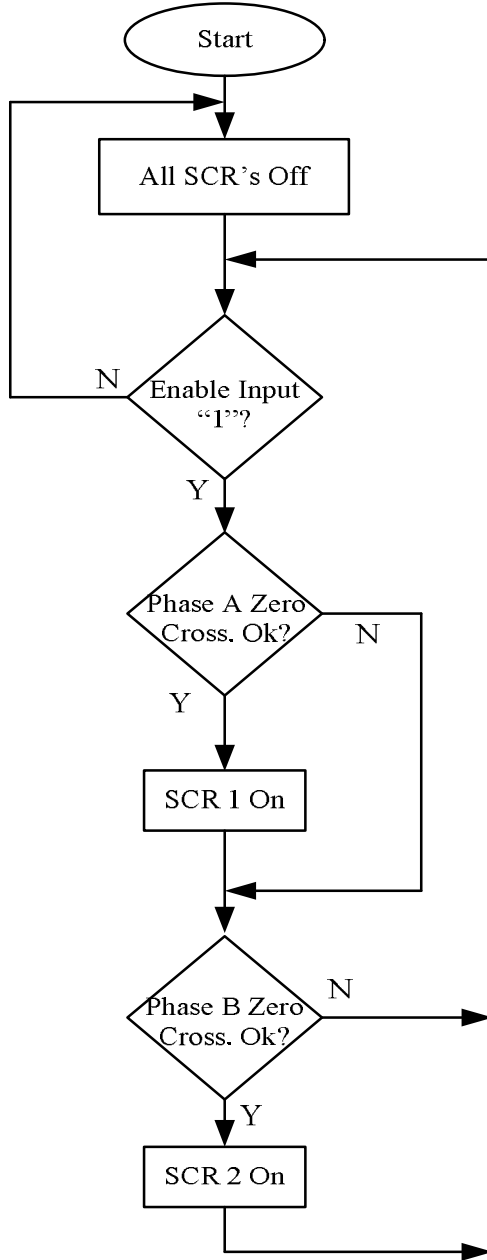
programın akış diyagramı görülmektedir. Bu devre hem bir fazlı hem de üç fazlı kompanzasyon ünitesi içinde kullanılabilir nitelikte tasarlanmıştır.



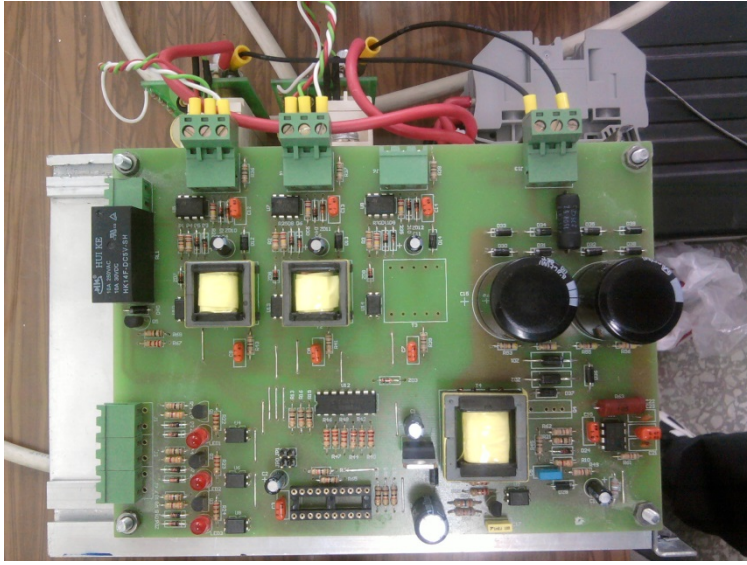
Şekil 5.1. Tasarlanan sıfır geçiş ve tristör sürme devresi ile güç modülleri.

Resim 5.2’de tasarlanan tristör güç modüllerinin kontrolü için bir sürme devresi görülmektedir. Tasarlanan kart sıfır geçiş algılayıcıları, kontrol donanımı, tristör sürme devresi ve universal güç kaynağından oluşmaktadır. Tasarlanan devre sürme komutu geldiği andan itibaren kondansatör akımı sıfırdan başlayacak şekilde ve max. 10ms gecikme ile tristör modüllerin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Şekil 5.3-Şekil 5.6’da 12,5 kVAR gücünde %7 lik reaktör kullanılan (%7 detuned filter) kompanzasyon grubunun geleneksel kompanzasyon kontaktörleri ve geliştirilen güç

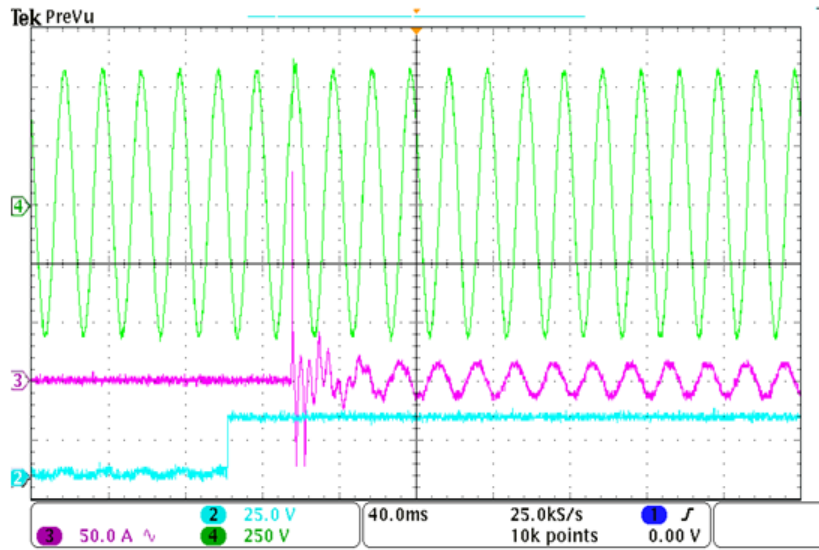
modülü ile devreye alınması ve devreden çıkartılması durumunda akım ve gerilim değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Mikrodenetleyici için hazırlanan programın akış diyagramı.



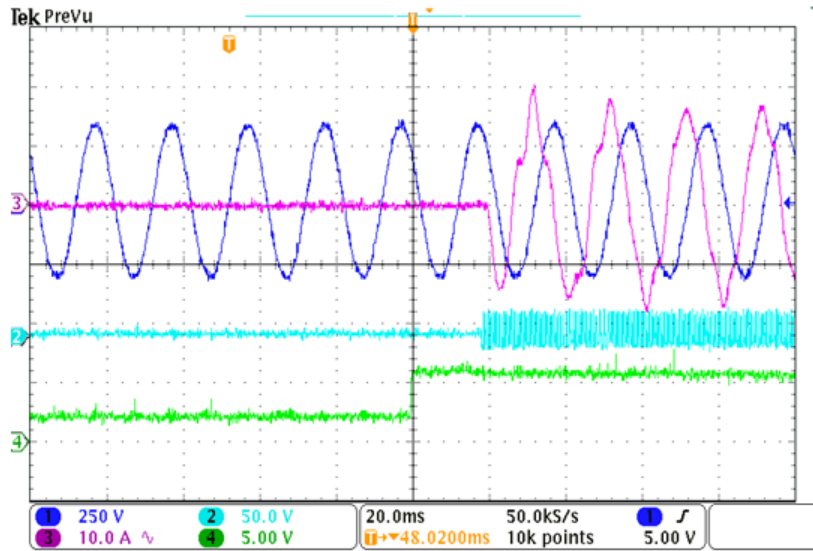
Resim 5.2. Tasarlanan sıfır geçiş ve tristör sürme devresi kartı.



Şekil 5.3. 12,5 kVAR, %7 detuned kompanzasyon grubunun kontaktör ile devreye alınması

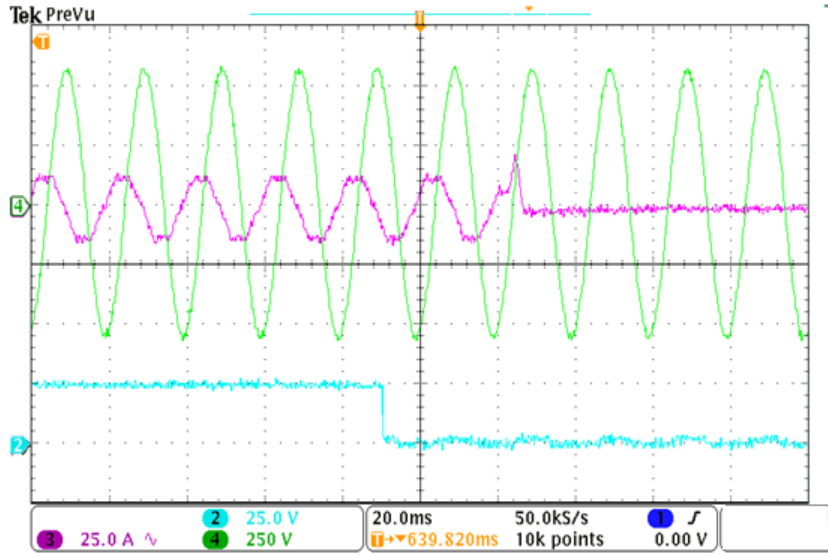
Şekil 5.3’de görüldüğü gibi tetikleme sinyali kontaktöre uygulandığı andan itibaren, kontaktör mekanik çalışması nedeniyle belirli bir gecikmeden sonra kondansatör grubunu devreye almaktadır. Kondansatör şarjlı olmadığı için ilk anda şebeke geriliminde şarj olmak isteyeceği için ilk devreye girme anında inrush akımı

geçmektedir. Bu akım değeri kondansatör nominal akımının 30 katına kadar çıkabileceği için, kondansatör ve anahtarlama elemanına zarar verebileceği gibi gerilim salınımlarına da neden olabilmektedir.

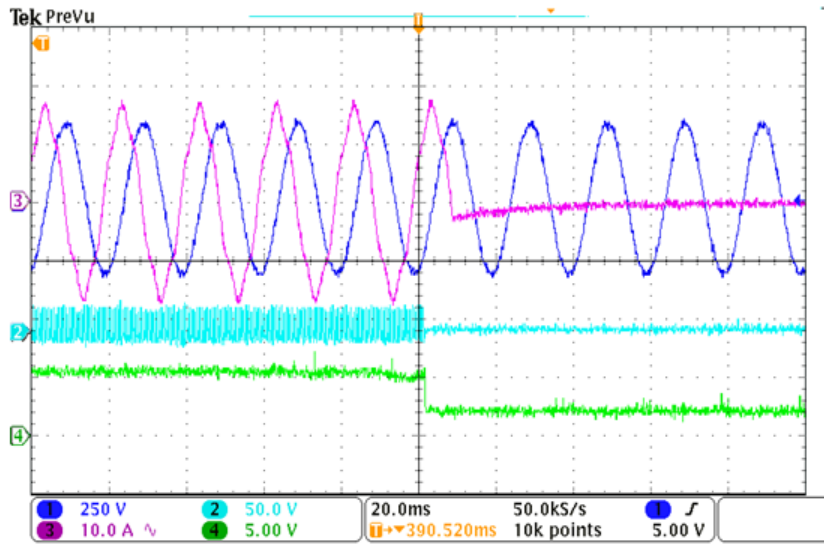


Şekil 5.4. 12,5 kVAR, %7 detuned kompanzasyon grubunun geliştirilen güç modülü kullanılarak devreye alınması

Şekil 5.4’de tasarlanan tristör modülleri ile devreye alınan kondansatör grubunun akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Tasarlanan tristör modülü Şekil 5.1’de verilen yapısı itibariyle kondansatörleri pozitif alternans süresinde şarj etmektedir. Tetikleme sinyali uygulandığında tristör modül kondansatör grubunu hemen devreye almamaktadır. Akımın sıfır geçişi algılandığında tristör tetikleme sinyali uygulanır ve kondansatörler devreye alınmaktadır. Bu esnada kondansatör şebeke gerilimi ile aynı seviyede şarjlı olduğu için, şarj olmak için kontaktörlü sistemde olduğu gibi inrush akımları çekmemektedir. Kondansatör inrush akımı çekmediği için bu yüksek akımlardan dolayı oluşan olumsuz durumların önüne geçilmektedir.



Şekil 5.5. 12,5 kVAR gücünde %7 detuned kompanzasyon grubunun kontaktör ile devreden çıkartılması



Şekil 5.6. 12,5 kVAR gücünde %7 detuned kompanzasyon grubunun geliştirilen güç modülü kullanılarak devreden çıkartılması

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da sırasıyla kontaktör ve tasarlanan tristör modülü ile kondansatör grubunun devreden çıkartılması durumundaki akım ve gerilim dalga

şekilleri verilmektedir. Kontaktöre verilen tetikleme sinyali kesildiği andan itibaren mekanik açma süresi sonrasında herhangi bir anda kondansatör devreden çıkmaktadır. Kondansatör akımının yüksek olduğu anda kontaktör kontaklarının açılması sırasında kısa süreli de olsa kontaklar arasında arklar meydana gelmektedir. Bu arklar zamanla kontakların ömrünü azaltmakta ve anahtarlama elemanının bozulmasına neden olmaktadır. Tasarlanan tristör modülü ile tetikleme sinyali kesildiği andan itibaren akımın sıfır geçişi beklenmekte ve kondansatör devreden çıkarılmaktadır.

5.2. Reaktif Güç Ünitesinin Donanım Ve Yazılımının Tasarlanması

Bu kısımda yükün çektiği akımları ve şebeke gerilimini okuyarak yükün reaktif güç talebini hesaplayacak ve buna uygun olarak gerekli olan kondansatör gruplarının devreye alınması için sinyali üretecek olan reaktif güç kontrol ünitesinin (reaktif kontrol rölesi) tasarımı açıklanmaktadır.

Rölede kullanılacak olan temel denetleyicinin yükün her bir faz için olmak üzere akım, gerilim, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri, toplam güçler ve çekilen akımın toplam harmonik miktarı (THD) gibi temel elektriksel büyüklükleri hesaplaması ve gerekli kompanzasyon kademesini seçip devreye alması gerekmektedir. Tasarlanan rölenin doğrusal olmayan yük durumunda da iyi sonuç verebilmesi için yük akım ve geriliminin harmonik bileşenlerini ve bunlardan istifade ile sistemin güç faktörünü hesaplaması gerekmektedir. Bu amaçla 32 bit kayar noktalı (floating point) bir işlemci sayısal işaret işlemcisi olan (DSP) TMS320F28335 seçilmiş ve FFT analizi yapılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. DSP ile üç fazlı sistemin akım ve gerilimlerinin FFT analizleri yapılmış ve bu sonuçlar kullanılarak sistemin aktif, reaktif, görünür güçleri, güç faktörü, 25. harmoniğe kadar harmonik bileşenleri hesaplatılmış ve akım-gerilim değerleri ile birlikte gösterge edilmiştir. Ancak DSP ile yapılan tüm analog örneklemeler ile 3 fazın akım ve gerilimlerin sadece FFT analizi 25 ms zaman almaktadır. Bir

periyottan daha uzun olan bu süreye güçlerin, akım ve gerilimin gerçek etkin değerlerinin hesaplanması için gereken zamanlar da eklenmektedir. Sonuç olarak hesaplama için gerekli zaman dinamik sistemlerde sıkıntı oluşturabileceğinden hesaplama zamanının kısaltılmasına yönelik araştırmalar yapılmış ve sonuçta hesaplama yükünün paylaşılabileceği böylece sürenin azaltılacağı ikinci bir işlemci kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece yapılması gereken hesaplamalar nedeniyle ortaya çıkan hesaplama yükü işlemciler arasında paylaşılması, hesaplama için gerekli olan sürenin kısaltılması ve sistemin dinamik tepkisinin iyileştirilmesi amaçlanmış ve çalışma sonucunda elde edilen verilerden de bu amaca ulaşıldığı görülmüştür. Burada kullanılan 2. işlemci (PIC18F252) hesaplama zamanının net biçimde görülebilmesi amacıyla geçici olarak hesaplanan değerleri gösterge etmek için ve DSP'yi basit işlerle meşgul etmemek üzere kullanılmıştır.

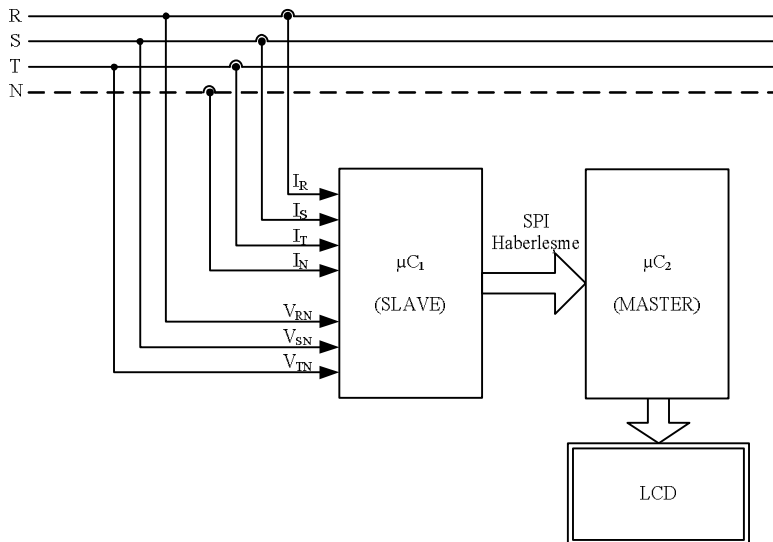
Kullanılan iki işlemci birbiri ile SPI üzerinden haberleşmektedir. SPI, Motorola tarafından bulunan ve sayısal tüm devrelerin (entegre devre-IC) seri haberleşmeleri için geliştirilmiş verimli haberleşme standartlarından birisidir. Açılımı "Serial Peripheral Interface" (Seri Çevresel Arayüz) dir. SPI eş zamanlı çift yönlü çalışabilen (full duplex), bilginin saat darbeleriyle birlikte eşzamanlı olarak aktarıldığı (senkron aktarma) bir seri haberleşme standardı olmakta ve pek çok devre tarafından donanımsal olarak desteklenmektedir. Bu haberleşmede veri transferi master-slave ilişkisi ile gerçekleşmektedir. SPI bir master cihaz ile birden çok slave cihazın seri yoldan haberleşmesini sağlar. Genelde sensörler, ses dosyaları, hafıza kartları, LCD'ler, mikrodenetleyiciler ve çeşitli bütünleşmiş cihazlar ile mikrodenetleyici arası veri iletişimde tercih edilmektedir.

Haberleşme türü seri olduğundan haberleşmeye yön verecek iki kavram ortaya çıkmaktadır. Bu kavramlardan biri olan master veri haberleşmesini başlatan cihaz olarak tanımlanmaktadır. Master tarafından veri transferi başlatıldıktan sonra veri her iki yönde de eşzamanlı olarak aktarılabilir. Alınan baytın anlamlı olup olmadığı bilgiyi alan cihazın yönetme durumuna kalmaktadır. Slave kavramı ise

master cihazın belirlediği "çalış" veya "dur" durumlarına göre veri okuyan, analiz yapan veya depolayan elemanlardır.

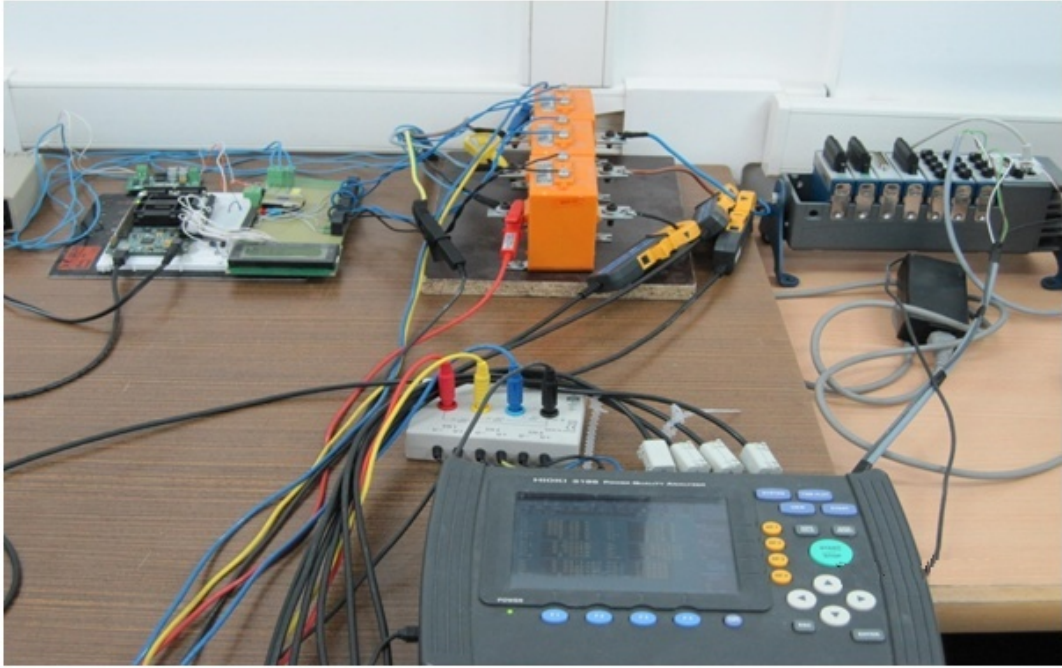
Tasarlanan sistemde μC_1 slave, μC_2 (TMS320F28335) ise master durumundadır. μC_1 3 faz akım ve gerilimleri ile nötr akımını okumakta, FFT analizini yapmaktadır. μC_2 ise SPI ile μC_1 'in okuduğu ve hesapladığı verileri almakta ve gerekli güç hesaplarını yapmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi 3 faz akım ve gerilimlerin gerçek etkin değerlerinin ve aktif, reaktif ve görünür güçlerin hesaplanması için gerekli süre <50 ms olarak gerçekleşmiştir. Böylece istenilen tepki hızına erişilmiştir. Ayrıca μC_2 ölçülen ve hesaplanan değerleri LCD ekranda gösterge etmektedir (Programın LCD döngüleri 50 ms süre içerisine dahil değildir).

Kullanılan iki işlemcili sisteme dair blok diyagram Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Böylece yapılması gereken hesaplamalar nedeniyle ortaya çıkan hesaplama yükünün işlemciler arasında paylaşılması, hesaplama için gerekli olan sürenin kısaltılması ve sistemin dinamik tepkisinin iyileştirilmesi amaçlanmış ve çalışma sonucunda elde edilen verilerden de bu amaca ulaşıldığı görülmüştür.

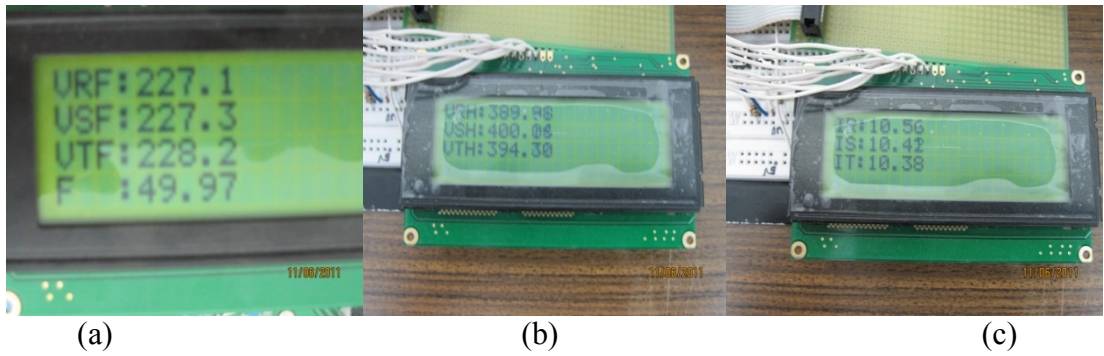


Şekil 5.7. İki işlemcili devre yapısı.

Ölçüm ve testlerin yapıldığı sistem ile tasarlanan sistemden ölçülen akım, gerilim, aktif, reaktif, görünür güç değerleri, frekans, akım ve gerilim harmonikleri, THD değerleri ile aynı ölçümlerin HIOKI 3196 güç analizörü ile yapılması ile elde edilen sonuçlar Resim 5.3-5.7 ile Şekil 5.8-5.10'da verilmiştir.

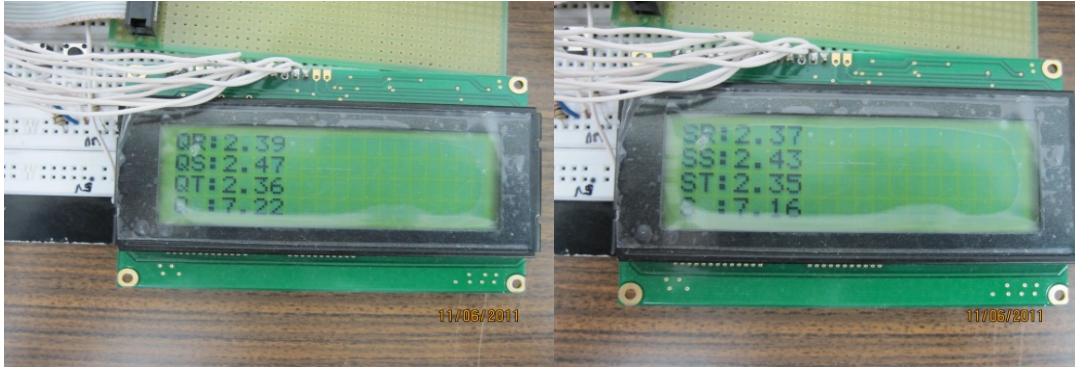


Resim 5.3. HIOKI 3196 ölçüm sistemi.



Resim 5.4. Tasarlanan sistem ile ölçülen

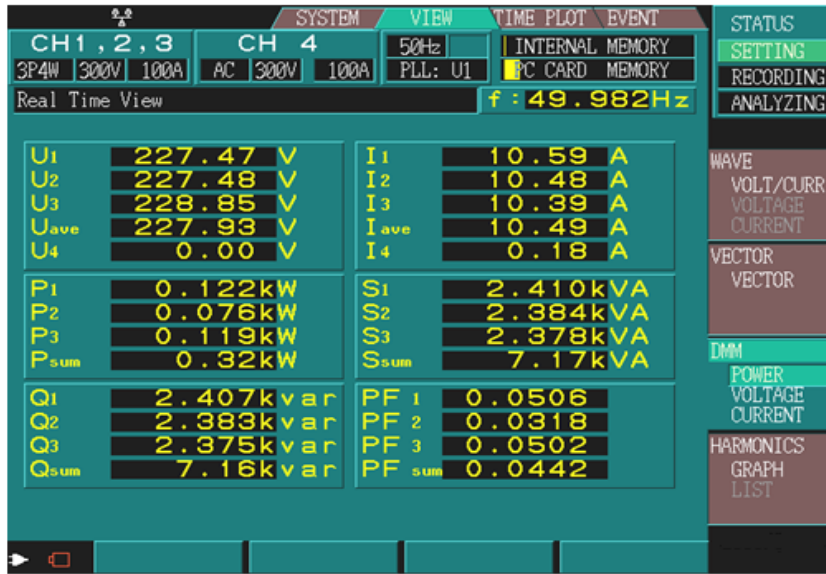
a) Faz gerilimleri ve şebeke frekansı b) Hat gerilimleri c) Faz akımları



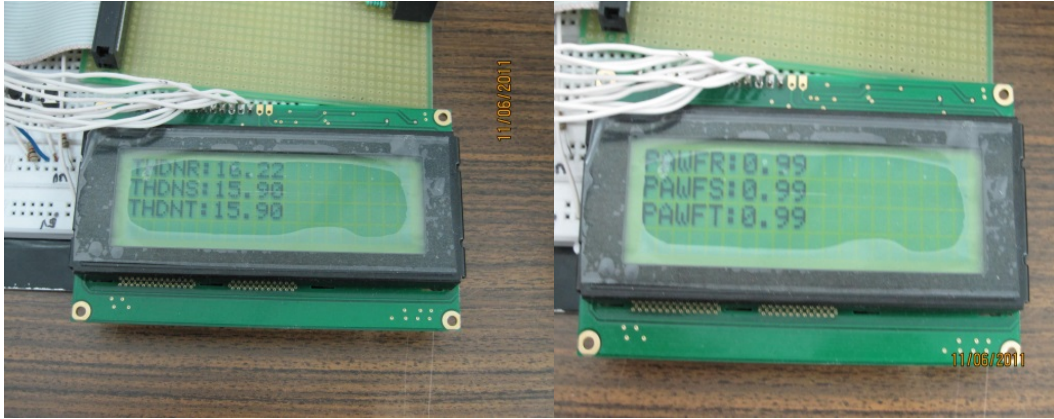
(a)

(b)

Resim 5.5. Tasarlanan sistem ile ölçülen
a) Reaktif güçler b) Görünür güçler.



Şekil 5.8. Hioki 3196 ile ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri.

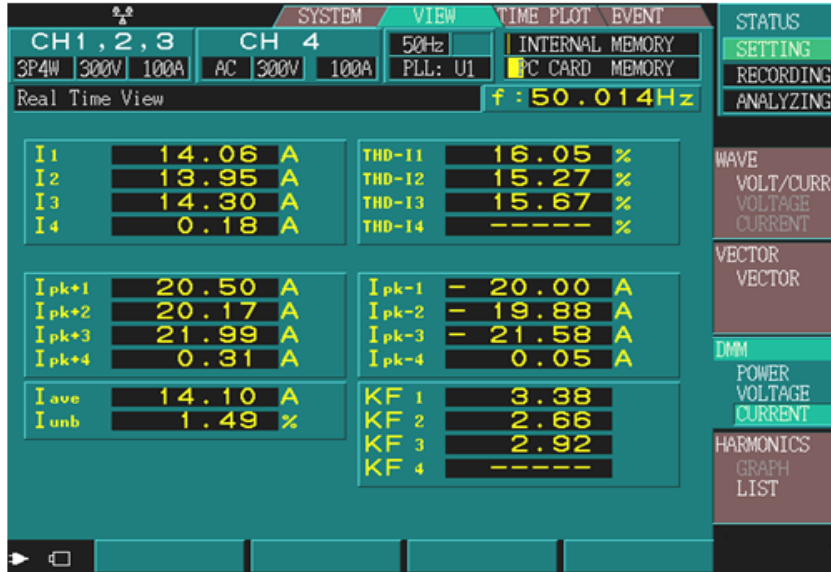


(a)

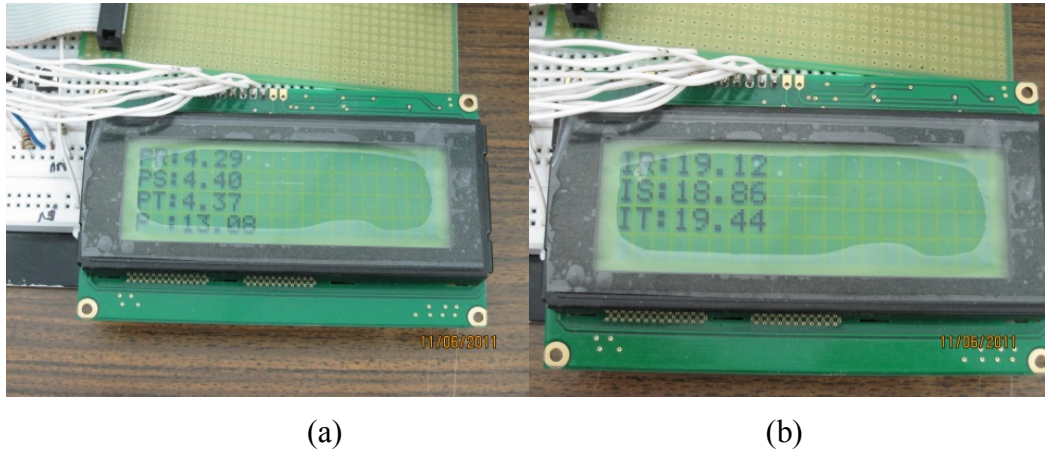
(b)

Resim 5.6. Tasarlanan sistem ile ölçülen harmonik bozunumu

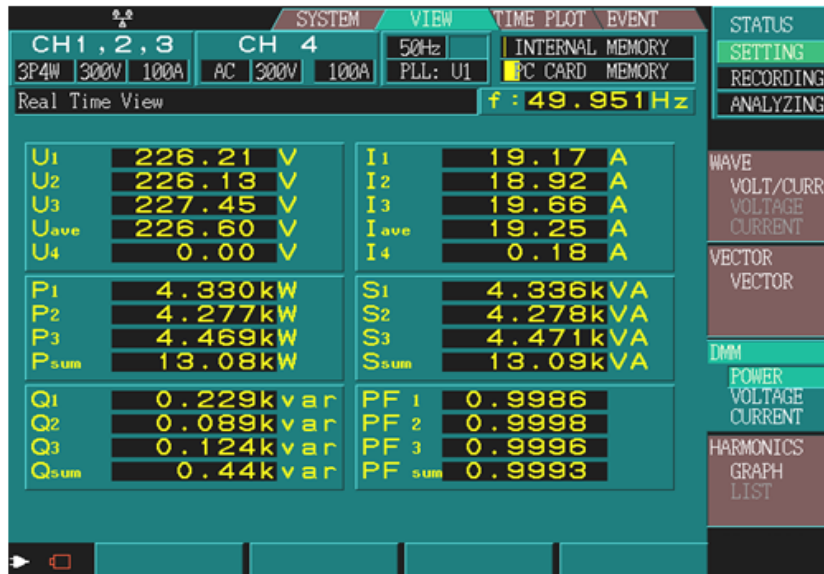
a) Her faza ait toplam b) Her faza ait güç faktörü değerleri



Şekil 5.9. HIOKI 3196 ile ölçülen THD ve güç faktörü güç değerleri.



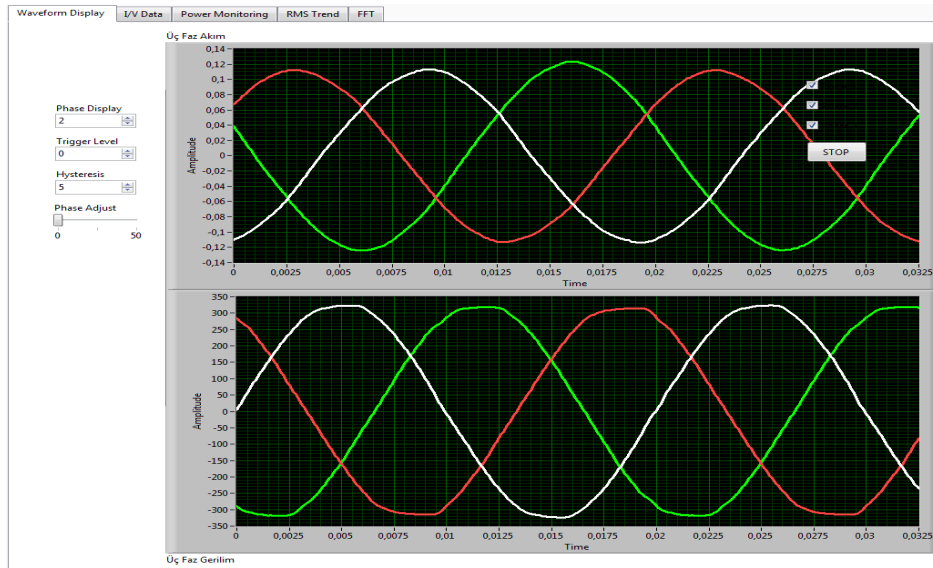
Resim 5.7. Tasarlanan sistem ile ölçülen
a) Her faza ait aktif güç b) Her faza ait akım değerleri



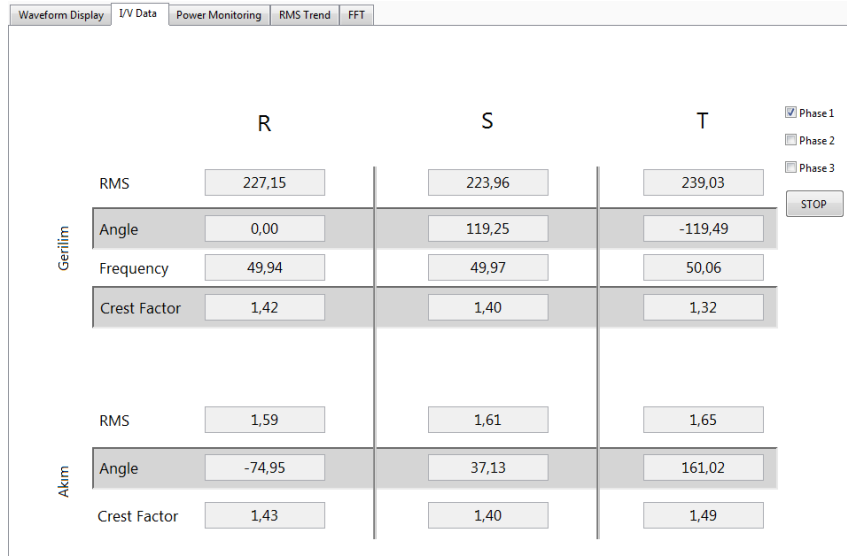
Şekil 5.10. HIOKI 3196 ile ölçülen aktif güç ve akım değerleri.

Şekillerden görüldüğü gibi tasarlanan reaktif güç kontrol rölesi yük akım ve gerilimleri ile aktif, reaktif, görünür güçlerini, frekansı, akım ve gerilim harmoniklerini ve toplam harmonik bozulumu değerlerini doğru biçimde okumaktadır.

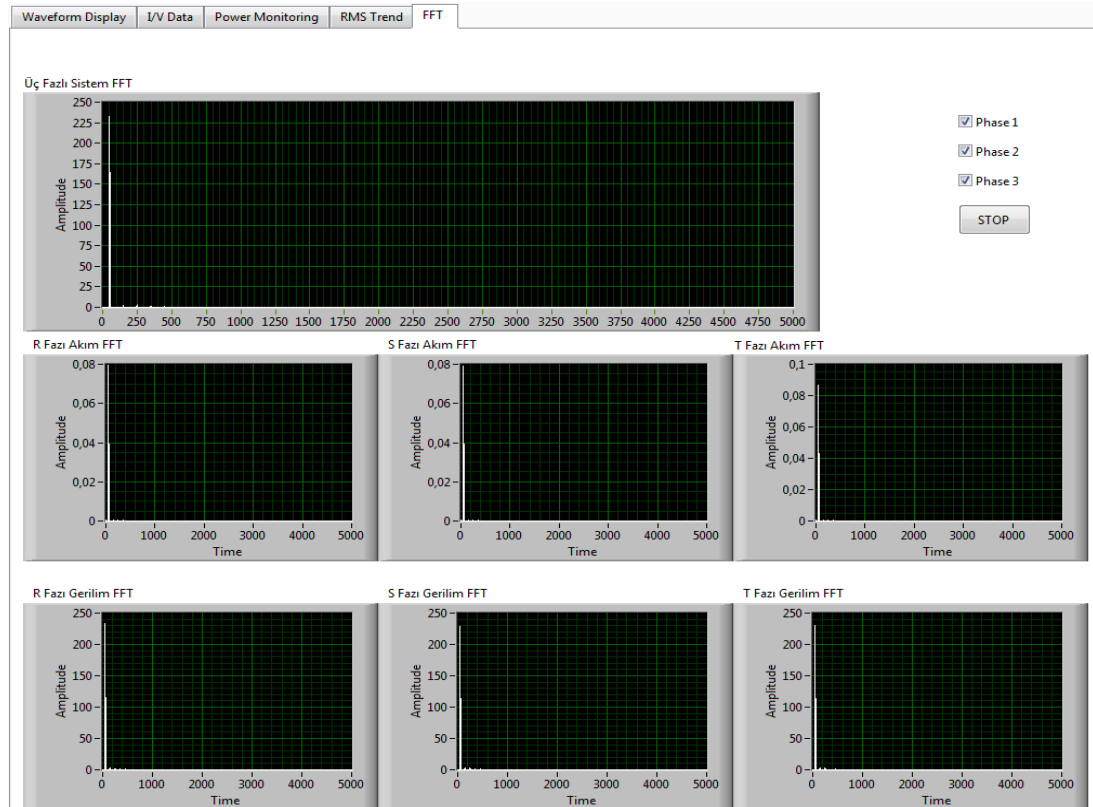
Ayrıca Labview yazılımı ve cRIO donanımları kullanılarak bir güç izleme ve analiz yapma arayüzü hazırlanmıştır. Yüken 3 faz akımları ile gerilimleri cRIO donanımları kullanılarak okunmakta ve Labview yazılımı kullanılarak hazırlanan bir arayüzde görsel hale getirilmektedir. Akım ve gerilim dalga formu, gerçek etkin değeri, THD değerleri görselleştirilmektedir. Şekil 5.11-5.14’de şebeke geriliminin izlenmesi için hazırlanan arayüz görülmektedir. Bu arayüzde şebeke gerilimi dalga formu, FFT analizi ve etkin değeri, tepe değeri gibi hesaplanan değerleri izlemek mümkündür.



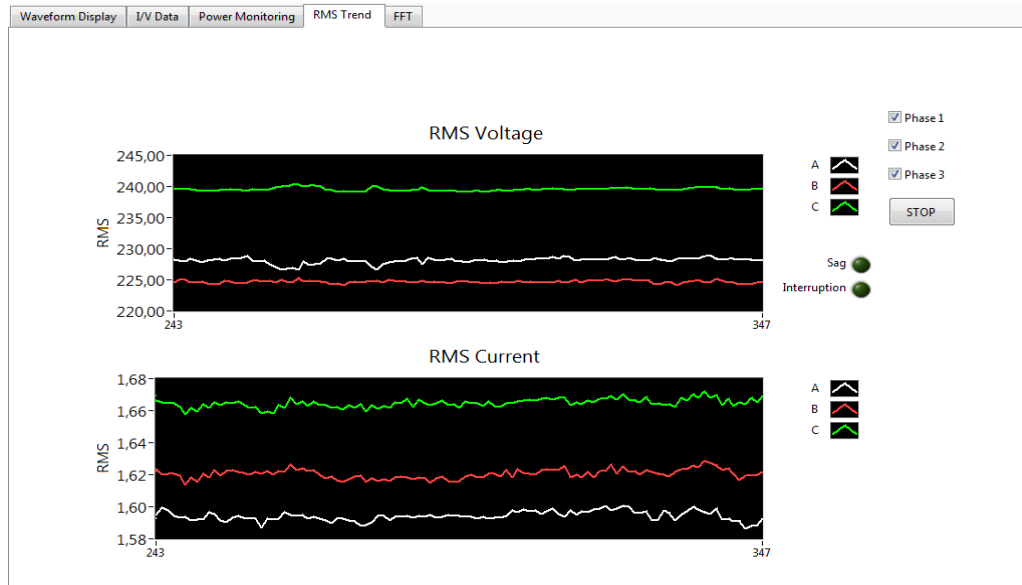
Şekil 5.11. Labview yazılımı.



Şekil 5.12. Labview yazılımı.



Şekil 5.13. Labview yazılımı.



Şekil 5.14. Labview yazılımı.

5.3. Kompanzasyon Ünitesi İle Bilgisayar Arasında Veri Alış Verişi

Tasarlanan reaktif güç kontrol rölesinin uzaktan izlenebilmesi amacıyla Visual Studio programında C# dili kullanılarak görsel bir bilgisayar yazılımı tasarlanmıştır. Tasarlanan reaktif güç kontrol rölesi yük akım ve gerilimleri ile aktif, reaktif, görünür güçlerini, frekansı, akım ve gerilim harmoniklerini ve toplam harmonik bozulumu değerlerini okumaktadır. Reaktif güç kontrol ünitesinde kullanılan ve master konumunda olan TMS320F28335 işlemcisi okuduğu ve hesapladığı verileri RS232 protokolünü kullanarak bilgisayara aktarmaktadır. Reaktif güç kontrol ünitesi tarafından gönderilen verileri bilgisayar ekranında gösterge edildiği gibi bilgisayara da kayıt edilmektedir. Ayrıca kayıt edilen bu bilgiler daha sonra yeniden bilgisayar ekranında çizdirilebilmektedir.

Reaktif güç kontrol rölesinin uzaktan izlenebilmesi için bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanan program ile reaktif güç kontrol rölesi tarafından okunan ve hesaplanan tüm veriler bilgisayar ekranında gösterge edilebilecek ve ayrıca

bilgisayara kayıt edilebilecektir. Bilgisayara kayıt edilen veriler daha sonra ekranda çizdirilebilecektir. Hazırlanan yazılımın ekran görüntüsü Şekil 5.15’de görülmektedir.

The screenshot displays the 'SiNE Dinamik RoleYazılımı' software interface. It features a grid of measurement boxes and a control section on the right.

Faz Gerilimleri		Aktif Güç		Güç Faktörü	
V1F	220.9	P1	4010.2	PF1	0.99
V2F	220.5	P2	4229.6	PF2	0.99
V3F	219.8	P3	3613.8	PF3	0.99
		PT	11853.6		

Hat Gerilimleri		Reaktif Güç		Toplam Harmonik B	
V1H	380.1	Q1	567.1	THD1	0.02
V2H	379.7	Q2	598.1	THD2	0.028
V3H	378.3	Q3	511.0	THD3	0.04
		QT	1676.2		

Faz Akımları		Görünür Güç	
I1	10.6	S1	4050.8
I2	11.2	S2	4272.4
I3	9.6	S3	3650.4
		ST	11973.6

Hata & Uyarı

ComPort: COM5
BaudRate: 9600

Communication Start

Şekil 5.15. Reaktif güç kontrol ünitesinin bilgisayar arayüzü.

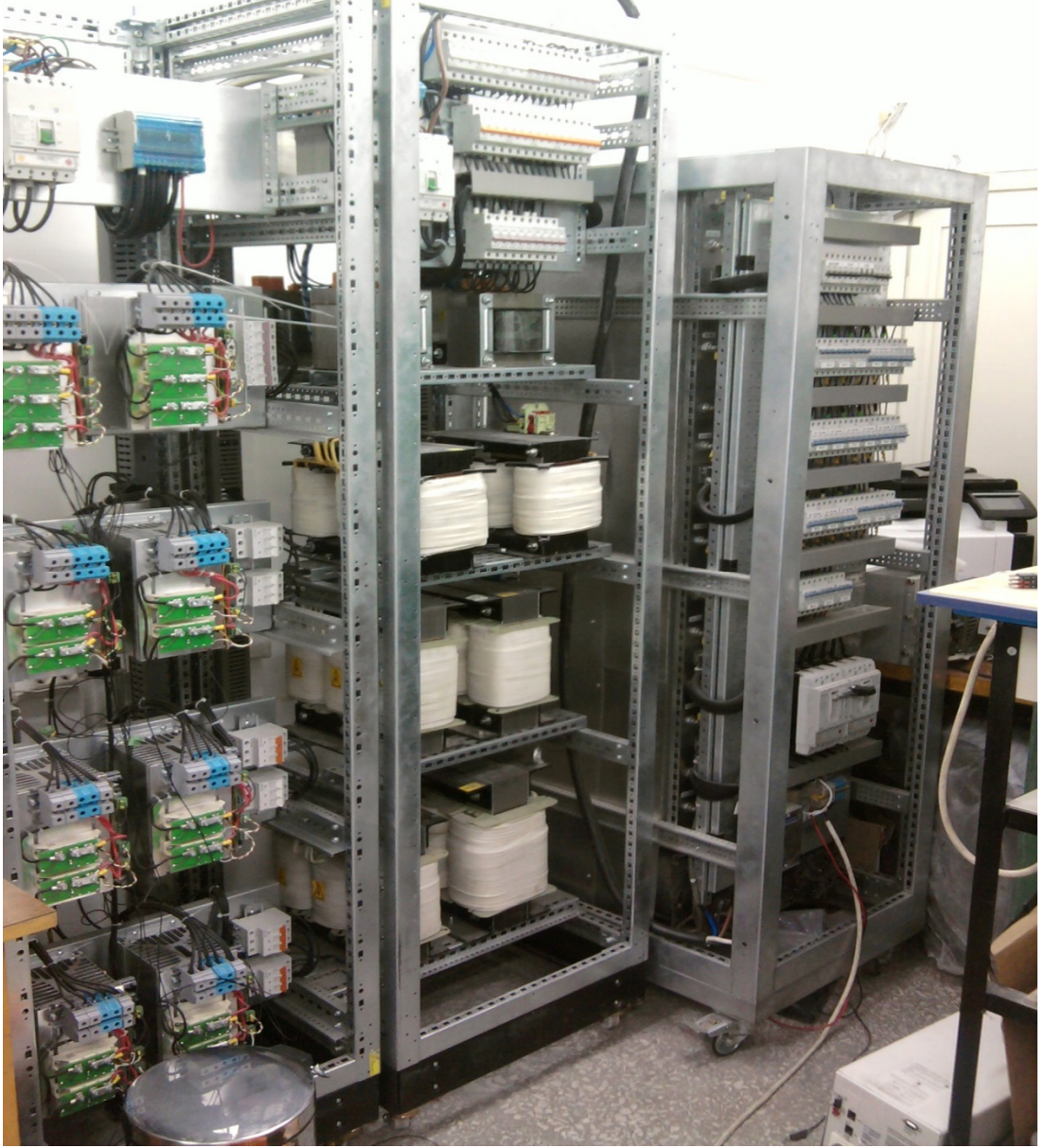
5.4. Dinamik Reaktif Güç Kompanzasyon Ünitesinin Test Edilmesi

Tasarlanan reaktif güç kontrol rölesinin ve tristörlü güç kontrol modüllerinin performansının test edilebilmesi amacıyla Resim5.8’de görülen test standı ve Resim

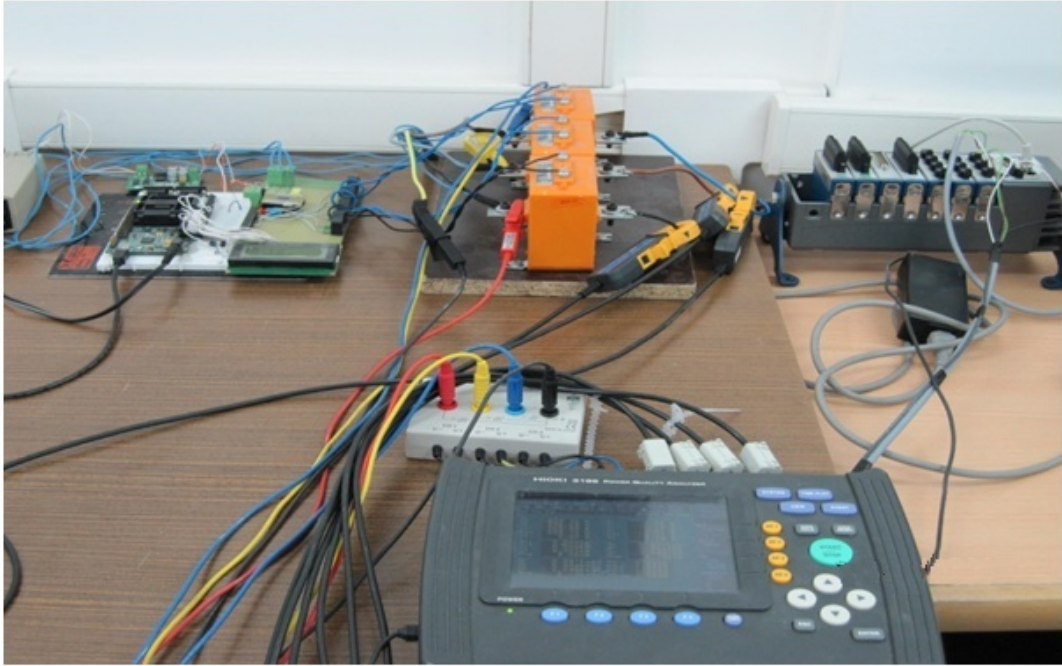
5.9’da görülen test standı hazırlanmıştır. Geliştirilen dinamik reaktif güç kontrol ünitesi, tristörlü güç kontrol modülleri ve bilgisayar programının çalışmasının test edilebilmesi amacıyla bir deney seti hazırlanmıştır. Bu deneylerin gerçekleştirilebilmesi için aktif ve reaktif yük grupları hazırlanmıştır. Aktif yük grubu olarak dirençlerden oluşan bir yük bankası kullanılmıştır. Reaktif yük olarak farklı güçlerde endüktif yükler temin edilmiş ve bir reaktif yük bankası oluşturulmuştur. Ayrıca bir fazlı üç fazlı geliştirilen tristörlü güç kontrol modülleri tarafından denetlenen %7 detuned reaktörlü kompanzasyon gruplarından oluşan bir kompanzasyon panosu hazırlanmıştır.

Hazırlanan test standı geliştirilen dinamik reaktif güç kontrol ünitesi, tristörlü güç kontrol modülleri ve bilgisayar programının performansının test edilmesinde kullanılmıştır. Böylece mümkün olduğunca gerçek şartlar emüle edilerek geliştirilen sistemin tüm bileşenlerinin performanslarının görülebilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre gerekli geri besleme bilgileri elde edilmiş ve tasarımda uygun değişiklikler yapılmıştır.

Geliştirilen dinamik reaktif güç kontrol ünitesi, tristör modüller ve bilgisayar programı hazırlanan test düzeneği (yükler) ile test edilerek performansı test edilmiştir. Geliştirilen dinamik kompanzasyon ünitelerinin testi kısa zaman aralıklarında değil belirli periyotlar halinde yapılmış ve sisteme ait elektriksel büyüklükleri hem geliştirilen bilgisayar yazılımı ile hem de güç kalitesi analizörü ile kayıt edilmiştir. Böylece hem geliştirilen dinamik reaktif güç kontrol ünitesi ve tristörlü güç kontrol modüllerinin tepkisi hem de reaktif güç kontrol ünitesi ve bilgisayar arasında sağlanan haberleşme ve bilgisayardan reaktif güç kontrol ünitesinin izlenebilmesi için hazırlanan programın çalışması test edilmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlara göre sistem bileşenlerinin herhangi birinde veya birlerinde tespit edilen aksaklıkların giderilmesi için tasarımda düzenlemeler yapılmıştır.

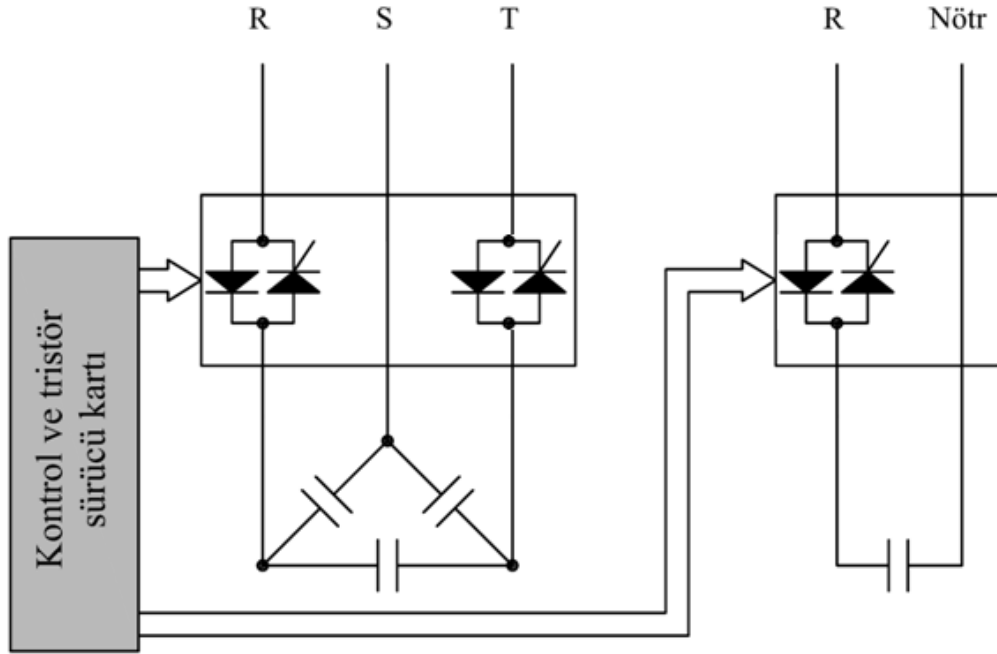


Resim 5.8. Tristör modüllü kompanzasyon panosu, Reaktif ve Omik yük grubu.



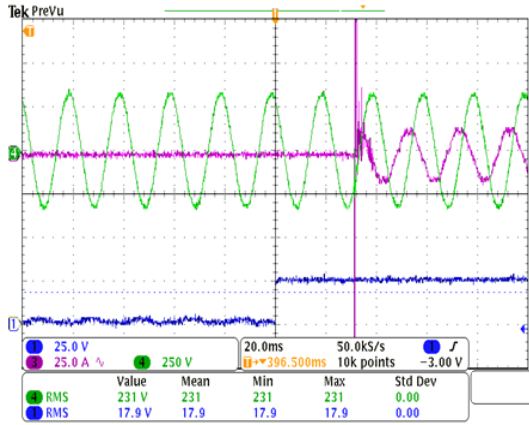
Resim 5.9. Tasarlanan sistemin test düzeneği.

Şekil 5.16’da tasarlanan sıfır geçiş algılama ve tristör sürme devresi görülmektedir. Bu devre hem bir fazlı hem de üç fazlı kompanzasyon ünitesi içinde kullanılabilir özellikte tasarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda tasarlanan bir fazlı ve üç fazlı tristörlü reaktif güç kontrol ünitelerinin sıfır geçiş noktalarında maksimum 10 ms gecikme iletime girdiği ve çıktığı, böylece kondansatörlerin nominal akımının 30 katı değerine kadar ulaşabilen inrush akımlarının ortadan kaldırıldığı görülmüştür. Ayrıca kullanılan soğutucuların ve söndürme devrelerinin ihtiyaçları karşıladığı ve yarı iletken anahtarlar için ortaya çıkabilecek aşırı ısı veya aşırı gerilim gibi olumsuzlukları engellemek için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sürme ve kontrol kartını beslemek için tasarlanan 24 Volt DC ve 220 Volt AC ile çalışabilen universal güç kaynağını da başarılı bir şekilde test edilmiştir.

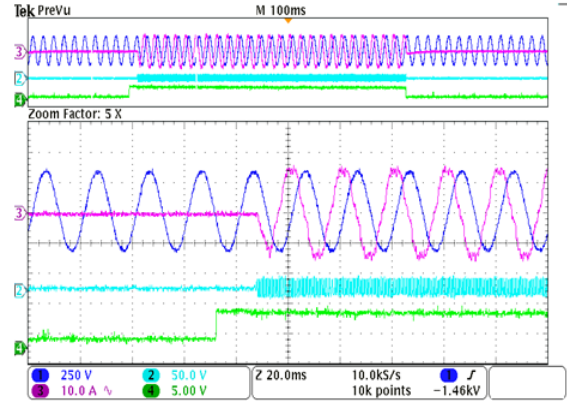


Şekil 5.16. Geliştirilen tristörlü reaktif güç kontrol ünitesi.

Tasarlanmış ve testlere hazır hale getirilmiş olan bu modüller, farklı şebeke ve yük şartlarında önce sadece kapasitif kademelerle sonrasında ise harmonik reaktörlü (LC) kompanzasyon grupları ve saf kondansatörden (C) oluşan kompanzasyon grupları ile test edilmiştir. Tasarlanan mikrodnetleyici tabanlı tristör modülün performansının incelenebilmesi için tasarlanan sistem ile kontaktör kullanılarak 12,5 kVAR, 525 V değerlerindeki bir kondansatör ve bu kondansatör ile %7 harmonik filtreden oluşan kompanzasyon grupları devreye alınmış ve çıkartılmıştır. Grupların devreye alındığı ve çıkarıldığı anlardaki akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 5.17-5.20’de verilmiştir.



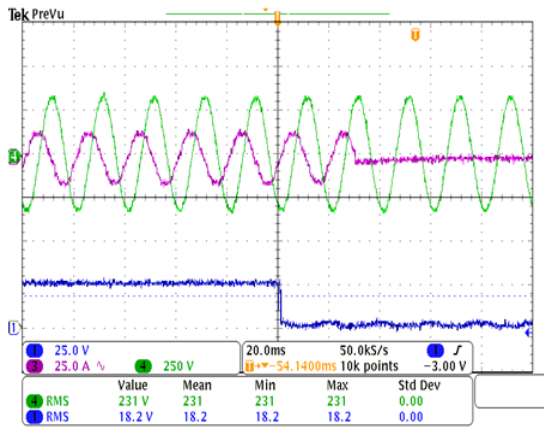
(a)



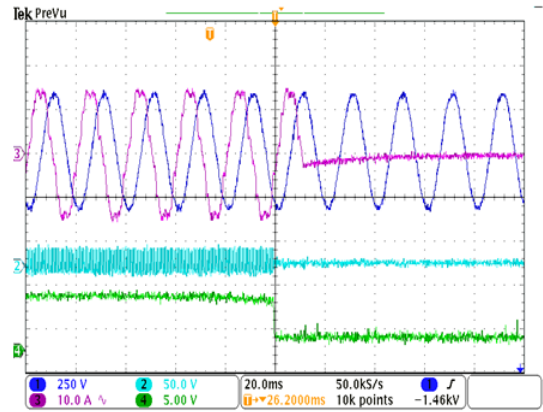
(b)

Şekil 5.17. Kondansatörün devreye alınması.

a) Kontaktör ile b) Tasarlanan tristör modül ile.



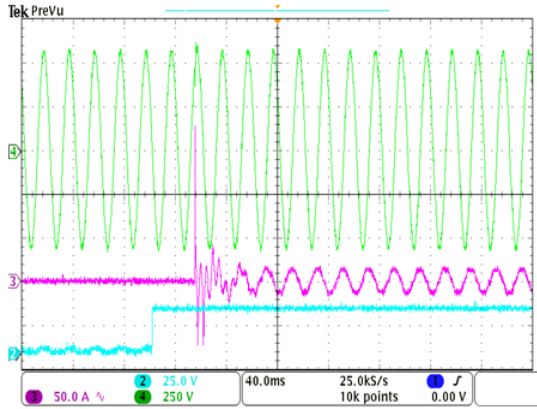
(a)



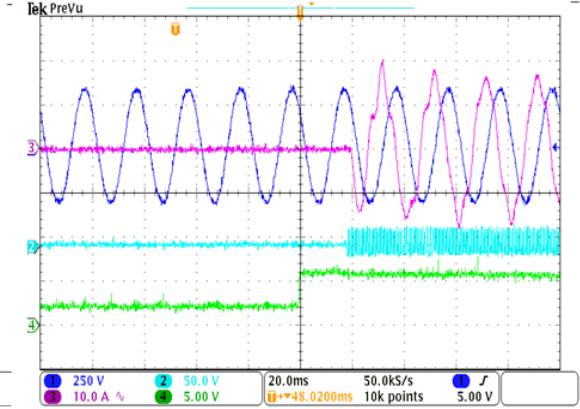
(b)

Şekil 5.18. Kondansatörün devreden çıkartılması.

a) Kontaktör ile b) Tasarlanan tristör modül ile.



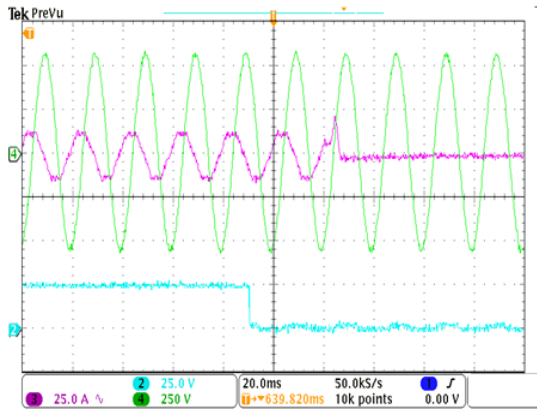
(a)



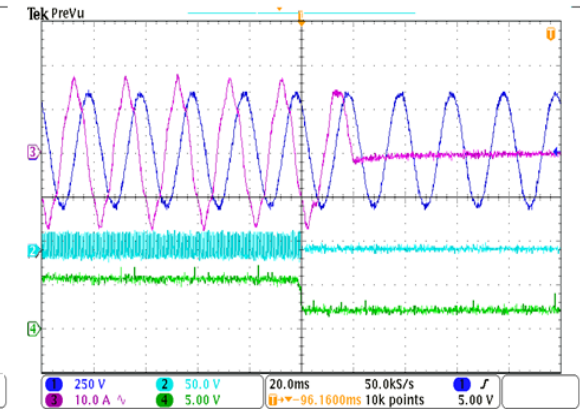
(b)

Şekil 5.19. Harmonik reaktörlü kompanzasyon grubunun devreye alınması.

a) Kontaktör ile b)Tasarlanan tristör modül ile.



(a)



(b)

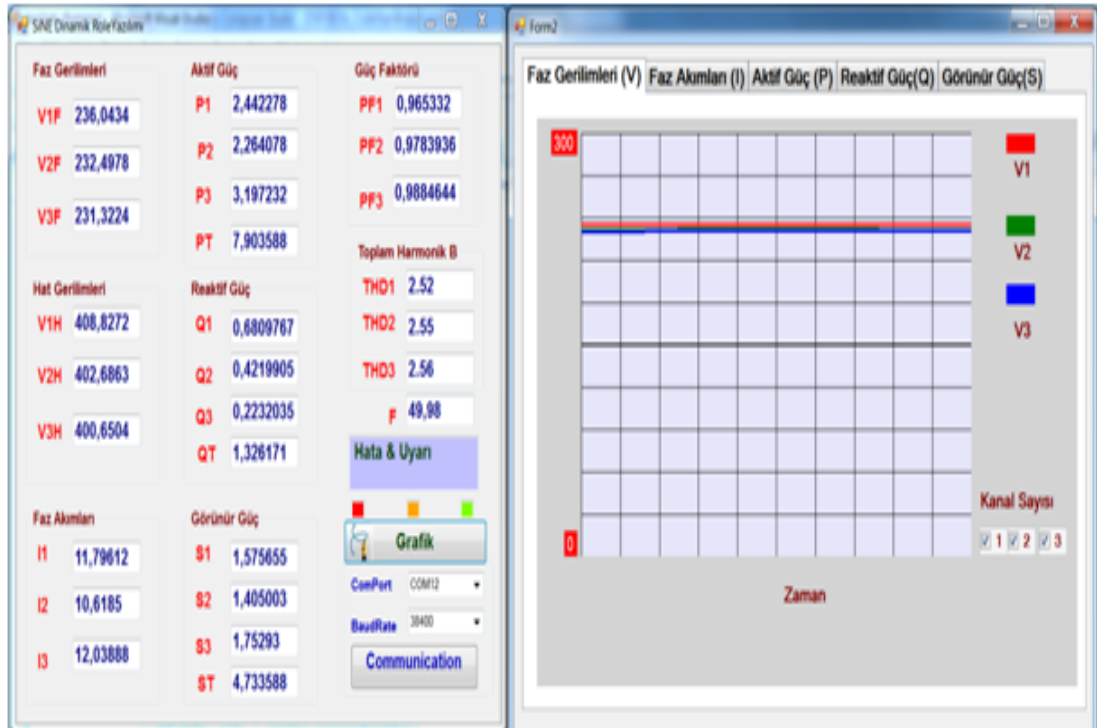
Şekil 5.20. Harmonik reaktörlü kompanzasyon grubunun devreden çıkarılması.

a) Kontaktör ile b)Tasarlanan tristör modül ile.

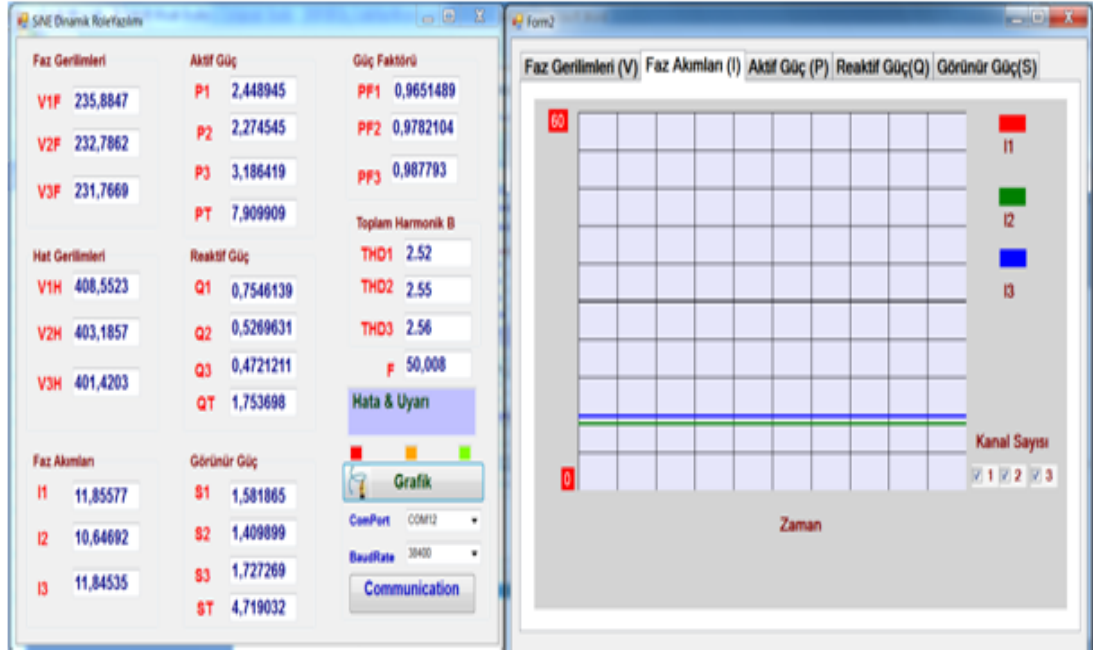
Şekillerden görüldüğü gibi tasarlanan tristör modül kullanılarak, C veya LC grupları devreye alındığı veya çıkartıldığı anlarda oluşan inrush akımları ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca tasarlanan sistem geleneksel kontaktörlü sisteme göre çok daha fazla sayıda anahtarlama işlemi yapabilecek özelliktedir. Sonuç olarak tasarlanan

sistem daha uzun ömürlü ve daha az bakım gerektiren özelliktedir. Ayrıca tasarlanan sistem geleneksel yöntemlerin aksine ardı ardına kompanzasyon gruplarını devreye alıp çıkarmaya ve tekrar almaya müsaittir ve bu özelliği ile indüksiyon generatörünün kullanıldığı rüzgar türbinlerinde de kullanılabilecektir.

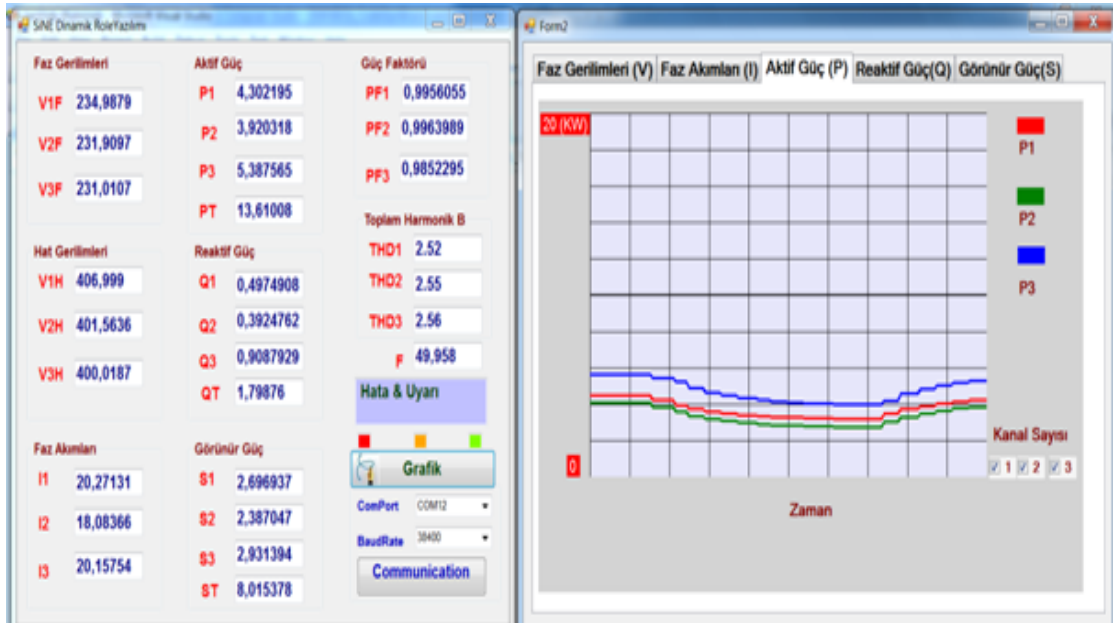
Şekil 5.19-5.25 ile gösterilen şekillerde değişik endüktif yük kademeleri devreye alındığında tasarlanan dinamik reaktif güç kontrol denetleyicisi ile ölçülen faz gerilimleri, hat gerilimleri, faz akımları ile bu değerlere göre işlemcide hesaplanan her bir fazın aktif güçleri ve toplam aktif güç, her bir faza ait reaktif güçler ile toplam reaktif güç, her bir faza ait görünür güçler ile toplam görünür güç, her faza ait güç faktörleri ve harmonik değerleri bilgisayar arayüzünde görülmektedir.



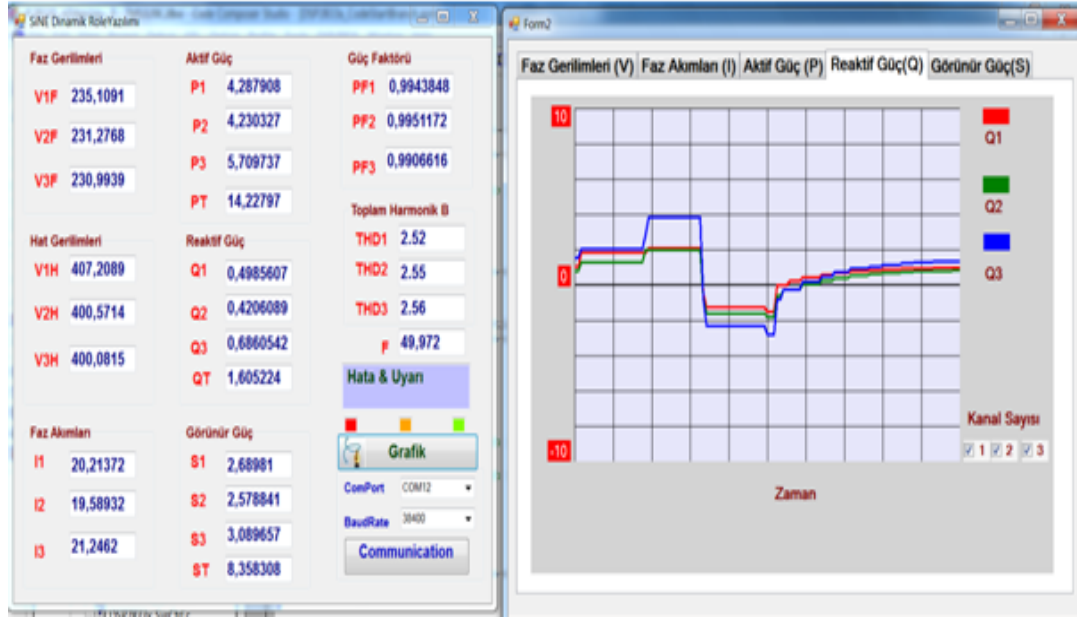
Şekil 5.19. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



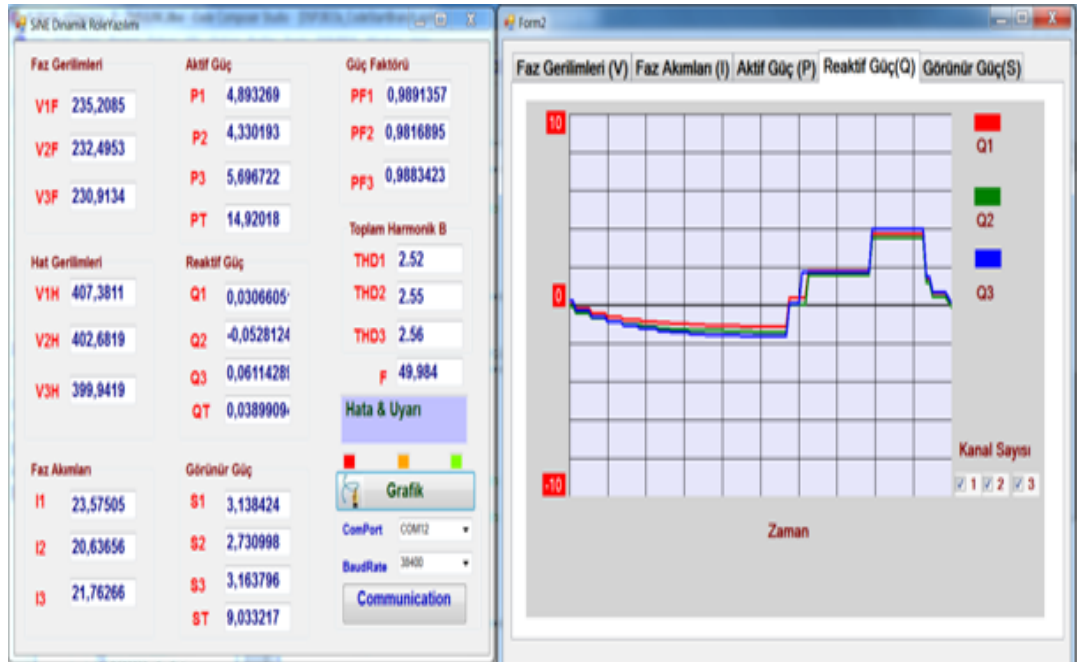
Şekil 5.20. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



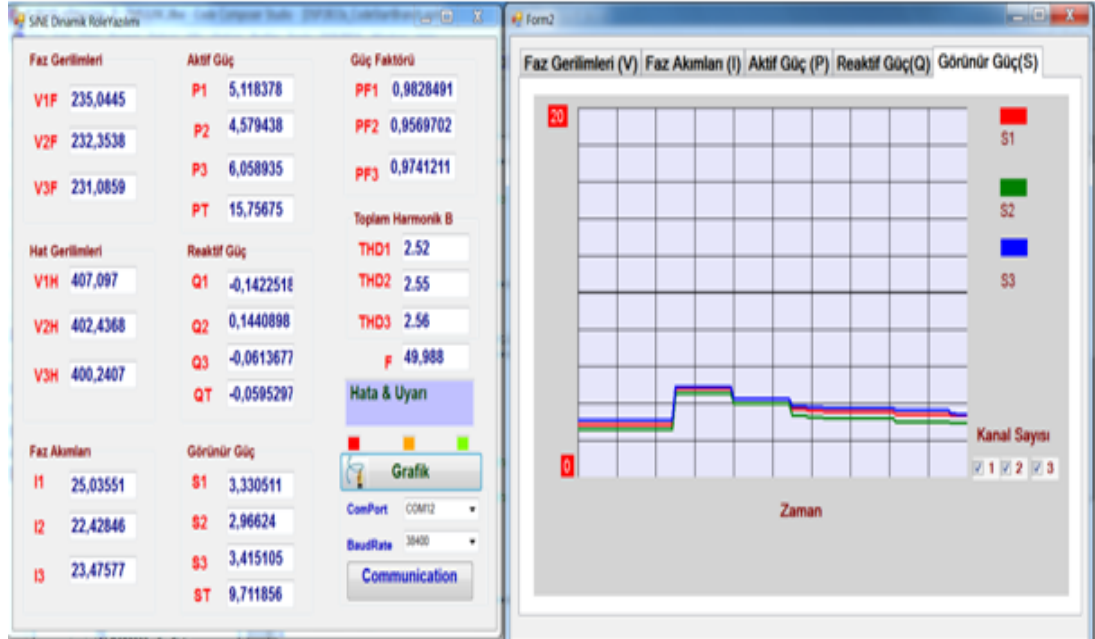
Şekil 5.21. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



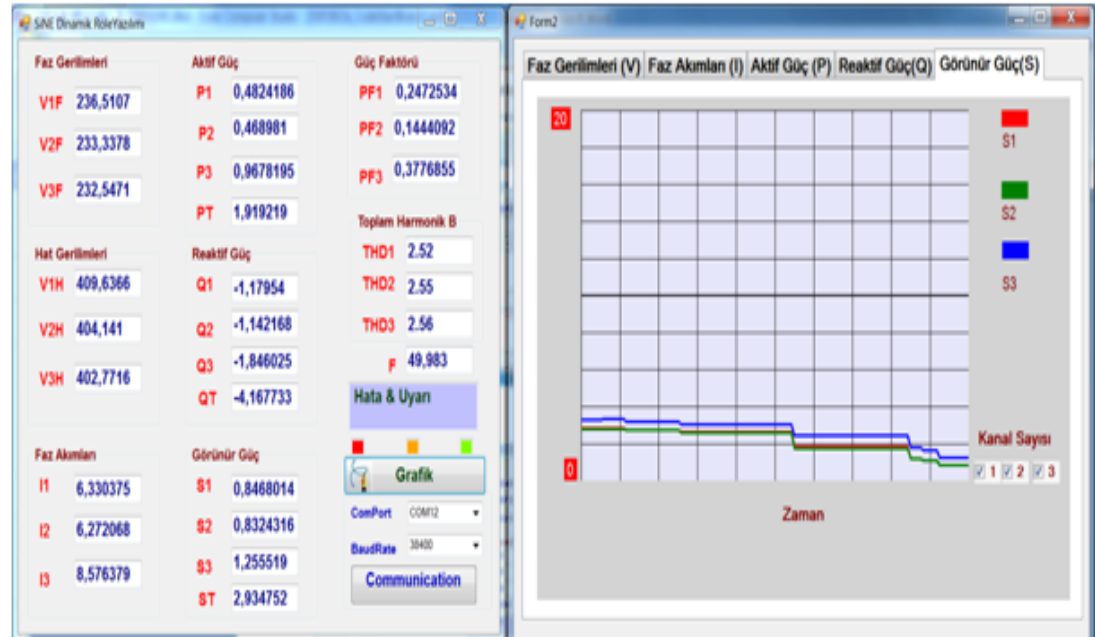
Şekil 5.22. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



Şekil 5.23. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



Şekil 5.24. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.



Şekil 5.25. Tasarlanan Reaktif güç kontrol ünitesi bilgisayar arayüzü.

Tasarlanan dinamik reaktif güç kontrol denetleyicisi ve tristör modülleri ile oluşturulan kompanzasyon sistemine ilk enerji verildiğinde, sistemin otomatik tanımlaması gerçekleştirilmektedir. Dinamik reaktif güç kontrol rölesi her bir üniteyi tek tek devreye alır ve devreden çıkarır. Hem bir fazlı ve üç fazlı kademeleri, hem de kapasitif ve endüktif kademelerin tespitini bu şekilde gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda her bir kademenin reaktif gücü reaktif güç rölesine kaydedilmektedir. Bu işlem sisteme ilk enerji verildiğinde ve sadece bir kez gerçekleştirilmektedir. Bu otomatik tanımlama sistemi ile dengeli yüklenmemiş sistemlerin kompanzasyonu sağlıklı bir şekilde yapılabilir. Aynı zamanda fazla aşırı kompanzasyon yapıldığı durumlarda endüktif kademe devreye girmekte ve hassas bir kompanzasyon temin edilmektedir. Dinamik reaktif güç kontrol rölesi sistemi sürekli olarak izlemekte ve reaktif güç ihtiyacı belirdiğinde en uygun kademe veya kademeleri devreye almakta ve çıkarabilmektedir.

Tasarlanan dinamik reaktif güç kontrol denetleyicisi sisteme ait akım ve gerilimleri çok kısa bir sürede ölçmekte ve tüm güç değerleri ile birlikte güç faktörü ve harmonikleri de hesaplayabilmektedir. Test düzeneğinde mevcut aktif ve endüktif reaktif kademeler farklı zamanlarda birlikte ya da ayrı ayrı, bir faz veya üç fazlı olarak sistemin hem dengeli hem de dengesiz yüklenmesi şartlarına göre devreye alınabilmektedir. Şekil 5.19-5.25’de test sistemindeki yüklerin değişimi durumunda ölçülen ve hesaplanan değerlerin bilgisayar arayüzünde görüntüleri verilmektedir.

Sistemin testi, yükler farklı koşullara göre yapılmıştır. Sistemin çalışmasında yük değişimleri dinamik yüklerin çalışma şartlarına uygun olarak emüle edilmiştir. Yapılan testler neticesinde dinamik reaktif güç denetleyicisi hızlı yüklerin reaktif güç ihtiyacını tespit edebilmiş ve gerekli kompanzasyon kademelerini devreye alıp çıkarabilmiştir.

Tasarlanan sistemin, harmoniklerin mevcut olduğu güç sistemlerinde gerçek güç katsayısı düzeltilmesi koşullarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Sistemde kullanılan harmonik filtre reaktörleri, harmonikler sebebiyle test sistemi ile şebekenin

rezonansa girme olasılığını engellediği ve harmoniklerden kaynaklanacak kondansatör bozulmalarının önüne geçtiği tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma ile hem dinamik kompanzasyon yapabilecek hem de klasik kompanzasyon sistemlerinin eksiklerini giderebilecek nitelikte bir reaktif güç kontrol rölesi ile tristör sürücüsü, tristör, soğutucu bloğundan oluşan kompanzasyon ünitesinin prototip tasarımı ve nihai ürün olarak üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistem temel olarak iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm yükün çektiği akımları ve şebeke gerilimini okuyarak yükün reaktif güç talebini hesaplayacak ve buna uygun olarak gerekli olan kondansatör gruplarının devreye alınması için sinyali üretecek olan reaktif güç kontrol ünitesidir (reaktif kontrol rölesi). Rölede temel denetleyici olarak 32 bit kayar noktalı (floating point) bir işlemci (DSP) kullanılmıştır. İşlemcinin yüksek performanslı bu donanım özelliği ile sadece yazılım değişikliği ile gelecekte olabilecek değişikliklere uygun hale getirilmesi mümkün olacaktır. Röle yükün her bir faz için olmak üzere akım, gerilim, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri, toplam güçler ve çekilen akımın toplam harmonik miktarı (THD) gibi temel elektriksel büyüklükleri ekranında gösterebilecek, gerekli uyarı sinyallerini gönderebilmektedir. Ayrıca hazırlanan bir program yardımıyla bilgisayar ile röle arasında sağlanacak haberleşme ve verilerin bilgisayarda izlenmesi ve kayıt yapılabilmesi mümkün olacaktır.

Sistemin ikinci bölümü ise kondansatör gruplarını hızlı biçimde devreye alacak olan tristör modülleridir. Mikrodenetleyici tabanlı geliştirilen bu modüller ile röleden tetikleme sinyali geldiğinde en fazla 10 milisaniye gecikme ile kondansatörleri devreye almaktadır. Kondansatörler devreye alınırken büyük inrush akımlarının çekilmemesi için şebekenin sıfır geçişleri takip edilmekte ve kompanzasyon grupları sıfır geçiş anlarında devreye alınmaktadır. Tristör modülleri hem kondansatörlü hem de harmonikli sistemlerin kompanzasyonunda kullanılan harmonik reaktörlü kompanzasyon sistemlerinde kullanılabilecek yapıdadır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu , “Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği”, <http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=94> (2007).
2. Bayram, M, “Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1-3, 28-29 (2000).
3. IEEE Std 1459-2000, “IEEE Trial-Use Standard Definitions For The Measurement Of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 44 (2000).
4. Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2 (1-2), 3 (1-4), 12 (1-9), 13 (2) (2003).
5. Acha, E., Madrigal, M., “Power Systems Harmonics: Computer Modelling And Analysis”, *John Wiley & Sons, Ltd*, New York, 20-27 (2001).
6. Hoevenaars, T., LeDoux, K., Colosino, M., “Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 6 (2003).
7. Skvarenina, T.L., “The Power Electronics Handbook”, *CRC Press LLC*, 17-4 (2001).
8. Peng, F.Z., “Harmonic Sources And Filtering Approaches”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Industry Applications Magazine*, 1-8 (2001).
9. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., ”Güç Elektroniği Çeviriciler, Uygulamalar Ve Tasarım”, Tuncay, N., Gökaşan, M., Boğosyan, S., *Literatür Yayıncılık*, 514-515 (2003).
10. Kaplan, O., “Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtreleri İçin Sensörsüz DA Gerilim Kontrolü”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 32-33, 38-40 (2011).
11. Uçar, F., “Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik Ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 20-21 (2012).

12. Erken, F., “Orta Gerilim Şebekelerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 52-53 (2001).
13. Yolaç, U., Yalçınöz, T., “Tristör Kontrollü Seri Kapasitörün Bulanık Mantık İle Kontrolünün Gerçekleştirilmesi”, *1. Enerji Verimliliği Ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 6-10 (2005).
14. Ersamut, R., “Statik VAR Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi Ve Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 26-27, 46-47(2009).
15. Gelen, A., Yalçınöz, T., “Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) Ve Tristör Anahtarlama Reaktör-Tabanlı Statik VAR Kompenzatorün (TSR-Tabanlı SVC) PI İle Kontrolü”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (2): 237-244 (2009).
16. Mutluer, H.B., “Design Implementation And Engineering Aspects Of TCR For Industrial SVC Systems”, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (2008).
17. Akgün, Ö., “Statik VAR Kompenzator Ve Tristör Kontrollü Reaktör Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 15-16(2006).
18. Acha, E., Esquivel, C.R.F., Perez, H.A., Camacho, C.A., “FACTS Modelling And Simulation In Power Networks”, *John Wiley & Sons, Ltd*, West Sussex, 16-17 (2004).
19. Tyll, H.K., Schettler, F., “Historical Overview On Dynamic Reactive Power Compensation Solutions From The Begin Of AC Transmission Towards Present Applications”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 1-3 (2009).
20. Mathur, R.M., Varma, R.K., “Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems”, *John Wiley & Sons Inc Publications*, 71-74(2002).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZSAN, Abdullah
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1981,Konya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 536 225 98 81
 Faks :
 e-mail : a.ozsan@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	M. tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi TEF Elektrik Eğitimi Bölümü	2007

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Uluslararası Konferans

1. Sefa, İ.; Özsan, A., Altin, N., Görgünoğlu, S., Açıkgöz, A.M., “A Microcontroller Based Power Units For Dynamic Reactive Power Compensation Systems”, **7.International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, ICTPE 2011**, Northern Cyprus, 1-6 (2011).
2. Sefa, İ., Özsan, A., Altin, N., Görgünoğlu, S., Özdemir, Ş., “Dynamic Reactive Power Compensation System for Wind Turbines”, **7. International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER'12**, Monaco, 1–6 (2012).