

**GERİLİM BESLEMELİ VE AKIM BESLEMELİ ÜÇ FAZLI ŞÖNT
AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN KARŞILAŞTIRMASI VE SİMÜLASYONU**

Hussein K.ANWAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2009

ANKARA

Hussein K.ANWAR tarafından hazırlanan GERİLİM BESLEMELİ VE AKIM BESLEMELİ ÜÇ FAZLI ŞÖNT AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN KARŞILAŞTIRMASI VE SİMÜLASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Sezai DİNÇER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü

Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü

Doç. Dr. M. Ali AKCAYOL

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü

Tarih:13/07/2009

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

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

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.

Hussein K.ANWAR

**GERİLİM BESLEMELİ VE AKIM BESLEMELİ ÜÇ FAZLI ŞÖNT AKTİF
GÜÇ FİLTRESİNİN KARŞILAŞTIRMASI VE SİMÜLASYONU**

(Yüksek Lisans Tezi)

Hussein K.ANWAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEMmuz 2009**

ÖZET

Bu çalışmada üç fazlı alternatif akım şebekesinde doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen akım harmoniklerinin yok edilmesi ve reaktif güç kompanzasyonun yapılması incelendi. Bu araştırmada kullanılan üç fazlı doğrusal olmayan yük denetimsiz bir doğrultucu tarafından beslenen paralel bir direnç ve indüktanstan oluşmaktadır. Akım harmoniklerini yok etmek ve yük tarafından çekilen reaktif güç kompanzasyonu için şebekeye bir gerilim beslemeli şönt aktif güç filtre ile bir akım beslemeli şönt aktif güç filtresi tasarlandı ve MATLAB-SİMÜLINK programı ile uygulandı ve her iki yöntem incelenip karşılaştırma yapıldı. Kontrol yöntemi olarak Anlık Reaktif Güç Kuramı uygulandı ve eviricideki anahtarların kontrolünde histeresis akım denetleyicisi kullanılmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre gerilim beslemeli aktif güç filtresi daha verimli sonuçlar gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.150
Anahtar Kelimeler : Aktif güç filtre, reaktif güç kompanzasyonu
Sayfa Adedi : 80
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

**COMPARISON & SIMULATION OF THREE PHASE PARALELL
CURRENT SOURCE ACTIVE POWER FILTER WITH VOLTAGE
SOURCE ACTIVE POWER FILTER
(M.Sc. Thesis)**

Hussein K.ANWAR

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JULY 2009**

ABSTRACT

In this thesis, elimination of current harmonics and the compensation of reactive power in three phase AC network have been discussed. A serial three phase RL load connected in paralel with three phase bridge rectifier as a nonlinear load. To eliminate the current harmonics and compensate the reactive power that was absorbed from nonlinear loads, a voltage source shunt active power filter with a current source shunt active power filter are designed and compared, these two methods have been simulated by MATLAB-SIMULINK program. In this Project, “The Instantaneous Reactive Power Theory” as a control method have been used dynamic hysteresis band PWM controller, the results of simulation show us that voltage source shunt active power filter is more suited than current source shunt active power filter.

Science Code : 905.1.150

Key Words : Active power filter, reactive power compensation

Page Number : 80

Adviser : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Sayın Hocam Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Benden öğretim hayatım boyunca her türlü maddi manevi desteğini esirgemeyen, öğretimin değerini bana aşıl原因 çok değerli babam Kemal ANWAR, annem Gülşen ANWAR ve kardeşlerime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. REAKTİF GÜÇ	5
2.1. Reaktif Güç Üretimi	5
2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu	6
2.2.1. Reaktif güç kompanzasyonun faydaları	6
2.2.2. Reaktif güç kompanzasyon konusunda yapılan çalışmalar	8
3. HARMONİKLER	9
3.1. Harmonik Üreten Kaynaklar	10
3.1.1. Klasik harmonik kaynakları	10
3.1.2. Yeni harmonik kaynakları	10
3.2. Harmoniklerin Matematiksel Analizi	11
3.3. Harmoniklerin Etkileri	13
3.4. Doğrusal Olmayan Yükün Matematiksel Modeli	14
3.5. Filtreleme	16
3.5.1. Filtre çeşitleri	16
3.5.2. Filtrelerin görevi	17
3.5.3. Filtre tasarımı	17
4. SINIFLANDIRMA	18
4.1. Pasif Filtre	18
4.1.1. Pasif filtrenin dezavantajları	18
4.2. Aktif Güç Filtreleri	19
4.2.1. Aktif güç filtrelerin sınıflandırılması	19

Sayfa

4.2.2. Gerilim beslemeli ve akım beslemeli şönt aktif güç filtrelerinin karşılaştırması.....	27
4.2.3. Aktif güç filtrelerin uygulamaları.....	31
5. KONTROL YÖNTEMLERİ	34
5.1. Anlık Reaktif Güç Kuramı (Instantaneous Reactive Power Theory)	34
5.1.1. Anlık güç kuramı'nın matematiksel modellenmesi.....	37
5.2. Kontrol Yöntemin İncelenmesi	43
5.3. Temel Kontrol Teorisi	45
5.4. Histeresis Akım Denetleyicisi.....	46
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	50
6.2. Elektrik Şebekesinin Özellikleri.....	52
6.3. Yüken Özellikleri	53
6.4. Giriş Filtresinin Özellikleri	55
6.5. DA Bağı Özellikleri	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
7.1. Gerilim Beslemeli Aktif Güç Filtresi	58
7.2. Akım Beslemeli Aktif Güç Filtre	67
7.3 Sonuçları Değerlendirme ve Öneriler.....	72
KAYNAKLAR.....	74
EKLER.....	77
EK –1 DA Reaktör Teknik Özellikleri	78
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Endüktif yük gösterimi.....	5
Şekil 3.1 Doğrusal olmayan yük	14
Şekil 4.1 Değişik pasif filtre devreleri	18
Şekil 4.2 Seri Aktif Filtre.....	20
Şekil 4.3 paralel aktif filtre kontrol devresiyle.....	21
Şekil 3.4 paralel aktif güç filtrenin çalışma prensibi	22
Şekil 3.5 paralel aktif filtrenin harmonik ve spektrum	22
Şekil 4.6 Aktif seri ve pasif paralel filtrelerin birleşiminden oluşan karma AGF	24
Şekil 4.7 Aktif seri ve paralel filtrelerin birleşiminden oluşan evrensel AGF	25
Şekil 4.10 Gerilim beslemeli tip AGF	26
Şekil 4.11 Akım beslemeli tip AGF	27
Şekil 3.12 Akım harmonik spektrumu.....	29
Şekil 4.13 Tetikleme açısına göre akımdaki toplam harmonik bozulma.....	29
Şekil 4.8 DA/AA dönüştürücüsü ile kapasitor iptalı	32
Şekil 4.9 Hızı değişen ve gücü yüksek olan indüksiyon motor	32
Şekil 5.1 a-b-c / α - β Dönüşümü	35
Şekil 5.2 a-b-c koordinatlarında p-q teorisinin güç bileşenlerinin paralel aktif güç filtresi ile kompanzasyonu	36
Şekil 5.3 AGF'nin kontrol yöntemi.....	44
Şekil 5. 4 Kaynak akımını referans alan kontrol yöntemi	44
Şekil 5.5 Histeresis akım denetleyicisi (a) blok diyagram, (b) çalışma prensibi	47
Şekil 5. 6 Histeresis akım denetleyicisinin pratikte uygulanması	48
Şekil 5.7 Değişik anahtarlama frekanslarında histeresis akım denetleyicisinin çalışma prensibi.....	49
Şekil 6.1 Şebekeye paralel bağlı gerilim kaynaklı aktif güç filtresi.....	51
Şekil 6.2 Şebekeye paralel bağlı akım beslemeli aktif güç filtresi.....	52
Şekil 6.3 Endüktif ve kapasitif yüklü diyot köprü doğrultucular	53
Şekil 6.4 Doğrultucu giriş akımı dalga şekli (Endüktif yük)	55
Şekil 6.5 Doğrultucu giriş akımı dalga şekli (Kapasitif yük)	55

	Sayfa
Şekil 7.1 Ana devre	58
Şekil 7. 2 Yük akımı	59
Şekil 7. 3 Filtre akımı	60
Şekil 7. 4 Kapasitör gerilimi	61
Şekil 7. 5 Kaynak akımı.....	62
Şekil 7. 6 Kontrol devresi	63
Şekil 7.7 Hysteresis devresi	64
Şekil 7. 8 Darbeler	65
Şekil 7. 9 Gerçek akım ve referans akım	66
Şekil 7.10 Ana devre.....	67
Şekil 7. 11 Filtre akımı	68
Şekil 7. 12 İndüktör akımı.....	68
Şekil 7.13 Kaynak akımı	69
Şekil 7.14 Darbeler	70
Şekil 7.15 Gerçek ve referans akım.....	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1 GBAGF ile ABAGF'nin karşılaştırması.	28
Çizelge 6.1 Yük Parametreleri	53
Çizelge 6.2 Yük akımı harmonik bileşenleri.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
C	Filtre kondansatörünün değeri
C_L	Yük kondansatörünün değeri
L	Filtrenin bobin değeri
L_s	Kaynağın bobin değeri
θ	Faz açısı
D_{1,2,3,4}	Diyotlar
I_C	Filtre kondansatör akımı
I_F	Filtre akımı
I_F*	Referans filtre akımı
I_L	Yük akımı
I_s	Kaynak akımı
I_s*	Referans kaynak akımı
S	Görülen Güç
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
kVA	Kilo Volt Amper
kW	Kilo Watt
kVAR	Kilo Var
mH	Milli Henry
R_L	Yükün direnç değeri
R_s	Kaynağın direnç değeri
S_{1,2,3,4}	Güç Anahtarları
V_C	Filtre kondansatörünün gerilimi
V_L	Yük gerilimi
V(rms)	Voltage root mean square (Gerilimin etkin değeri)

Simgeler	Açıklama
V_s	Kaynak gerilimi
T	Dalga periyodu
I_{CL}	Yük kondansatörünün akımı
I_R	Yük Direncin akımı
δ	Anahtarlama fonksiyonu
Ω	Ohm
μF	Mikro Farad
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
DGM	Darbe Genlik Modülasyonu
THB	Toplam Harmonik Bozulma
VSI	Voltage Source Inverter (Gerilim kaynaklı evirgeç)
A	Amper
AGF	Aktif Güç filtresi
$ABAGF$	Akım Beslemeli Aktif Güç Filtresi
$GBAGF$	Gerilim Beslemeli Aktif Güç Filtresi
BJT	Bipolar Junction Transistor (İki Kutuplu kavşağılı transistör)
YGF	Yüksek Geçirgen Filtre
A_0, A_1, A_2, A_n	Fourier Seri Bileşenleri
B_0, B_1, B_2, B_n	Fourier Seri Bileşenleri
FFT	Fast Fourier Transformer (Hızlı Fourier Dönüşümü)
$f(t)$	Fourier fonksiyonu
$EN61000-3-2$	European Current Harmonic Standard (Avrupa Standardı)
$IEEE$	Institute of Electrical Electronical Engineering
V_0	Sıfır sıralı gerilim
$\alpha, \beta, 0$	a-b-c koordinatların cebirsel dönüşümü
V_α	α – ekseninde gerilim
V_β	β – ekseninde gerilim

Simgeler	Açıklama
P_0	Anlık sıfır sıralı güç (Instantaneous zero sequence power)
I_0	Sıfır sıralı akım
I_α	α – ekseninde akım
I_β	β – ekseninde akım
$P_{3\phi}$	Üç fazlı aktif güç değeri
$Q_{3\phi}$	Üç fazlı reaktif güç değeri
$\bar{P}$	Aktif gücün ortalama değeri
$\bar{q}$	Reaktif gücün ortalama değeri
$\tilde{P}$	Aktif gücün ortalama osilatif değeri
$\tilde{q}$	Reaktif gücün ortalama osilatif değeri
$I_{\alpha p}$	α - eksen anlık aktif akım
$I_{\beta p}$	β - eksen anlık aktif akım
$I_{\alpha q}$	α - eksen anlık reaktif akım
$I_{\beta q}$	β - eksen anlık reaktif akım
$P_{\alpha p}$	α - eksen anlık aktif güç
$P_{\beta p}$	β - eksen anlık aktif güç
$P_{\alpha q}$	α - eksen anlık reaktif güç
$P_{\beta q}$	β - eksen anlık reaktif güç
$I_{L\alpha}$	α - eksen anlık yük akım
$I_{L\beta}$	β - eksen anlık yük akımı
L_{tr}	Trafonun bobin değeri
L_f	Filtrenin bobin değeri
V_n	n. bileşen gerilimi
I_n	n. bileşen akımı
E_n	n. yük gerilim bileşeni
V_1	Temel bileşen gerilimi
I_1	Temel bileşen akımı
I^*_s	Referans kaynak akımı

Simgeler	Açıklama
I^*_F	Referans filtre akımı
f_{sw}	Anahtarlama frekansı
I_{ref}	Referans akım
$I_{gerçek}$	Gerçek akım
I_{L1}	Kaynak akımı temel bileşeni
I_{Lh}	Toplam akım harmonik bileşeni
ϕ	Kare dalga gerilimin genliği
HVDC	High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış kapı iki kutuplu transistör)

1. GİRİŞ

Son yıllarda, yarı-iletken teknolojisindeki gelişmeleri takiben, güç elektroniği elemanları içeren birçok sistem evlerde ve sanayide giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilgisayarların, kesintisiz güç kaynaklarının, elektrikli motor sürücülerinin, elektronik üretim kontrol elemanlarının, elektronik ve manyetik balastların, floresan aydınlatmaların, televizyon, klima, çamaşır makinesi, yazıcı gibi uygulamaların, ark ocaklarının, elektriksel çekiş sistemlerinin, doyma bölgesine yakın çalışan transformatörlerin, indüksiyon ısıtma sistemlerinin, vb. aralarında olduğu bu sistemler doğrusal olmayan yüklerdir. Doğrusal olmayan yükler, elektrik şebekesinden harmonik ve reaktif güç bileşeni içeren akım talep ederler. Ayrıca bu yükler, üç-fazlı elektrik sistemlerinde dengesizliğe sebep olabirler ve sistemden aşırı nötr-akım çekebilirler. Harmonik basımı, reaktif güç yüklenmesi, dengesizlik ve aşırı nötr-akımları sistem verimliliğinin düşmesine ve güç faktörünün kötüleşmesine sebebiyet vermektedir [1].

Harmoniklerin şebeke ve alıcılar üzerinde olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuz etkiler kısaca şu şekilde sayılabilir: Harmoniklerin sebep olduğu deri olayı ve yakınsaklık etkisi nedeniyle iletken etkin direncini artırıp ek kayıplara sebep olması, gerilim maksimum değerini arttırıp kondansatörlerde delinmelere sebep olması, döner makinelerde oluşturduğu ek kayıplar ve gürültü, manyetik malzeme içeren bütün cihazlarda demir ve bakır kayıplarını arttırması, koruyucu sistemler ve haberleşme devrelerindeki zararlı etkileri, bazı aydınlatma cihazlarında ömür kısalmasına sebep olması, sıfır geçiş noktasını kaydırması ile oluşabilecek yanlış anahtarlama ve şebekede oluşturabileceği rezonans olayları.

Şebekedeki diğer kullanıcılar için de problem teşkil eden bu olumsuzluklar, güç kalitesi sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmuşlardır. Kaliteli elektrik enerjisi kısaca, süreklilik, sabit frekans ve sabit genliğe sahip sinüsoidal değişimini bozarak, enerjinin kalitesini düşüren en önemli etken sistemde oluşan harmoniklerdir.

Elektrik enerjisi ile çalışan bütün cihazlar iş yapabilmek için şebekeden aktif ve/veya reaktif bir güç çekerler. Şebekeden reaktif bir güç çekilmesi istenen bir durum değildir. Çünkü reaktif güç, kaynaktan çekilen akımı arttırıp, şebeke ve jeneratörleri gereksiz yere yükler. Sonuç olarak hat kayıpları, sistemin verimliliği ve enerjinin maliyeti olumsuz yönde etkiler.

Reaktif güç mekanik bir iş gücüne, örneğin kinetik enerji veya ısı enerjisine çevrilemez. Reaktif güç, alıcı ile jeneratör arasında bir enerji osilasyonu olarak adlandırılabilir. İletim hatlarından çekilen reaktif gücü yok etmenin yolu, reaktif gücün bölgesel (lokal) üretimidir. Alıcıların reaktif güç ihtiyacını karşılamak için kullanılan geleneksel yöntemler, elektro-mekanik olarak devreye alınan kondansatör veya kondansatör grupları, senkron motorlar, doyumlu reaktörler, tristör kontrollü reaktörler, tristör kontrollü kondansatörler, vb.dir [2].

Güç kalitesi problemlerinin başlıcalarından olan harmoniklerin süzülmesi; güç faktörünün iyileştirilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için pasif L-C filtreler ve kapasitör bankaları kullanılagelen yöntemler olmuştur. Harmoniklerin süzülmesi için kullanılan pasif L-C filtrelerin performansı çoğunlukla birkaç harmonik bileşen ile sınırlıdır [3]. Bu nedenle pasif filtreleme ile iyi sonuçlar elde edilmek isteniyorsa harmonik sayısı kadar filtreye ihtiyaç vardır. Ayrıca pasif şönt L-C filtreler, şebeke empedansı ile rezonansa girme olasılığına sahiptir. Şebekede veya komşu yüklerdeki herhangi bir değişim rezonans riski taşıdığından pasif filtre ile uygulanacak çözümler için hat konfigürasyonun kesin bilgilerine gerek duyulmaktadır. Pasif filtreler ile mega var seviyelerinde uygulamalar da sıkça görülmektedir, örneğin 100 MVA'lık bir sistemin güç faktörünün 0.85'ten 0.90'a yükseltilebilmesi için yaklaşık 10 MVAR'lık kompanzasyona ihtiyaç vardır [4]. Böyle yüksek güçlere çıkıldığında filtrelerde kullanılan pasif bileşenlerin ağırlıkları ve boyutları dikkat çekici ölçüde artmaktadır [5]. Burada verilen tüm olumsuz özelliklerine rağmen yapılarının basit, verimliliklerinin yüksek olması ve düşük yatırım maliyetleri pasif filtrelerin kullanılmasındaki en önemli avantajlardır. Bu avantajlara rağmen yukarıda verildiği gibi pek çok olumsuz yanı da bulunan pasif filtreler, gelişen yarı-iletken teknolojisi

ile birlikte, yerlerini güç kalitesi problemlerine dinamik ve ayarlanabilir çözümler getiren aktif güç filtrelerine bırakmaya başlamıştır [6].

Yapılan çalışmalar sonucu, tepki hızları oldukça yüksek aktif güç filtreleri tasarlanmıştır. Günümüzde imal edilen güç transistörlerinin çok yüksek frekanslarda tetiklenebilmesi, aktif güç filtresinin yüksek frekanslı akım ve gerilim harmoniklerini de bastırabilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine, üç fazlı sistemlerde dengesizliğin giderilmesi ve nötr hattı akımlarının azaltılmasına olanak sağlar. Bu nedenle aktif güç filtreleri, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemidir [5].

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır, ilk bölümü giriş, ikincisi reaktif gücün tanımı ve kompanzasyonun önemini açıklıyor, üçüncü bölümde ise hem harmoniklerin kaynakları, analizi ve olumsuz etkileri şebekeye ve tüketiciye hem de filtrelerin görevleri ve çeşitleri anlatılıyor, dördüncü bölümde harmonikleri süzmek için kullanılan filtrelerin sistem konfigürasyonuna ve güç devresine göre sınıflandırması yapılmaktadır, gerilim beslemeli ile akım beslemeli şönt aktif güç filtresinin teorik olarak karşılaştırması yapılmaktadır, beşinci bölümde aktif güç filtrelerinde (AGF) kullanılan kontrol yöntemlerinin en çok kullanılan yöntemi olan (Anlık Reaktif Güç Kuramı) seçilmiştir ve detayları ile incelenmektedir, altıncı bölümde tezin pratik bölümü olarak Matlab-Simülink ortamında yapılan benzetim çalışmasını, devrelerin ve parametrelerin seçilmesini gösteriyor, yedinci bölümde her iki yöntemin çıkış şekilleri ve sonuçları göstermektedir.

Güç Kalitesi

Güç kalitesi, elektrik güç sisteminde belli bir yerde ve belli bir anda akım ile gerilimi tanımlayan çeşitli elektromanyetik olguları kapsamaktadır. Elektrik enerjisi arzının sürekliliği, frekans sabitliği, gerilimin etkin değeri, gerilimde geçici süre için oluşan çukur (sag) ve tepeler (swell), kırpışma (flicker), gerilim ve akım dalga şekillerinde oluşan harmonik bileşenler, fazlar arası dengesizlik, ani gerilim değişimleri güç kalitesi bileşenleri olarak sayılır. Gerilim ve frekansın anma değerlerinin sabit ve sürekli olması, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüs dalgası olması güç kalitesi problemlerinin olmadığı elektrik şebekesinin basit bir tanımıdır [7].

Güç kalitesi problemlerinin olmadığı elektrik şebekesi ideal bir durum olup dünyada böyle bir şebeke mevcut değildir, bu nedenle güç kalitesi problemlerini belirli ölçülerde tutabilmek için güç kalitesi bileşenlerini sınırlayan çeşitli standartlar oluşturulmuştur, EN61000-3-2 (Avrupa akım harmonik standartları) ya da IEEE-519 1992 standartları gibi; gerilim ve frekansın değişim aralığı, gerilim ve akım harmoniklerinin sınır değerleri ve güç faktörü gibi değerler bu standartlara bağlanmıştır ve standart değerlerin dışına çıkılmaması için yönetmelikler oluşturulmuştur [8].

Kaliteli elektrik şebekesi sayesinde şebekeye bağlı sistemlerin zarar görmemesi, gelişen teknoloji ile şebekedeki değişimlere daha duyarlı hale gelen sistemlerin birbirini etkilememesi ve de çıkartılan standart ve yönetmelikler ile getirilen yaptırımlardan kaçınılması için doğrusal olmayan yüklerin kullanılmasının artmasıyla birlikte artış gösteren güç kalitesi problemlerinin çözülmesi gerekmektedir [7].

2. REAKTİF GÜÇ

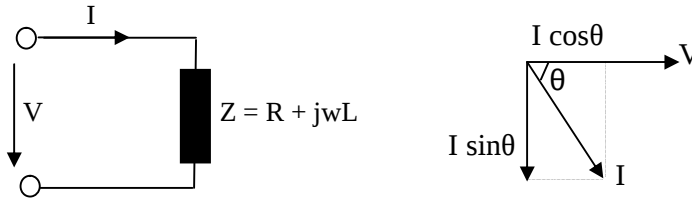
Reaktif güç, bir alternatif akım şebekesinde, gerilim ile akımın reaktif bileşenin çarpımına eşittir: $Q = V I \sin \theta$ (2.1)

İfadesinde; Q : Reaktif gücü simgelemektedir, birimi Volt-Amper Reaktiftir (VAR).

V : Gerilim etkin fazörünün genliği (volt).

I : Akım etkin fazörünün genliğidir (amper).

θ açısının (gerilim fazörü ile akım fazörü arasındaki açı) yönünün tanımlanmasına bağlıdır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi endüktif karakterdeki bir yük için akım fazörü gerilim fazörüne göre geri fazdadır (θ açısı V ekseninin altında), reaktif güç, endüktif ya da kapasitif karakterde olabilir.



Şekil 2.1 Endüktif yük gösterimi

Bir endüktif yükün kaynaktan çektiği reaktif gücün işareti pozitif, kapasitif yükün çektiği reaktif gücün işareti ise negatiftir. Aktif güç, alternatif akım şebekesinde, gerilim ile akımın aktif bileşenin çarpımına eşittir:

$$P = V I \cos \theta \quad (2.2)$$

İfadesinde P : aktif güç (watt), $\cos \theta$ ise güç faktörüdür [9].

2.1. Reaktif Güç Üretimi

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için reaktif gücün bir yerden üretilmesi gerekir. Bunun için en eski ve klasik yol, aktif güç gibi reaktif gücün de senkron jeneratör tarafından üretilmesidir. Reaktif güç üretimi; aktif güç gibi santrallerde su kuvveti, akaryakıt, kömür vb. hammadde sarfiyatını gerektirmez, sadece jeneratörün uyarımının (exciter) artırılmasıyla alternatör, reaktif güç verecek duruma getirilir. Böylece santralde üretilen reaktif güç; jeneratör, transformatör ve enerji iletim hatları

üzerinden geçerek tüketiciye ulaştırılır. Bu esnada elektrik tesisleri reaktif güç tarafından füzuli işgal edileceğinde, aktif güç bakımından kapasitelerinden tam olarak yararlanılamayacağı için ekonomik bir çözüm olmaktan çıkar, o yüzden reaktif güç üretiminin santrallerde değil de tüketim noktalarında sağlanması daha akılcı bir çözümdür [9].

2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Şebekenin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikler kullanılarak karşılanması işlemi Reaktif Güç Kompanzasyonu olarak adlandırılır. Alternatif akımla çalışan elektrik güç sistemlerinin tasarım ve işletmesinde uzun zamandır reaktif güç önemli bir sorun olarak görünmektedir. Reaktif gücün hiçbir probleme neden olmadığı varsayılsa, enerji iletim hattını meşgul etmesi bile tek başına önemli bir olumsuzluktur [9].

2.2.1. Reaktif güç kompanzasyonun faydaları

Eğer V ile I arasındaki açı büyütülürse; Eş. 2.2 ifadesindeki $(\cos \theta)$ küçülecektir. Açının büyütülmeden önceki aktif güç değeri (açı değeri büyütüldükten sonra da) sabit tutulmak isteniyorsa Eş. 2.2 ifadesinde görüldüğü gibi sabit gerilimli (enterkonnekte) şebekede I akım genliğini artırmak gerekecektir, akım genliğinin artması şebekenin daha fazla yüklenmesi demektir, hem akım genliğinin artması hem de θ açısının artması Eş. 2.1’de verilen Q reaktif gücünün artması anlamına gelecektir. Bu ise iletim hatlarının fiziksel anlamda bir işe yaramayan güç ile meşgul edilmesi ve hat kesitinin bir kısmının bu (faydasız) güce tahsis edilmesi anlamına gelmektedir.

Hatırlanacağı gibi reaktif güç iki yönlü olup (aktif güç tek yönlüdür), periyodun yarısında kaynaktan yüke doğru, periyodun diğer yarısında ise yükten kaynağa doğru akmaktadır. İletim hatlarının yapım maliyeti oldukça yüksektir, bu nedenle hat kalınlığının (reaktif güç iletimi yüzünden) artması maliyeti de artıracaktır, reaktif güç

transformatör ve jeneratörlerin içinden de geçtiğinden, iletim hatları için geçerli olan olumsuzluk bu elemanlar için de geçerli olacaktır.

Ülkelerin enterkonnekte sistemini kontrol eden birimler, iletim hatlarının verimli kullanılmasını arzu ettiklerinden, müşterilerin ihtiyaçları olan reaktif güçleri enterkonnekte sistemden çekmemesini ve kendilerinin reaktif güç üretmesini (fabrika içinde) istemekte, bu işlemi yapmaya zorlamak için reaktif güç sayaçları yardımı ile müşterinin reaktif güç tüketimi ölçüp faturalandırmaya gitmektedirler. Müşteriler ise reaktif güç parası vermemek için sayaçların ardından tesisleri içine kompanzasyon panosu kurarak fabrikalarının reaktif güç ihtiyaçlarını kendileri temin etmektedirler .

Şebeke Açısından Faydaları

1. Şebekenin güç kapasitesi artar.
2. Şebekenin ısı kayıpları azalır.
3. Gerilim düşümü azalır.
4. İletim hatlarının geçici durum kararlılığı iyileşir.
5. Faz gerilim dengesizlikleri azaltılmış olur.
6. Gerilim dalgalanmaları (kırpışma olayları) azalır.
7. Harmonikler azalır.

Tüketici Açısından Faydaları

1. Kompanzasyon tesisine sahip bir işletmenin işletme maliyetleri azalır.
2. Güç katsayısı düzeltildiği için müşteri şebekeden çok daha az reaktif güç çeker ve daha az para öder.
3. Elektrik enerjisinin kalitesizliğinden doğabilecek arıza riski en aza indirilmiş olur.

Enerji kalitesi ile üretim kalitesi direkt bağlantılı olacağı için işletmenin ürün kalitesi de artar [9].

2.2.2. Reaktif güç kompanzasyon konusunda yapılan çalışmalar

Reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar 20. Yüzyılın başlarına rastlar. Endüstride ilk sabit kompensatör kullanımı 1914 yılında olmuştur. Endüstrinin zamanla gelişmesiyle, endüktif yüklerin çok karmaşık bir şekilde devreye girip çıkmalarıyla klasik kompanzasyon çeşitleri yetersiz kalmıştır. Kademeli ayar yapan kompensatörlerde kondansatörlerin devreye girip çıkmaları anında şebeke geriliminde dalgalanmalar olmaktadır, bu durum harmonik oluşturduğundan dolayı istenmez. Bunların yerine 1970 yılından itibaren yarı iletkenlerle devreye girip çıkartılan statik kompensatörler kullanılmaya başlanmıştır. Endüstride harmoniklere karşı aşırı duyarlı cihazların ve reaktif güç isteği çok ani değişen cihazların aynı anda kullanılmalarının zorunluluğu daha iyi kompanzasyon yapabilecek yeni tasarımlar gerektirmiştir [10].

Aktif güç filtreli ilk kez 1976 yılında Gyugi tarafından, pasif filtrenin mahzurlarını yok etmek ve daha iyi bir harmonik kompanzasyonu sağlamak için önerilmiştir.

1993 yılında H. Jou ve ekibi tarafından aktif güç filtrelerinin gelişimi ve soruları belirtilmiş, bir fazlı PWM kontrollü paralel aktif güç filtresinin çalışma modları irdelenmiştir.

M. Kurokawa ve ekibi tarafından 2000 yılında yapılan çalışmada, aktif güç filtresinin anahtarlama kayıplarını azaltmak için çalışmalar yapılmıştır. Filtre performansı direkt olarak anahtarlama frekansına bağlı olup, yüksek anahtarlama frekanslarında büyük anahtarlama kayıpları oluşmaktadır, bu nedenle sayısal işaret işlemci kullanılarak yumuşak anahtarlama (soft switching) yapılmış ve filtre performansının arttığı irdelenmiştir [11].

3. HARMONİKLER

Bütün teknolojik alanlarında olduğu gibi güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler; anahtarlama güç kaynakları, ark ve pota ocakları, motor sürücüler, AA/DA dönüştürücüler ve çevirgeçler gibi doğrusal olmayan yüklerin kullanımı artırmıştır. Bu yüklerin kullanımındaki artış, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesinde büyük ölçüde bozulmalara neden olmuştur. Doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artışa paralel, enerji kalitesine duyarlı yüklerin kullanımı da oldukça artmıştır ve artmaya devam etmektedir, bu sebeple, akım harmonikleri ve akım harmoniklerinden kaynaklanan gerilim harmonikleri, bugün birçok ülkede ciddi bir problem haline gelmiştir [12].

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüsel olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüsoidal dalgaanın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar sinüsel olmayan dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile sinüsel olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar [13].

Uluslararası IEEE 519-1992'ye göre standartlar içinde kabul edilen harmonik bozulma değerleri, gerilim için %3, akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelebilir. Elektrik Güç kalitesinin bozulması ile ilgili belli başlı standartlar aşağıda belirtilmiştir [8].

3.1. Harmonik Üreten Kaynaklar

Son 50 yılda yapılan teorik ve uygulamalı araştırmaların sonucuna göre; harmonik kaynakları, günümüzde mevcut olan klasik harmonik kaynakları ve gelecekte oluşabilecek yeni harmonik kaynakları olarak iki grupta incelenebilir:

3.1.1. Klasik harmonik kaynakları

1. Elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler.
2. Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler.
3. Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik alanı dalga şekillerindeki bozulmalar.
4. Senkron makinelerinin hava aralığı döner alanının harmonikleri.
5. Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları.
6. Şebekedeki doğrusal olmayan yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler, v.b. [14].

3.1.2. Yeni harmonik kaynakları

1. Motor hız kontrol düzenleri.
2. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC).
3. Statik VAR jeneratörleri.
4. Kesintisiz güç kaynakları.
5. Olasılıkla elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri.
6. Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler.
7. Direkt frekans çevirici ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar [14].

3.2. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

Fransız matematikçi “J. Fourier” tarafından icat edilen “Fourier Analiz”, harmoniklerin analizi için kullanılmaktadır, sinüs olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları sinüsoidal dalgaların toplamından oluşmuştur, bütün dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “Fourier Serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier Bileşenler” adı verilir. Herhangi bir periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması yeterlidir.

$f(t) = f(t+T)$ ifadesiyle belirlenen devirli herhangi bir fonksiyon şu şartları sağladığında fourier serisine açılabilir:

- 1) Fonksiyon süreksiz ise, T periyodu içerisinde sonlu sayıda süreksizlik noktası bulunmalıdır.
- 2) Fonksiyonun T periyodu için sonlu ortalama değeri bulunmalıdır.
- 3) Fonksiyonun sonlu sayıda minimum ve maksimum değerleri olmalıdır.

Dirichlet Koşulları olarak adlandırılan bu koşullar sağlandığında fonksiyonun fourier açılımı vardır.

Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serileri, verilen fonksiyonu sinüsoidal hale getirir. Bu analiz ile bir fonksiyon, genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sonsuz sayıda sinüsoidal dalganın toplamı şeklinde yazılabilir. Herhangi bir periyodik dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir [33].

Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Periyodik fonksiyonlar

Fourier serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinde oluşan bir seri halinde yazılabilir. Bu tanımdan hareketle T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası Fourier'e göre:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (3.1)$$

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

Şeklinde açılabilir, Bu denklemlerde:

t : Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olmaktadır).

A_0 : "0" indisi ile gösterilen sabit terim (doğru veya ortalama değer olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır).

A_1 : "1" indisi ile gösterilen birinci terime, temel bileşen adı verilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüsoidal dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler.

"2, 3, 4, ..., n" indisi ile gösterilen bileşenleri ise harmonik adı verilmektedir.

Fourier katsayıları ise (A_0, A_n, B_n) analitik yöntemle aşağıdaki denklemlerle bulunabilir:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (3.3)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos nt dt \quad (3.4)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin nt dt \quad (3.5)$$

Sonuç olarak:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.6)$$

$$\text{ya da } THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.7)$$

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (3.8)$$

Şeklinde yazılabilir.

V_n : n. bileşen gerilimi.

I_n : n. bileşen akımı.

V_1 : Temel bileşen gerilimi.

I_1 : Temel bileşen akımı [14].

3.3. Harmoniklerin Etkileri

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

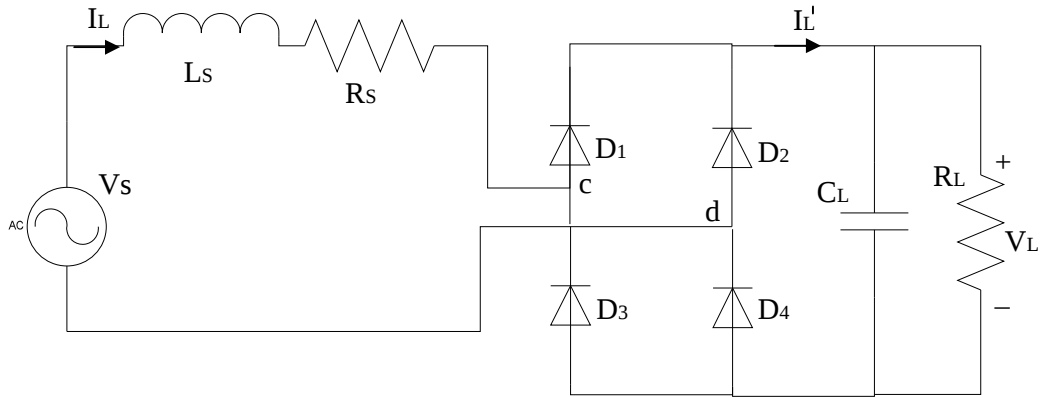
- a. Jeneratör ve şebeke geriliminin bozulması.
- b. Gerilim düşümünün artması.
- c. Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektriklerin zorlanmaları nedeniyle zarar görmeleri.
- d. Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması.
- e. Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi.
- f. Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler.
- g. Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları.

- h. Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar.
- i. Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları.
- j. İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- k. Elektrikli cihazların ömrünün azalması.
- l. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma.

Bu etkilerden de anlaşılmaktadır ki, harmonikler sistemdeki hemen hemen tüm elemanlar üzerinde olumsuz etki göstermektedir. Bu sebepten dolayı harmoniklerin, üretilmeden veya üretildikten sonra yok edilmesi gerekmektedir [14].

3.4. Doğrusal Olmayan Yükün Matematiksel Modeli

Harmoniklerin olan doğrusal olmayan yükün örneği olarak, tek fazlı denetimsiz doğrultucu alınacak, tipik bir doğrusal olmayan yükün bağlantısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Doğrultucunun çalışma durumları diyotların iletimde ve kesimde olmalarına göre belirlenir.



Şekil 3.1 Doğrusal olmayan yük

Durum 1: D₁, D₄ diyotları iletimde ve C_L kondansatörü şarj oluyor.

Durum 2: D₂, D₃ diyotları iletimde ve C_L kondansatörü şarj oluyor.

Durum 3: D₁, D₂, D₃, D₄ diyotları kesimde ve C_L kondansatörü deşarj oluyor, bu durumda yükün kaynak gerilimi ile bağlantısı yoktur.

Yükün bu çalışma durumları için modellenmesi yapılırsa:

a. Doğrultucunun durum değişkenleri I_L ve V_L olarak seçilir, diyotların iletimde ve kesimde çalışma durumları anma gerilim ve akımları ile ilişkilidir.

b. Anahtarlama fonksiyonu (δ) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{(D1 ve D4 iletimde) VE (D2 ve D3 kesimde)} \\ 0 & \text{(D1 ve D4 kesimde) VE (D2 ve D3 kesimde)} \\ -1 & \text{(D1 ve D4 kesimde) VE (D2 ve D3 iletimde)} \end{cases}$$

$$c. V_{cd} = \delta \cdot V_L \quad (3.9)$$

$$I_L' = \delta \cdot I_L \quad (3.10)$$

d. Kirchoff yasaları uygulanarak aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$V_S = V_{Ls} + V_{Rs} + V_{cd} \quad (3.11)$$

$$I_L' = I_{CL} + I_{RL} \quad (3.12)$$

e. Denklemlerde değerler yerine yazılır:

$$V_S = L_s \cdot \frac{dI_L}{dt} + R_s \cdot I_L + \delta \cdot V_L \quad (3.13)$$

$$\delta \cdot I_L = C_L \cdot \frac{dV}{dt} + V_L / R_L \quad (3.14)$$

g. Düzenlenerek durum uzay denklemleri elde edilir:

$$d\dot{I}_L / dt = -R_s / R_L + V_s / L_s - \delta \cdot V_L / L_s \quad (3.15)$$

$$dV_L / dt = (-1 / R_L \cdot C_L) \cdot V_L + \delta \cdot I_L / C_L \quad (3.16)$$

h. Denklemlerin birleştirilmesiyle:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{\delta}{L_s} \\ \frac{\delta}{C_L} & -\frac{1}{R_L C_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (3.17)$$

durum uzay modeli elde edilir [15].

3.5. Filtreleme

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarıma yönelik alınacak tedbirler yeterli değildir. Bu tedbirlerde ilave olarak harmonik akımlarının şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelerde “harmonik filtresi” adı verilir.

3.5.1. Filtre çeşitleri

- Alçak geçirgen filtre: Düşük frekanslı sinyalleri geçirip, yüksek frekanslı sinyalleri süzen filtre çeşididir.
- Yüksek geçirgen filtre: Yüksek frekanslı sinyalleri geçirip, düşük frekanslı sinyalleri süzen filtre çeşididir.
- Bant geçirgen filtre: Hem yüksek hem de düşük frekanslı sinyalleri süzüp belli bir aralıktaki sinyalleri geçiren filtrelerdir [14].

3.5.2. Filtrelerin görevi

Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akımı veya gerilimlerin etkisini yani harmonik seviyesini azaltmak veya yok etmektir. Genelde en etkin harmonik bileşenler için tasarımı yapılır. Etkisi az olan harmonik bileşenler için zayıflatan bir filtre devresi düşünülebilir. Gerçekte filtre kullanımının nedeni hem teknik hem de ekonomiktir. Filtrelerde, harmoniklerin meydana getirdikleri etkiler sonucu karşımıza çıkan teknik ve ekonomik olumsuzlukların giderilmesi hedeflenir. Harmonik filtrelerin görevi:

- a) Harmonik üreten bir cihazın (örneğin bir redresörden veya evirgeçten) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek.
- b) AA sisteme enjekte edilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek.
- c) Radyo frekans girişimlerini elimine etmek [14].

3.5.3. Filtre tasarımı

Harmonik filtreler her tesis için ayrı tasarım gerektirir. Filtre tasarımında akım kaynağı, filtre admitansı ve sistem admitansı ayrıntılı değerlendirme gerektirir. Bu nedenle tasarım yaparken aşağıdaki bilgilere ihtiyaç vardır:

- 1. Harmonik üreten yükün meydana getirdiği harmonik akım spektrumu.
- 2. İzin verilen toplam distorsiyon değeri.
- 3. Tesiste gereksinim duyulan reaktif güç değeri.
- 4. Diğer kaynakların sebep olduğu harmoniklerin seviyesi.
- 5. Şebekedeki diğer yükler ile güç sisteminden eşdeğer devresinin sistemde etkili harmonikler için empedans değişimi.
- 6. Filtrenin çalışma değerleri (frekans, sıcaklık, gerilim, vb.) [14].

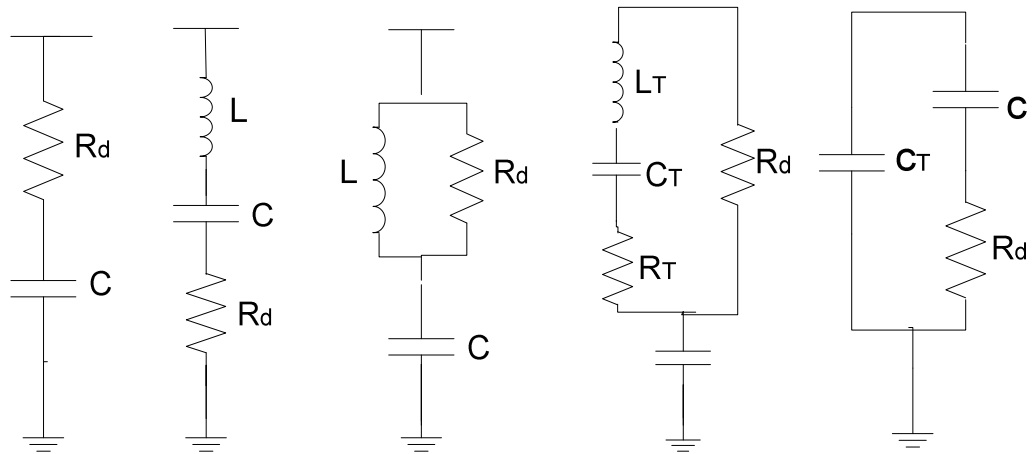
4. SINIFLANDIRMA

Bu olumsuzluklara sebep olan harmonik distorsiyonu azaltmak için iki tip filtre kullanılır:

1. Pasif Filtre (Passive Filter).
2. Aktif Filtre (Active Filter).

4.1. Pasif Filtre

Pasif harmonik filtreler; kondansatör (C), reaktör (L) ve dirençten (R) oluşmaktadırlar [23].



Şekil 4.1 Değişik pasif filtre devreleri

4.1.1. Pasif filtrenin dezavantajları

1. Sistem değişikliklerine uygun değil.
2. Kullanılma süresine, yıpranmasına ve sıcaklık şartlarına bağlı olarak yeniden ayarlanmalı.
3. Sistem empedansının pasif filtre tasarımı üzerindeki etkileri.
4. Çok yer kaplar.

5. Sabit bir kompanzasyon imkanı sunar.
6. Performanslarının şebeke parametrelerine bağlı olması.
7. En önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturur [2].

4.2. Aktif Güç Filtreleri

Aktif güç filtreler, güç kalitesini artıracak uygulamalara sahiptir ve şunları sağlar:

1. Akım ve gerilim harmoniklerinin süzülmesi.
2. Şebeke ile yük arasında harmonik yalıtımı.
3. Reaktif güç kompanzasyonu.
4. Nötr akımlarının kompanzasyonu.
5. Gerilim regülasyonu.
6. Kırpışma kompanzasyonu.
7. Rezonansların bastırılması [16].

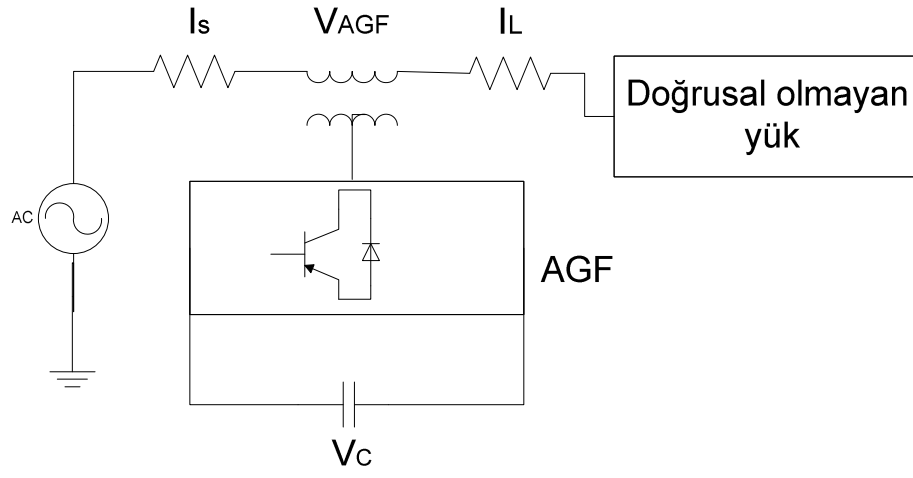
4.2.1. Aktif güç filtrelerin sınıflandırılması

Sistem konfigürasyonuna göre

- a) Seri (Series).
- b) Paralel (Shunt).
- c) Hibrit (Hybrid).
- d) Evrensel Hibrit.

Seri aktif filtre

Şekil 4.2 tek kullanılan aktif seri filtrenin temel bloğunu göstermektedir. Filtre yükten önce devreye seri olarak uygun transformatör üzerinden bağlanır.



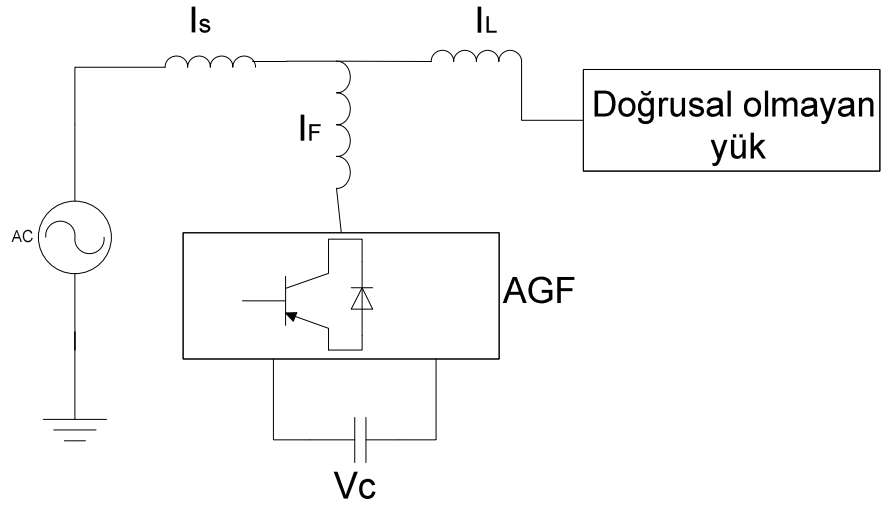
Şekil 4.2 Seri Aktif Filtre

Görevi

1. Gerilim harmoniklerini yok eder.
2. Yükün ve hattın gerilimlerini düzeltir [2].

Paralel aktif filtre

Paralel aktif filtreler Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımlarını eleyerek şebekeden ideal akımın geçmesini sağlarlar. Bunu, reaktif veya doğrusal olmayan yüklerin üretmiş olduğu harmonik akımlarla aynı büyüklükte ve zıt fazda akımları şebekeye göndererek sağlar.



Şekil 4.3 paralel aktif filtre kontrol devresiyle

Görevi

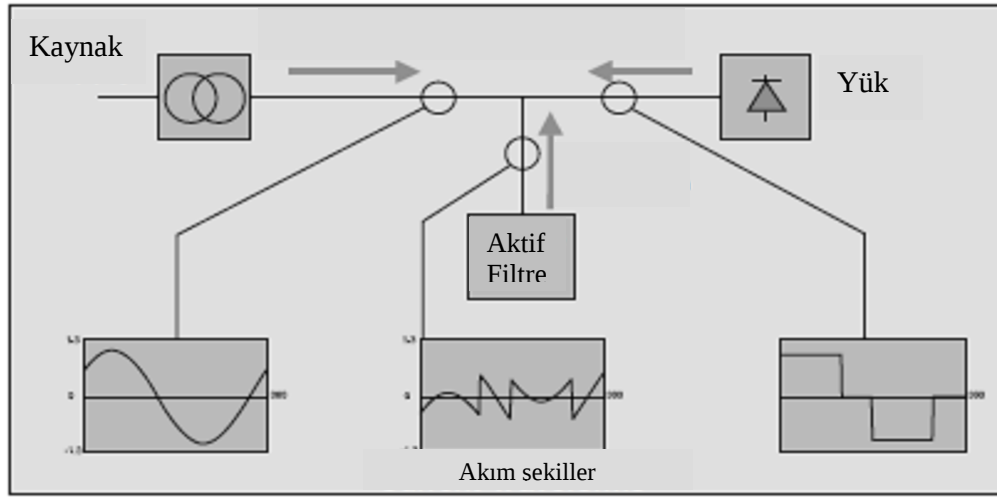
1. Akım harmoniklerini eler.
2. Reaktif güç kompanzasyonu sağlar.

Paralel aktif filtrenin analizi

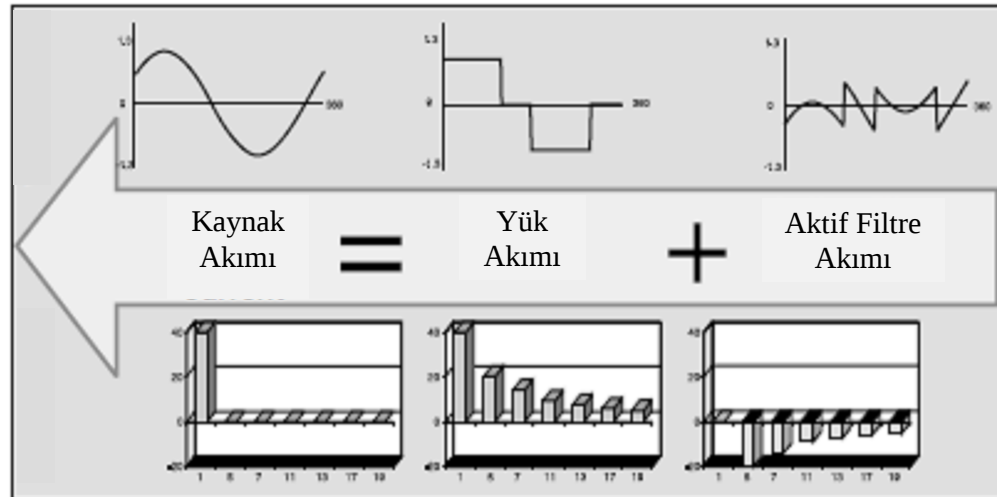
Paralel aktif filtre, yükün AC sistemden çektiği harmonik akım ile aynı genlikte fakat ona ters fazda bir akım üreterek sisteme (alternatif gerilimli şebekeye) geri enjekte ve yüke paralel bağlanan bir DGM evirgeçten ibarettir. Devrenin kontrolü dedektör (harmonik belirleme ünitesi) ve ayırıcı devreleri yardımıyla sağlanır. Genellikle bir akım harmoniği Norton eşdeğer devresiyle, gerilim harmoniği ise Thevenin eşdeğer devresiyle gösterilir. Norton eşdeğeri saf bir akım kaynağı (harmonik akım üreten) ve paralel bir $Z_L = \infty$ empedansından oluşur. Thevenin eşdeğeri ise saf bir gerilim kaynağı (harmonik gerilimleri üreten) ve seri bir $Z_L = 0$ empedansından ibarettir [17].

Çalışma prensibi

Jenerik olarak aktif güç filtresi şekil 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Doğrusal olmayan bir yük akımında harmonik bileşenler bulunmaktadır. Yükün ihtiyacına göre kaynaktan reaktif güç de çekilmektedir. Aktif güç filtresinin görevi kaynak akımındaki harmonikleri yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır.



Şekil 3.4 paralel aktif güç filtresinin çalışma prensibi



Şekil 3.5 paralel aktif filtresinin harmonik ve spektrum

Yük, ihtiyaç duyduğu harmonikleri ve reaktif gücü aktif filtreden sağlar. Bu sayede kaynak ve aynen barada bağlı diğer yükler doğrusal olmayan yükün ürettiği harmoniklerden etkilenmemiş olur.

Ortak bağlantı noktasında akım eşitlikleri yazıldığında aktif filtrenin sadece harmonik yok edimi için sağlaması gereken akım Eş. 4.5'te verilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu için aktif filtre yükün reaktif güç ihtiyacını da sağlamalıdır (Eş. 4.6).

$$I_S = I_L - I_F \quad (4.1)$$

$$I_L = I_{L1} + I_{Lh} \quad (4.2)$$

$$I_F = I_{Lh} \quad (4.3)$$

$$I_S = I_{L1} \quad (4.4)$$

$$Q_S = Q_L - Q_F \quad (4.5)$$

$$Q_F = Q_L \quad (4.6)$$

$$Q_S = 0 \quad (4.7)$$

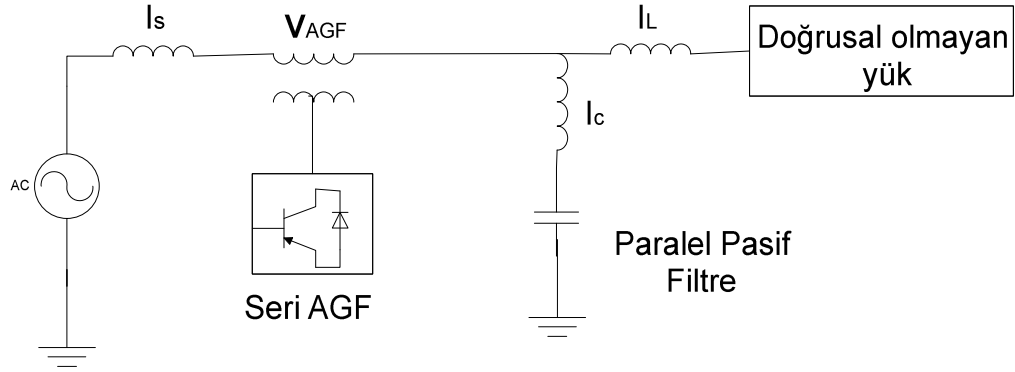
I_S, I_L, I_F : kaynak, yük ve filtre akımları

I_{L1}, I_{Lh} : kaynak akımı temel bileşeni ve toplam harmonik bileşeni

Q_S, Q_L, Q_F : kaynak, yük ve filtre reaktif güçleri [18].

Hibrit (Karma) filtreler

Aktif güç filtrelerinin ilk yatırım maliyetleri pasif filtrelere göre oldukça fazladır. Bu sebeple aktif ve pasif harmonik filtreler beraber kullanılarak hem bu filtrelerin yetenekleri birleştirilmekte hem de ilk yatırım maliyetleri düşürülebilmektedir. Bu tip sistemler hibrit (karma) harmonik filtreler olarak adlandırılmaktadır, Şekil (4.6) .

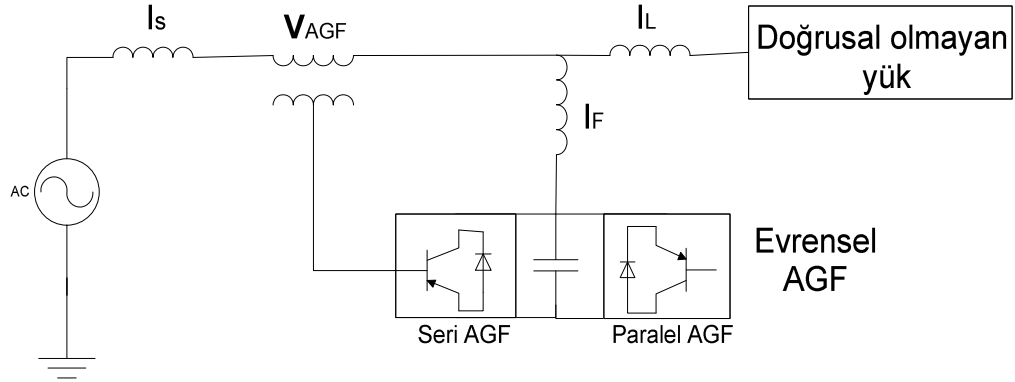


Şekil 4.6 Aktif seri ve pasif paralel filtrelerin birleşiminden oluşan karma AGF

Evrensel filtreler

Şekil 4.7’de aktif paralel ve aktif seri filtrelerin birleştirilmesiyle oluşturulan ve evrensel AGF olarak adlandırılan filtre devresi gösterilmektedir. DA hattındaki depo elemanları (bobin veya kondansatörden herhangi biri) iki akım kaynağı veya gerilim kaynağı köprüleri arasında paylaştırılır. Şekilde gösterilen tek fazlı bağlantısı olup üç fazlı bağlantıları da mevcuttur. Bilgisayar, medikal cihazlar gibi hassas yüklerde kullanılır. Gerilim ve akım harmonikleri yok edilmiş temiz bir güç verir. Yüksek maliyetli olması ve çok sayıda yarıiletken içerdiği için denetiminin zor olması dezavantajlarıdır

[15]



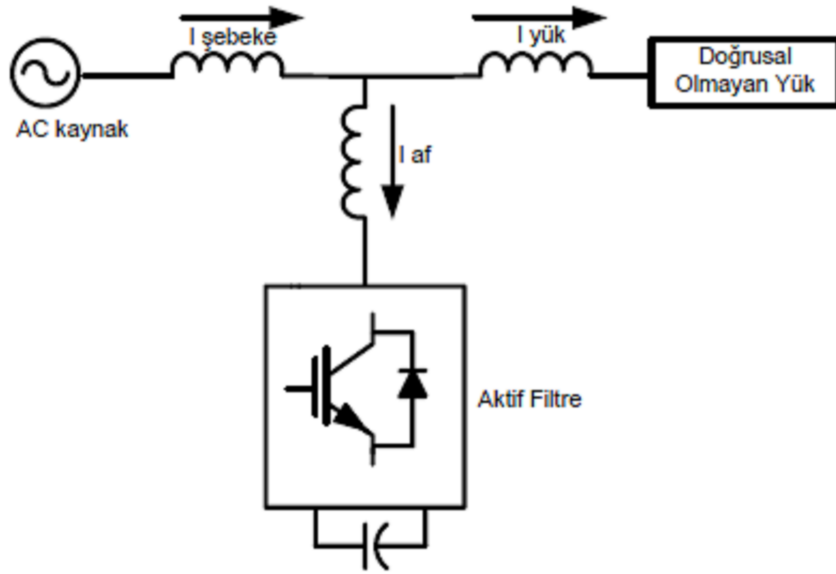
Şekil 4.7 Aktif seri ve paralel filtrelerin birleşiminden oluşan evrensel AGF

Güç devresine göre sınıflandırma

- a) Gerilim beslemeli (Voltage type).
- b) Akım beslemeli (Current type).

Gerilim beslemeli dönüştürücü

Uygulamada en çok kullanılan dönüştürücü çeşididir. Bu dönüştürücüler paralel bağlanarak normal değerleri artırılabilir. Bunlarla yüksek frekansta anahtarlama yapmak mümkündür. Böylece evirgecin gücünü arttırmadan yüksek dereceli harmonikleri elimine etmek mümkün olacaktır. Ayrıca bu dönüştürücüler akım beslemelilere göre daha ucuzdur ve daha az yer kaplarlar. En önemli dezavantajları kontrol sistemlerinin karmaşık olmasıdır. Özellikle, dönüştürücülerin paralel bağlanması gerektiğinde kontrol devresinin karmaşıklığı daha da artar. Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için kolaylıkla kullanılabilir. Uygulamada IGBT yerine diğer anahtarlama elemanları da kullanılabilir (BJT, GTO, vb.). Fakat PWM dönüştürücülerde yüksek anahtarlama hızları gerektiğinden, yüksek anahtarlama hızlarına sahip olmalarından dolayı IGBT kullanılması daha uygundur [24].

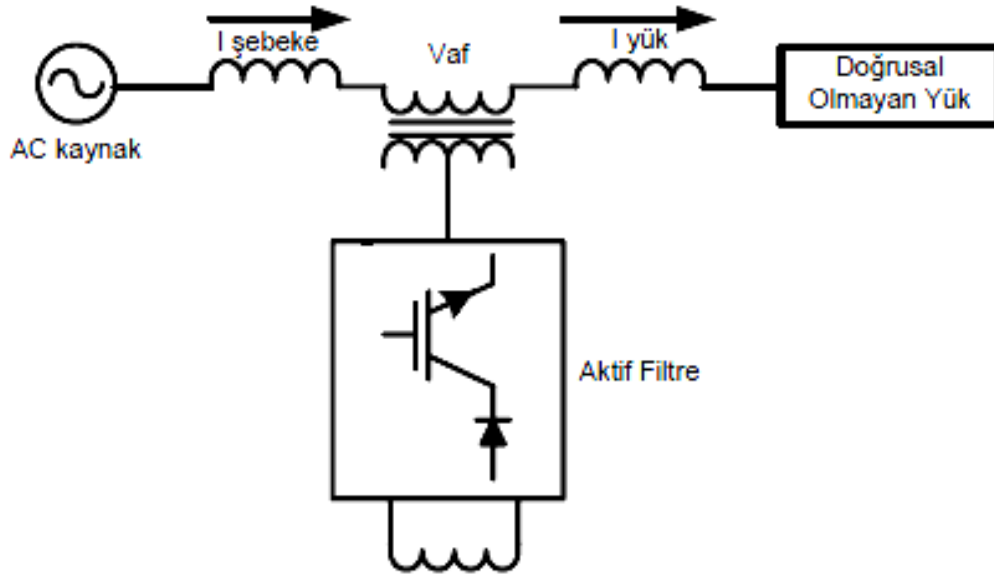


Şekil 4.8 Gerilim beslemeli tip AGF

Akım beslemeli dönüştürücü

Akım beslemeli dönüştürücülerin yapısı daha basit ve daha güvenilirdir (kontrol devresi gerilim beslemeli dönüştürücülere göre daha basit olduğundan). Kayıplarının yüksek olması en önemli dezavantajlarıdır. Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için uygulanabilirken, akım beslemeli dönüştürücülerin bireysel yüklere uygulanması daha uygundur (kayıplarının yüksek olmasından dolayı). Üç fazlı BJT'li akım beslemeli evirgecin ana akım devresi şekil 4.11'de görülmektedir.

Evirgecin girişindeki DA kaynak ve büyük endüktanslı bobin seri bağlanarak bir akım kaynağı oluşturulmuştur. Belirli bir anda üst ve alt kollardan sadece birer BJT iletimdedir. Akım beslemeli dönüştürücüde giriş akımı sınırlı ve kontrollü olduğundan, hatalı tetiklenmelere veya kısa devrelere neden olmaz. Ters akım diyoduna ihtiyaç kalmadan reaktif veya karşı gerilim üretme özelliği bulunan yükleri besleyebilir. Bunlara karşın pratikte kaynaklar sabit gerilimli oldukları için, akım kaynağı elde etmek için evirgeç girişinde büyük değerli bir bobine ihtiyaç vardır. Ters yönde gerilimi engellemek için seri olarak diyot yarı iletken anahtara bağlanmalıdır [24].



Şekil 4.9 Akım beslemeli tip AGF

4.2.2. Gerilim beslemeli ve akım beslemeli şönt aktif güç filtrelerinin karşılaştırması

Temelde aktif güç filtresi harmonik kompanzasyonunda DA enerji depolama elemanı ile çalışabilir ve DA güç kaynağına ihtiyaç duymaz. Sabit DA büyüklüğünü (DA kapasitör gerilimi, DA endüktans akımı) sürekli koruyabilmek için temel frekansta çok küçük akım çekmesi yeterli olacaktır. Çekilen güç, aktif güç filtresinin kayıplarını karşılar. Akım beslemeli aktif güç filtresinin gerilim beslemeli aktif güç filtresine kıyasla belirgin dezavantajı daha yüksek işletme kayıplarıdır.

Çizelge 3.1 GBAGF ile ABAGF'nin karşılaştırması [31].

	GBAGF	ABAGF
Faz sayısı	1 ya da 3 fazlı	3 fazlı
Çalışma prensibi	Akım-Kontrol devresi ile çalışarak istediğimiz sinus dalgayı üretir	Yük akım harmonikleri yok etmek için şebekeye akım verir
Güç seviyesi	Alçak ve orta güçlerde	Orta güçlerde
Kontrol Karmaşıklık seviyesi	Kolay (kapasitör gerilimi sabit tutar)	Karışık (İndüktör akımını sabit tutar)
Tepki hızı (ms)	Hızlı (0.1)	Orta (1)
Aktif ekipmanlar sayısı	Tek fazlı: 4 anahtar, 4 diyot Üç fazlı: 6 anahtar, 6 diyot	Üç fazlı: 6 anahtar, 6 diyot
Anahtar Frekansı (kHz)	(20 – 30)	(2 - 5)
DA Enerji Depolama	Yüksek DA Kapasitör (4700 – 9000) μ F	Yüksek DA İndüktör (100 mH)
DA Gerilim ya da Akım	(1.3 - 1.5) x nominal kaynak gerilim	(1.3 - 1.5) x nominal kaynak akım
Kontrol Yöntemi	DA bağ gerilimine, akım kontrollü DGM metodu	DA bağ akımına, DGM metodu
Gerilim ya da akım değişimi	Yüksek oranlı gerilim değişimi (+Vdc) ve (-Vdc)	Yüksek oranlı akım değişimi (+Idc) ve (-Idc)

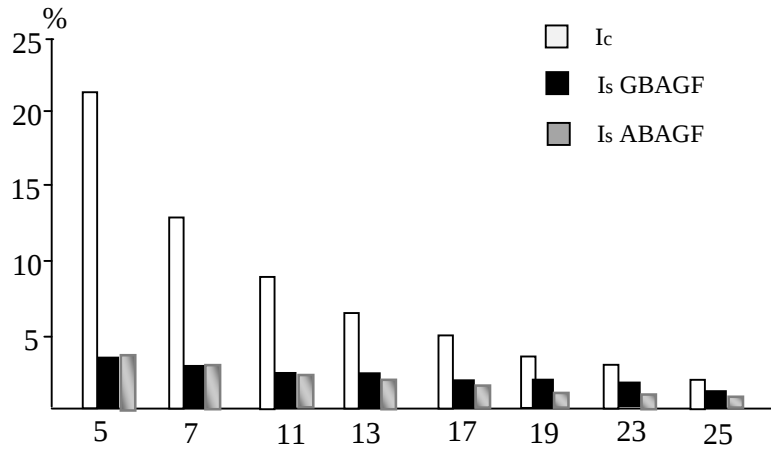
Şönt aktif güç filtresi tipleri:

- Güç katı.
- Filtreleme verimliliği.
- Yükün geçici rejimlerinde filtrenin cevabı.
- Kontrol mantıkları (zaman bölgesine göre frekans bölgesi).

Kategorilerinde karşılaştırılmalı.

Güç katı

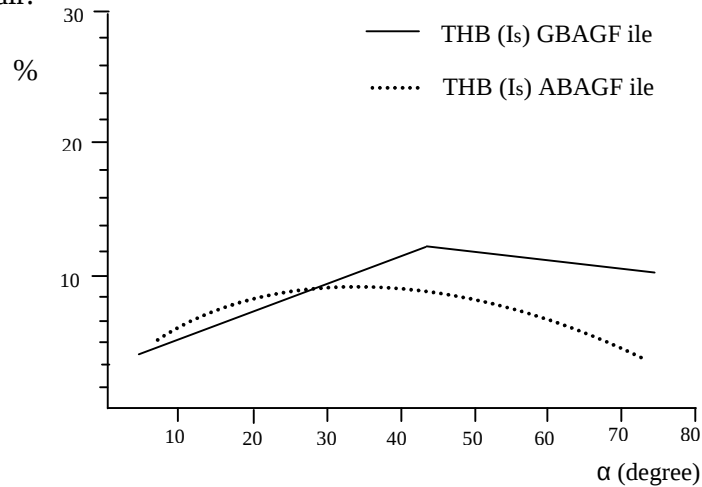
- 1) GBAGF, DA eleman düşünüldüğünde daha kolay hayata geçirilebilir.
- 2) ABAGF, kontrol karmaşıklığı ve yüksek frekanslardaki harmonikleri filtreleme yeteneği açılarından GBAGF'ye kıyasla daha başarılıdır.
- 3) GBAGF güç katında 6 adet IGBT modülü kullanılırken ABAGF güç katında ek olarak 6 adet hızlı diyot kullanma zorunluluğu vardır [18].



Şekil 3.10 Akım harmonik spektrumu

Filtreleme verimliliği

Yük değişimlerinde GBAGF'nın performansı ABAGF'den daha çok etkilenmektedir.



Şekil 4.11 Tetikleme açısına göre akımdaki toplam harmonik bozulma

Yük geçici rejimlerinde filtrenin davranışı

Geçici yük rejimlerinde GBAGF daha yüksek gerilim ve ABAGF daha yüksek akım sağlayabilmek durumundadır ancak GBAGF anahtarlama elemanı kullanımında daha başarılıdır.

GBAGF yapısının belirgin avantajı, ABAGF'deki endüktansına göre daha verimli, küçük boyutlu, daha ucuz olan kapasitif enerji depolama elemanında gizlidir. Ne var ki yakın gelecekte süper iletken teknolojisinin uygulanabildiği endüktans tasarımları ABAGF'yi daha avantajlı kılacaktır.

GBAGF doğrusal olmayan yüke ABAGF'den daha duyarlıdır. Buna karşılık ABAGF performansı ise kaynak empedansına daha fazla bağlıdır [18].

Zaman bölgesinde düzeltmeye karşı frekans bölgesinde düzeltme

Her iki yaklaşım da çeşitli çalışmalarda denenmiş olmasına rağmen herhangi birinin belirgin üstünlüğü gösterilmemiştir. Zaman ekseninde düzeltme yapmanın en büyük avantajı güç sistemindeki değişimlere hızlı cevap vermesidir. Uygulaması kolaydır ve yoğun matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duymaz. Dalga şeklinin kendini tekrarlayıp tekrarlamaması önem taşımaz, anlık ölçüm prensibine dayandığı için geçmişle ilgili kayıt tutmaz.

Frekans ekseninde yapılan düzeltme bozunmanın kendini tekrarına bağlıdır, istenilen frekanstaki harmonik hesaplanarak sadece o harmoniğin ve/veya harmoniklerin yok edilmesine olanak tanır. Bu tekniğin uygulanmasındaki kısıtlar, örnekleme frekansı ve anahtarlama frekansıdır. Şu andaki teknoloji 51. Harmoniği belirlenip yok edilmesine olanak sağlamaktadır. Frekans ekseninde yapılan düzeltme tekniğinin en önemli dezavantajı yoğun hesaplama teknikleridir, filtrelenecek harmonik sayısı arttıkça hesaplamalar da o denli artar ve cevap verme süresi gecikir [18].

4.2.3. Aktif güç filtrelerin uygulamaları

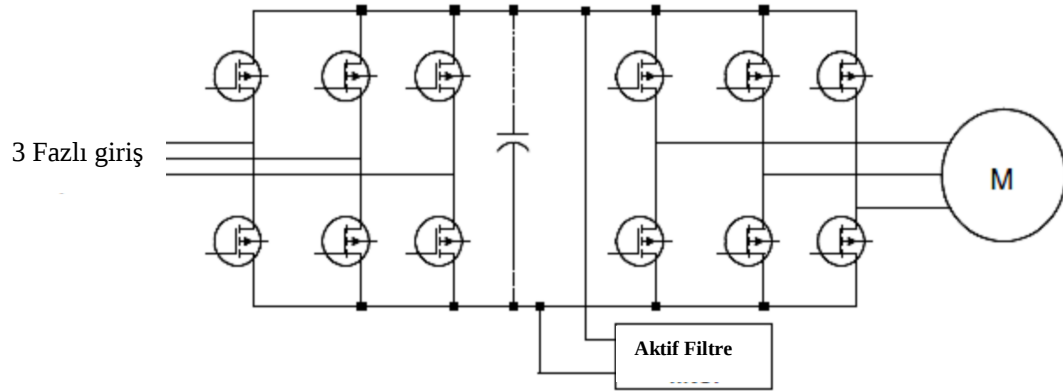
Aktif filtreler; harmonikleri yok etmek için tasarlanmıştı ama şimdi birçok işlevleri ve pek çok uygulamaları ortaya çıktı. Aktif filtreleri; topoloji ve kontrol planına dayanarak, akım harmonikleri, gerilim harmonikleri, reaktif gücü, yük dengesizliği, natural akımı, gerilim dengesizliği, gerilim regülasyonu ve gerilim yükselmesi ve düşmesini kompanze edebilir. Aktif filtreler; yüksek güçlü doğrusal olmayan yüklere yakın kurulur, örneğin elektrikli fırınlar ve HVDC sistemlerin yanında. Aşağıda aktif filtrenin bazı özel uygulamaları açıklanacak [19].

Ayarlanabilir hızlı disk

İndüksiyon motor disklerinde, harmonik ve sistem sinyalleri arasında bir müdahale var, bu da uygunsuz çalışmalara neden olur. Basit düşük geçirgen pasif filtrelerinin harmoniklerini engellemek için kullanılabilir, ancak bu büyük hacimli ve ağır olacak. Örneğin, bir 1.5 MW'lık İndüksiyon motorun düşük geçirgen LC pasif filtrenin kesme frekansı 5 kHz olursa toplam ağırlığı 5 ton olacaktır.

DA kapasitor iptali

Küçük boyutlu, güvenilir, pahalı, ve rezonansı imkansız olan aktif filtre ile iri ve güvenilmez kapasitorlerin elemine yapılacaktır, şekil 4.8'de gösterildiği gibi, aktif filtre; gerilim harmonikleri yok edip DA/AA dönüştürücüsünün DA tarafındaki gerilimi düzgün olur, bu nedenle DA çıkışın kalitesi daha iyi olacak.



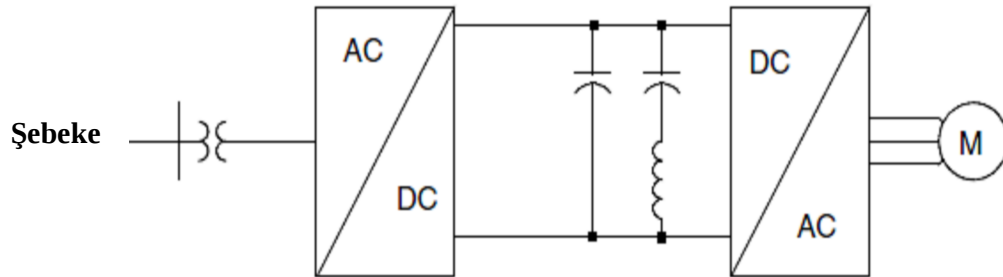
Şekil 4.12 DA/AA dönüştürücüsü ile kapasitor iptalı

HVDC sistemi

Aktif filtreler; HVDC sistemlerinde hem DA hem de AA tarafında kullanılır. DA tarafında; gerilim harmoniklerini, AA tarafında; akım harmoniklerini yok etmek için kullanılır.

Yüksek güç lokomotifleri

Yüksek Güç Lokomotiflerde, DA/AA değişken frekanslı evirgeçlerden kaynaklanan akım harmonikleri, AA/DA doğrultucularda ve trafolarda aşırı kayıplara neden olur (şekil 4.9). Bu harmonikleri yok etmek için aktif filtreler en iyi yöntem sayılır.



Şekil 4.13 Hızı değişen ve gücü yüksek olan indüksiyon motor

Uzak yerlerde üretim

Uzak yerlerde üretim devreleri değişken frekanslarda çalışsa daha yüksek verimliliğe sahip olur. Bu sistemlerde doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan akım harmonikleri, jeneratörde yüksek kayıplara ve gerilimde distorsiyona neden olur, Bu kadar harmonikler pasif filtre kullanarak elenemez, örneğin bir tipik rüzgar enerjisi devresinde harmonikleri önlemek için aktif filtreler elektrik şebekesine bağlanır.

Ticari yükler

Ticari binalarda; Bilgisayarlar, lazer yazıcılar, florsan lambalar gibi doğrusal olmayan yükler için aktif filtrelerden yararlanabilir; akım harmonikleri, reaktif gücü, natural akımı ve yük dengesizlikleri kompanze etmekte kullanılabilir. Ayrıca gerilim harmoniğinin, gerilim düşmesinin ve yükselmesinin etkisini önler [19].

5. KONTROL YÖNTEMLERİ

Filtrenin performansını belirleyen en önemli etken kompanzasyon akımının hesaplaması, günümüzde en fazla kullanılan matematiksel metotlardan bazıları şunlardır:

1. Anlık reaktif güç kuramı.
2. Bant durduran filtre yöntemi.
3. Sinüsoidal çıkarım tekniği.
4. Hızlı fourier dönüşümü (FFT).
5. Vektör kontrol tekniği.
6. Senkron referans düzlem teorisi.
7. Güç ayrışım tekniği.

Zaman kapsamında en çok kullanılan Anlık reaktif güç kuramı'nı çalışmamızda kontrol yöntemi olarak seçildi.

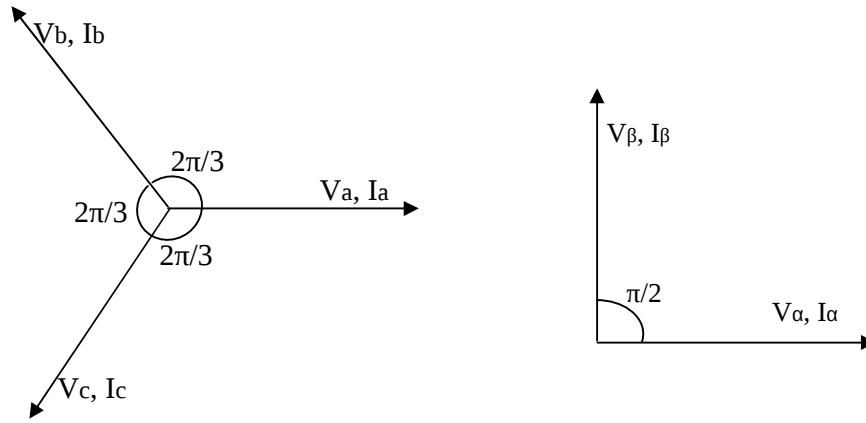
5.1. Anlık Reaktif Güç Kuramı (Instantaneous Reactive Power Theory)

Anlık reaktif güç kuramı ilk olarak 1983 yılında ‘‘H. Akagi’’ tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem p-q teorisi olarak da bilinmektedir. Bu teori, üç fazlı nötr hatlı veya hatsız güç sistemlerinde anlık değerlere işlem yapan bir teoridir. Akım ve gerilim dalga şekilleri için hem kararlı hal hem de geçici rejimde geçerlidir. p-q teorisi a-b-c koordinatlarındaki 3 fazlı akım ve gerilimlerin α - β -0 koordinatlarına cebirsel dönüşümünden oluşur. Bu α - β bileşenlerden p-q ani güç bileşenleri hesaplanır. p-q teorisinin aktif filtre kontrolünde kullanılmasının bazı önemli sebepleri aşağıda sıralanmıştır:

1. Üç fazlı sistem teorisinin tabiatına uygun olan bir teoridir.
2. Herhangi bir üç fazlı sisteme uygulanabilir (dengeli veya dengesiz, harmonikli veya harmoniksiz akım ve gerilime).
3. Mükemmel dinamik cevap sağlayan anlık değerlere dayanır.

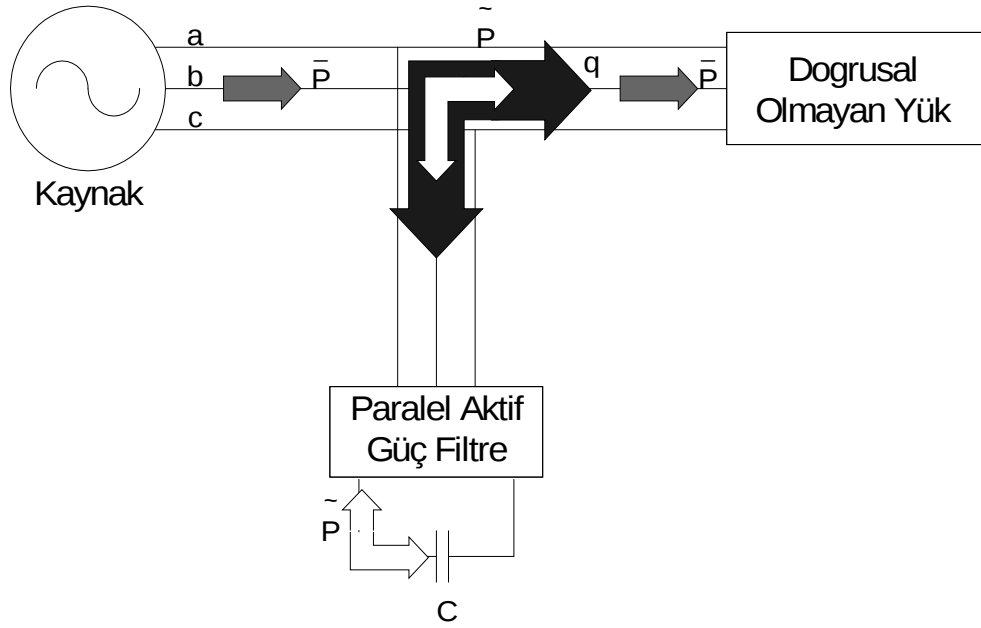
4. Hesaplama devreleri basittir (sadece cebirsel tanımlar içerir ki bunların uygulanması standart işlemcilerle kolaylıkla sağlanabilir).

Üç fazlı sistemlerde matematiksel olarak ani akım ve gerilimler ile ilgilenmek için bu büyüklükleri vektör olarak tanımlamak uygun olmaktadır. Hesaplamaları basitleştirmek için üç faz akım ve gerilimler şekil 5.1'deki gibi düşünülmektedir.



Şekil 5.1 a-b-c / α - β Dönüşümü

Şekil 5.1'de a-b-c koordinatlarında p-q teorisinin güç bileşenlerinin paralel aktif güç filtresi ile kompanzasyonu görülmektedir. Burada hem harmonikleri hem de yükün çektiği reaktif gücü kompanze etmek istersek, hem $\bar{q}$ değerini hem de filtre ile $\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$ güçlerini sağlamamız gerekir, p-q teorisinin istenen güç bileşeni olacaktır. Diğer büyüklükler paralel aktif güç filtresi ile kompanze edilebilir. Sadece harmonikleri elimine etmek istiyorsak sadece $\bar{q}$ sağlamak gerekir. P_0 paralel aktif güç filtresindeki kaynaktan herhangi bir güç çekmeden kompanze edilebilir. Bu büyüklük kaynaktan yüke paralel aktif güç filtresi uçlarından ulaştırılır. Bunun anlamı akım ve gerilimin nötr bileşenleri kaynaktan yüke transfer edilen önceki enerji şimdi kaynak fazlarından dengeli bir yolla ulaştırılır [28].



Şekil 5.2 a-b-c koordinatlarında p-q teorisinin gúc bileşenlerinin paralel aktif gúc filtresi ile kompanzasyonu

Bu sistemin üç fazlı, nötr hatsız sistem için kontrol blok şeması şekil 5.2’de verilmiştir. p ve q gúclerinin sabit ve değişken kısımlarını ayırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır.

Ani gúc metodunda yük akımındaki her bir harmoniğın ayrı ayrı belirlenmesine ihtiyaç duyulmaz. Bu metot anlık çalışır ve o anda ölçülen akımı tam sinüs dalgasına tamamlayacak bir kompanzasyon akımın üreten hesaplama devrelerinden oluşur. Hesaplama için yük akımını ve kaynak gerilimini kullanır. Hesaplama için az sayıda bileşene ihtiyaç duyması ve bütün harmonik bileşenlerini kompanze etmesi bu metodun avantajları olarak sayılabilir. Ancak çoęu durumda bütün harmonik bileşenlerinin kompanze edilmesine gerek yoktur. Standartlarda belirtilen harmoniklerin yok edilmesi çoğunlukla yeterli olacaktır. Bu metotla harmonikler ayrı ayrı kontrol edilemez [11].

5.1.1. Anlık güç kuramı'nın matematiksel modellenmesi

Üç fazlı, dört hatlı (nötr iletkeni ile) simetrik (faz gerilimleri arasında $2\pi/3$ radyan, ve faz akımları arasında $2\pi/3$ radyan faz farkı bulunan) bir sistem 0- α - β dönüşümü (phase transformation, 0- α - β transformation) sayesinde aşağıdaki gibi modellenebilir. Bu dönüşümde değişken sayısını azaltarak işlem yoğunluğunu asgari düzeye indirmek, α - β koordinat eksenlerinin dikliğinden yararlanarak işlemlerin kolaylaştırılması sağlamak ve sıfır-sıralı-güç değerini anlık güç ifadesinde izole etmek amaçlanmıştır:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

V_a, V_b, V_c faz gerilimleridir. Aynı dönüşüm matrisi (C) hat akımları (I_a, I_b, I_c) için de uygulanır [25].

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Dönüşüm matrisinin ortogonalite özelliğinden yararlanarak ve Eş. 5.3 ile Eş. 5.5'i kullanarak üç-fazlı denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta + V_0 I_0 \\ &= P_a(t) + P_b(t) + P_c(t) = P_\alpha(t) + P_\beta(t) + P_0(t) \\ &= P(t) + P_0(t) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Bu denklemde:

$$P(t) = P_\alpha(t) + P_\beta(t) \quad \text{Anlık gerçek güç (instantaneous real power)}$$

$$P_0(t) = V_0(t) I_0(t) \quad \text{Anlık sıfır sıralı güç (instantaneous zero sequence power)}$$

olarak tanımlanmıştır.

Akagi yukardaki anlık güç ifadesine ek olarak yeni bir güç tanımı önermiştir:

$$q = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (5.7)$$

$$P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (5.8)$$

$$P_\alpha = V_\alpha I_\alpha \quad (5.9)$$

$$P_{\beta} = V_{\beta} I_{\beta} \quad (5.10)$$

P ve q ifadelerini matris biçiminde yazmak gerekirse:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

α - β eksenlerindeki akım bileşenleri Eş. 5.11 sayesinde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Eş. 5.8, Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'a dayanarak elde edilen α - β eksen, güç bileşenlerini kolaylıkla ayrılabiliriz:

$$P_{\alpha p} = V_{\alpha} I_{\alpha p} = \frac{V_{\alpha}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} P \quad (5.13)$$

$$P_{\alpha q} = V_{\alpha} I_{\alpha q} = \frac{-V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (5.14)$$

$$P_{\beta p} = V_{\beta} I_{\beta p} = \frac{V_{\beta}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} P \quad (5.15)$$

$$P_{\beta q} = V_{\beta} I_{\beta q} = \frac{V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (5.16)$$

Eş. 5.6, Eş. 5.13, Eş. 5.14, Eş. 5.15 ve Eş. 5.16 yardımı ile üç fazlı aktif güç denklemini aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
 P_{3\phi} &= P_{\alpha} + P_{\beta} + P_0 = P_{\alpha p} + P_{\alpha q} + P_{\beta p} + P_{\beta q} + P_0 \\
 &= P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_0
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Bu arada Eş. 5.14 ve Eş. 5.16'nın anlık toplamı sıfırdır:

$$0 = P_{\alpha q} + P_{\beta q} \tag{5.18}$$

Tanımlamalar şöyledir:

$P_{\alpha p} = \alpha$ – eksenli anlık aktif güç

$P_{\beta p} = \beta$ – eksenli anlık aktif güç

$P_{\alpha q} = \alpha$ – eksenli anlık reaktif güç

$P_{\beta q} = \beta$ - eksenli anlık reaktif güç

Yukarıda anlatılanlarda tüm değerler anlık değerler olduğundan geçici ve kalıcı rejimlerde geçerlidir. Ayrıca Harmonikler hem akımda hem de gerilimde olabilir.

$$P = \bar{P} + \tilde{P} \quad , \quad q = \bar{q} + \tilde{q} \tag{5.19}$$

$\bar{p}$, $\bar{q}$ ortalama değerleri temsil ederken, $\tilde{p}$, $\tilde{q}$ ortalamaları sıfır olan osilatif değerleri temsil eder.

$$\bar{P} = P_{3\phi} \quad , \quad \bar{q} = Q_{3\phi}$$

$$H = \sqrt{\tilde{P}^2 + \tilde{Q}^2}$$

$\tilde{P}$ ve $\tilde{Q}$, $\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$ 'nin RMS değerleridir.

Yükün anlık gerçek ve sanal güç eşitliği, yük akımlarının ve hat-nötr gerilimlerinin α - β koordinat sistemindeki karşılıkları ve Eş. 5.11 kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L\alpha} \\ I_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

P_L ve Q_L AA ve DA bileşenlerden oluşur Eş. 5.19. DA bileşenleri $\bar{p}_L$, $\bar{q}_L$ ve AA bileşenleri $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$ olarak tanımlandığında anlık gerçek ve sanal güç denklemi, denklem (4.23)'te verilmiştir:

$$P_L = \bar{P}_L + \tilde{P}_L \quad (5.21)$$

$$Q_L = \bar{Q}_L + \tilde{Q}_L \quad (5.22)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_L + \tilde{P}_L \\ \bar{Q}_L + \tilde{Q}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L\alpha} \\ I_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{P}_L + \tilde{P}_L \\ \bar{Q}_L + \tilde{Q}_L \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Yukarıdaki denklemden α eksenindeki anlık yük akımı ve β eksenindeki anlık yük akımı ifadeleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_{L\alpha} = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{P}_L + \frac{-V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{q}_L + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{P}_L + \frac{-V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{q}_L \quad (5.25)$$

$$I_{L\beta} = \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{P}_L + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{q}_L + \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{P}_L + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{q}_L \quad (5.26)$$

α - β koordinat sisteminde hesaplanan p ve q değerleri aktif filtrenin tasarım fonksiyonlarına göre alçak geçirgen, yüksek geçirgen, bant geçirgen, filtrelere maruz bırakılarak $\bar{p}_L$, $\bar{q}_L$, $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$ değerleri bulunur. Sözgelimi sadece reaktif güç kompanzasyonu yapması istenen bir filtre için $\bar{q}_L$ hesaplanması yeterlidir.

Aktif filtrenin anlık reaktif gücün hem AA hem de DA bileşenlerini ile aktif gücün AA bileşenlerini yok edebilmesi için aşağıdaki akımları sağlaması gerekir:

$$\begin{bmatrix} I_{f\alpha} \\ I_{f\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{P}_L \\ \bar{q}_L + \tilde{q}_L \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$I_{f\alpha} = \frac{-V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{q}_L + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{P}_L + \frac{-V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{q}_L \quad (5.28)$$

$$I_{f\beta} = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{q}_L + \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{P}_L + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{q}_L \quad (5.29)$$

Eş. 5.27, Eş. 5.28 ve Eş. 5.29'dan çıkarılacak sonuçlar şunlardır:

1. Filtre, Eş. 5.27'de $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$, $\bar{q}_L$ değişkenlerini içeren anlık akım ifadelerinin tamamını veya kombinasyonlarını yok edecek şekilde (Eş. 4.3 ve 4.6) anlık akım değerlerini üretebilmelidir. Dolayısıyla kaynak akımında bulunması istenmeyen, anlık gerçek ve sanal güçlerin AA ve/veya DA bileşenleri filtre tarafından sağlanmalıdır. Bu sayede sadece kalıcı rejimlerde değil geçici rejimlerde de yük

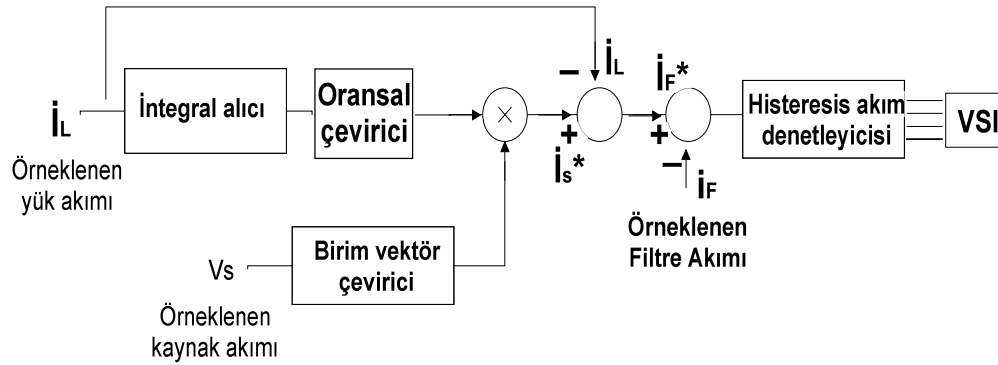
akımlarındaki harmonik bileşenler yok edilebilir ve temel frekansta reaktif güç kompanzasyonu yapılabilir.

2. Denklem 5.27'de $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$ terimlerini içeren ifadeler harmonik akımlarına ve $\bar{q}_L$ terimi içeren ifadeler reaktif güç ihtiyacına neden olan akımlara karşılık gelir. Filtre ile sadece harmonik yok edimi yapılacak ise $\tilde{p}_L$, $\tilde{q}_L$ ve sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılacak ise q_L içeren ifadeler filtre akım ifadelerinde (Eş. 5.28 ve 5.29) yer almalıdır.
3. Tüm hesaplamalarda anlık değer ile yapıldığından sadece kalıcı rejimde değil geçici rejimlerde de anlık olarak kaynak akımının harmoniklerinden arındırılması ve temel frekansta reaktif akım bileşeni bulunmaması filtre tarafından sağlanır [18].

5.2. Kontrol Yöntemin İncelenmesi

AGF devresinin çalışması esnasında yük akımından (I_L), giriş geriliminden (V_s) ve filtre akımından (I_F) örnekler alınır. Kaynak akımı, yük ve filtre akımlarının birleşiminden oluştuğundan yükün çektiği akımın değişmesi durumunda, kontrol edilen AGF'nin filtre akımının da kendisini bu değişime ayarlayabilecek aktif bir yapıda olması gerekir, örneklenen kaynak akımının her periyot süresince alanı hesaplanır.

Bu hesaplanan alanı her periyot içerisinde sinüs dalga şeklinde yayabilmek için gerekli olan sinüs dalga şeklinin tepe değeri hesaplanır. Kaynak geriliminin örneklemeinden elde edilen birim sinüs vektör ile bu bulunan tepe değeri çarpıldığında referans kaynak akımı bulunmuş olur (Şekil 4.3).



Şekil 5.3 AGF'nin kontrol yöntemi

Bulunan referans kaynak akımından, örneklenen yük akımı çıkarıldığında AGF devresinin çekmesi gereken referans filtre akımı bulunur. Histeresis akım yöntemi kullanılarak, AGF'nin referans filtre akımına benzer bir akım çekmesi için evirgecin yarı iletken anahtarlarına uygulanması gereken DGM sinyalleri elde edilir.

Evirgecin anahtarlarına uygulanması gereken sinyallerin elde edilmesinde uygulanabilecek diğer bir kontrol yöntemi ise histeresis akım denetleyicisinde referans filtre akımı yerine doğrudan referans kaynak akımının kullanılmasıdır. Bu yöntemde kaynak akımından yük akımının çıkarılmasına gerek yoktur (Şekil 5.4). Matematiksel süreç daha kısa olduğundan sistemin kontrolü daha kolay olur [15].



Şekil 5. 4 Kaynak akımını referans alan kontrol yöntemi

5.3. Temel Kontrol Teorisi

Kaynak geriliminin temiz bir sinüs dalga olduğu kabul edilir.

$$v_s(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

Doğrusal olmayan yük akımı aşağıdaki gibi ifade edilirse:

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (5.2)$$

Gerilim bölücü kullanılarak kaynak geriliminden birim sinüs sinyal elde edilir.

$$u(t) = \sin(\omega t)$$

Bu Eş.'ten kaynak akımı elde edilir.

$$\begin{aligned} i_s(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(I_{L1} \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \right) \sin(\omega t) dt \\ &= I_{L1} \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Aşağıdaki Eş. referans alınan kaynak ve filtre akımlarını verir.

$$i_s^* = I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (5.4)$$

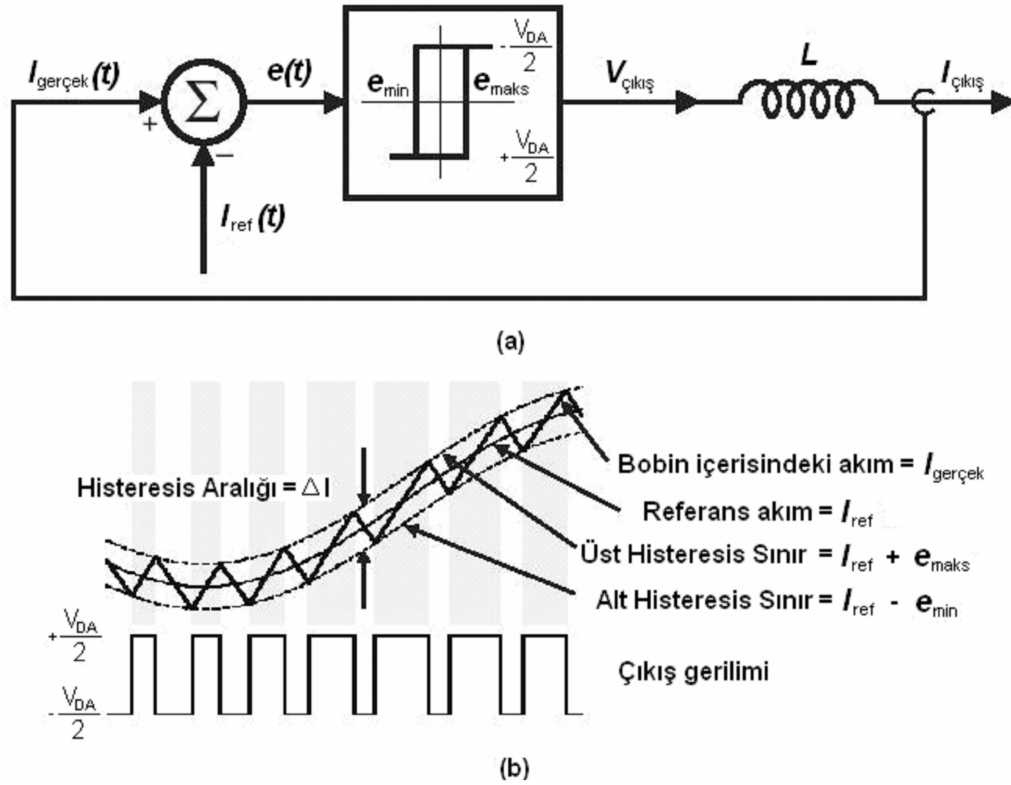
$$i_F^* = i_s^* - i_L^* \quad (5.5)$$

5.4. Histeresis Akım Denetleyicisi

Bu çalışmada, aktif güç filtresinin referans akımları üretebilmesi amacıyla histeresis akım kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde Referans akım ile gerçek akım arasındaki hata akım sinyali ne zaman bandın dışarısına kayarsa tetikleme akımı banda geri döndürmeye zorlayacak şekilde açılır veya kapanır. Bu özellik akımı hızlı kontrol etmeyi mümkün kılar. Aktif filtre çıkış akımlarının, yarı-iletken anahtarları uygun bir biçimde anahtarlayacak. Evirgeç tarafından çekilen akım; kontrol edilerek anahtarlara uygulanan sinyaller ayarlanabilir, akımın yükselme ve azalma eğimleri evirgecin girişine eklenen bobin değeri ile ayarlanabilir.

Histeresis kontrol yönteminde evirgeçte bulunan anahtarlar, bobin içerisindeki akım $I_{\text{gerçek}}(t)$ alt histeresis sınırının altına düştüğünde ilettime geçer veya üst hysteresis sınırının üzerine çıktığında ise kesime gider. Böylece anahtarların açılıp kapanması ile yükselen ve azalan akım referans akımı izler.

Şekil 5.6'de histeresis akım denetleyicisinin blok diyagramı ve çalışma prensibi verilmektedir. Referans akımı $I_{\text{ref}}(t)$ ile evirgeç tarafından üretilen akım $I_{\text{gerçek}}(t)$ arasındaki fark olan hata sinyali $e(t)$ evirgecin anahtarlarını kontrol etmede kullanılır. Eğer hata üst sınıra ulaşırsa, evirgecin anahtarlarının konumu akımı azaltacak şekilde değişir veya tam zıt durumda da alt sınıra ulaşırsa akımı artıracak şekilde değişir [15].



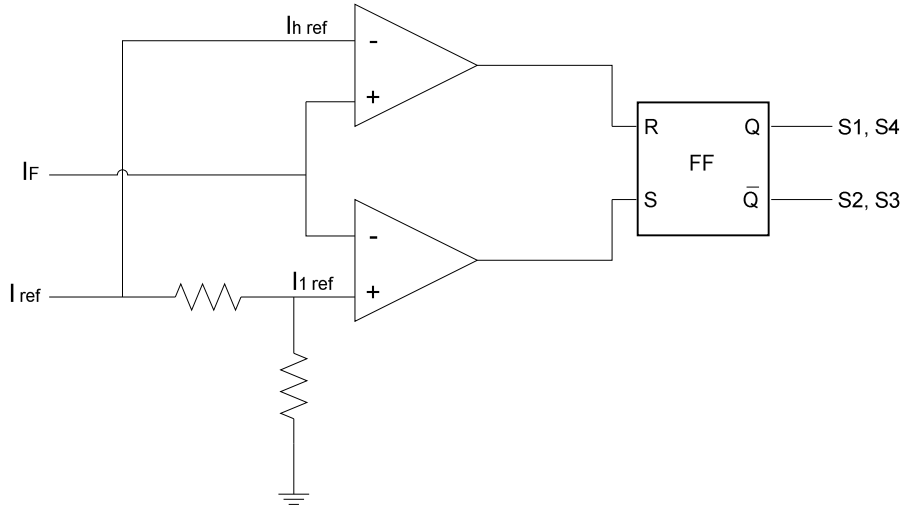
Şekil 5.5 Histeresis akım denetleyicisi (a) blok diyagram, (b) çalışma prensibi

Filtre giriş reaktöründeki akım, histerezisin üst limitini aştığı takdirde, reaktör negatif gerilime maruz kalmakta ve akımın düşmesi; aynı şekilde, akım alt limit değerine ulaştığında ise pozitif gerilim uygulayarak reaktör akımının çıkışa geçmesi sağlanmaktadır:

$I_{\text{gerçek}}(t) < (I_{\text{ref}}(t) - e(t))$ ise üst anahtar KAPALI ve alt anahtar AÇIK olacaktır.

$I_{\text{gerçek}}(t) > (I_{\text{ref}}(t) + e(t))$ ise üst anahtar AÇIK ve alt anahtar KAPALI olacaktır.

İki adet yükselteç, bir gerilim bölücü devre ve bir adet RS flip-flop devresi ile histeresis akım denetleyicisi oluşturulabilir (Şekil 5.6) [27].



Şekil 5. 6 Histeresis akım denetleyicisinin pratikte uygulanması

Histeresis akım denetleyicisinin dezavantajı anahtarlama frekansının sabit olmamasıdır. Maksimum anahtarlama frekansı aşağıdaki denklemle verilir. Yüksek ve düşük anahtarlama frekansı devredeki elemanlar uygun seçilerek giderilebilir.

GBAGF ise:

$$f_{sw(max)} = V_{da} / 9h L \quad (4.6)$$

ABAGF ise:

$$f_{sw(max)} = I_{da} / 9h C \quad (4.7)$$

h = Histeresis limit.

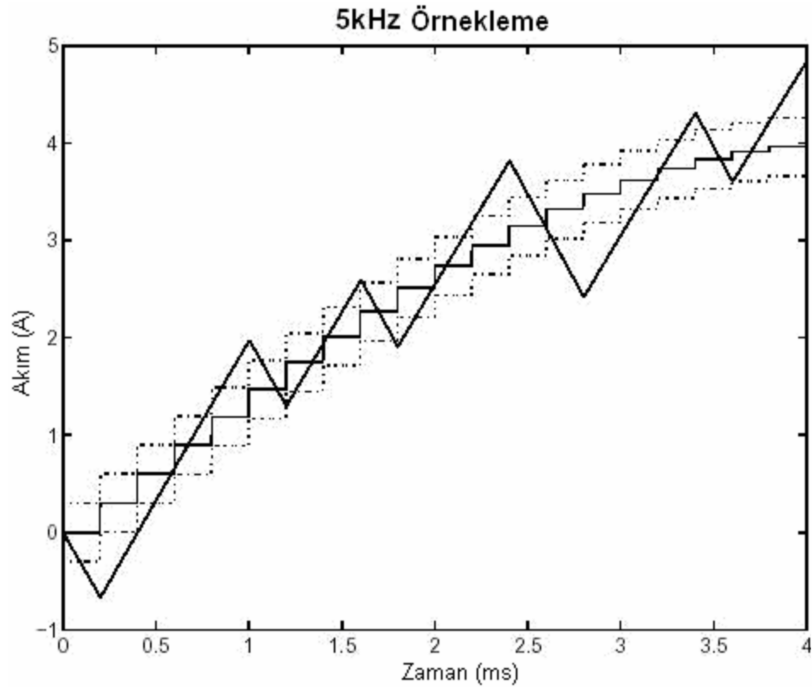
V_{da} = Evirgeçteki DA gerilim.

L = Akımın aktığı bobinin değeri.

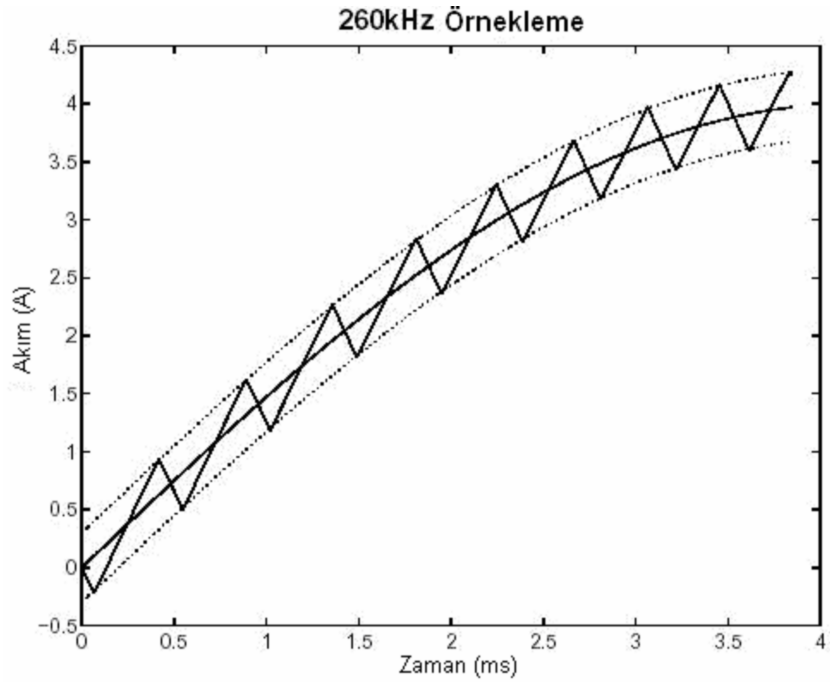
I_{da} = Evirgeçteki DA akım.

C = gerilimin olduğu kapasitörün değeri.

Yüksek anahtarlama frekansı kullanılması akımın histeresis limitlerinin aşmasını azaltır (Şekil 5.7) [15].



(a)



(b)

Şekil 5.7 Değişik anahtarlama frekanslarında histeresis akım denetleyicisinin çalışma

Prensibi, (a) 5 kHz, (b) 260 kHz

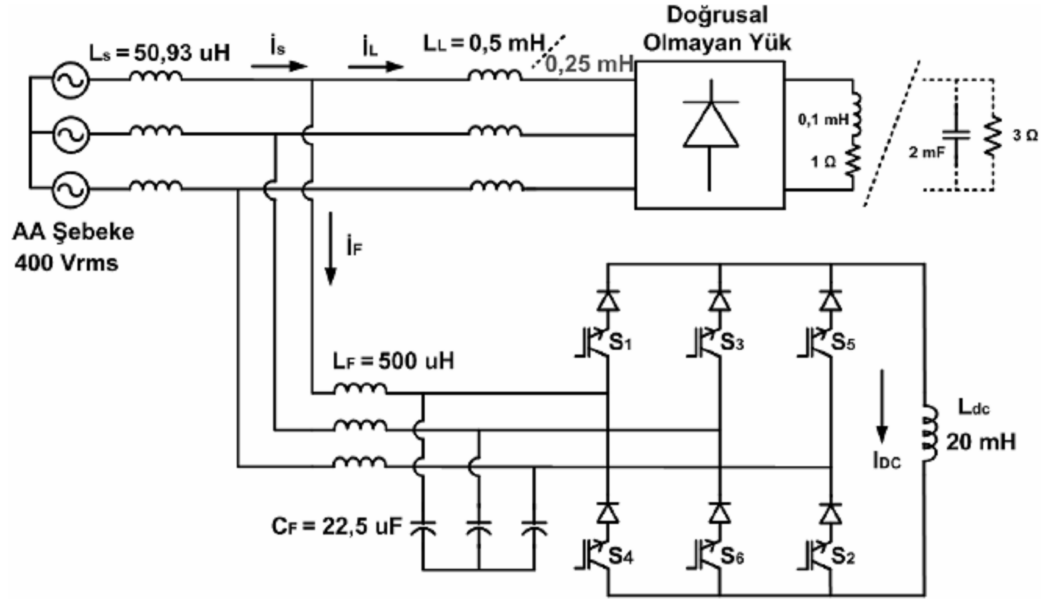
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde Matlab-Simülink ortamında simülasyon yaparak üç fazlı gerilim beslemeli şönt aktif güç filtre ile üç fazlı akım beslemeli şönt aktif güç filtrenin tasarımları ve sonuçları gösterilecektir.

Gerilim ya da akım kaynaklı paralel aktif güç filtreleri çoğunlukla akım harmoniklerinin giderilmesi için kullanıldığından benzetim çalışmalarında modellenen elektrik şebekesine bağlı endüktif veya kapasitif yüklü diyot köprü doğrultucu harmonik akım kaynağı olarak kullanılmıştır. Benzetimi yapılacak aktif güç filtreleri ve benzetim çalışmalarında kullanılacak endüktif ve kapasitif yüklü diyot doğrultucu güçlerinin belirlenmesi için öncelikle çeviricinin DA bağ akımı 150 A olarak seçilmiştir [20]. DA bağ akımının 150 A olarak seçilmesi, aktif güç filtresinden şebekeye basılacak akımın tepe değerinin 150 A'yı geçemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle gerilim ya da akım kaynaklı aktif güç filtresinin maksimum gücü 150 A tepe değeri olan sinüs akım bastığında ulaştığı 75 kVA olacaktır. Diyot doğrultucuların güçleri de harmonik akımlarının tepe değeri 150 A olacak şekilde belirlenmiş olup endüktif yüklü doğrultucunun gücü yaklaşık 250 kVA ve kapasitif doğrultucunun gücü yaklaşık 110 kVA'dır [6]. Her bir akım kontrol yöntemi için, endüktif ve kapasitif yüklü diyot doğrultucuların harmoniklerinin filtrelenmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve endüktif yüklü diyot doğrultucunun reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerinin filtrelenmesinin bir arada olduğu benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Benzetim çalışmalarında, aktif güç filtresinin şebekeye basacağı harmonik akımları bulmak amacıyla referans bulma yöntemlerinden Anlık Reaktif Güç Kuramı kullanılmıştır, uygun DA bağ kapasitör ya da reaktör değeri seçilmiş ve aktif güç filtresini şebekeye bağlanacak 1,5 kHz kesim frekansına sahip alçak geçirgen pasif filtre tasarlanmıştır.

Benzetim çalışmasında yapılan aktif filtrenin iki yönteminin performanslarını belirlemek amacıyla değerlendirme kriteri yükün harmonikleri filtrelendikten sonra



Şekil 6.2 Şebekeye paralel bağlı akım beslemeli aktif güç filtresi

6.2. Elektrik Şebekesinin Özellikleri

Benzetim çalışmalarında aktif güç filtresinin ve harmonik kaynağı olan yükün bağlanacağı gerilim seviyesi olarak standart alçak gerilim seviyesi olan 400 V seçilmiştir. Şebeke empedansının belirlenmesi için 400 V baranın 800 kVA transformatör ile 34,5 kV orta gerilim seviyesine bağlandığı varsayılmıştır. Bu verilere göre kullanılacak trafonun kaçak reaktansı, Z_k %7-8 civarında olacaktır. Buna göre şebeke empedansı şu şekilde hesaplanabilir.

$$X_{tr} = \frac{V^2}{S} \times Z_k$$

$$L_{tr} = \frac{V^2}{S} \times Z_k \times \frac{1}{2\pi 50} = \frac{400^2}{800000} \times 0,08 \times \frac{1}{2\pi 50} = 50,93 \mu H \quad (6.1)$$

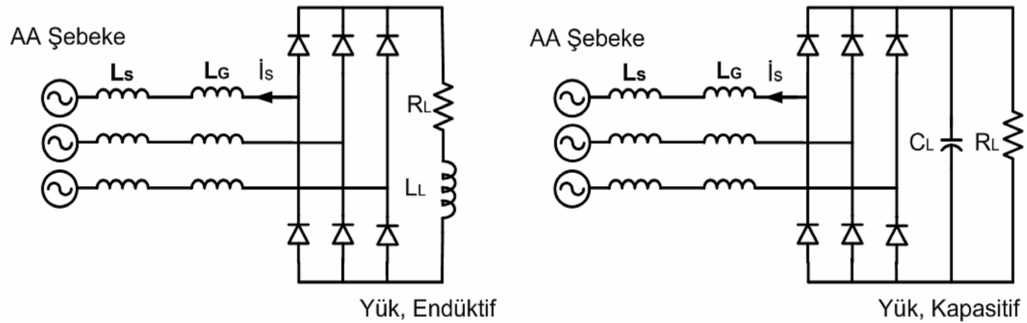
$$R_{tr} = \frac{X_{tr}}{10} = 1,6 \text{ m}\Omega$$

6.3. Yükün Özellikleri

Paralel aktif güç filtreleri harmoniklerin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için kullanıldığından benzetim çalışmalarında harmonik üreten doğrusal olmayan yük olarak pratikte de sıklıkla kullanılan diyot köprü doğrultucu kullanılmıştır. Endüktif ve kapasitif yüklü diyot doğrultucular için ayrı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Endüktif ve kapasitif yüklü diyot köprü doğrultucuların devre elemanları Çizelge 6.1’de ve devre şemaları şekil 6.3’te verilmiştir. Doğrultucuların devre elemanları seçilirken, şebekeden çektikleri harmonik akımların tepe değerinin 150 A’yı geçmemesi göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 6.1 Yüklü Parametreleri

Endüktif Yüklü		Kapasitif Yüklü	
Yük Direnci, R_L	1.0 Ω	Yük Direnci, R_L	3.0 Ω
Yük Endüktansı, L_L	0.1 mH	Yük Kapasitansı, C_L	2.0 mF
Giriş Endüktansı, L_G	0.5 mH	Giriş Endüktansı, L_G	0.25 mH
Giriş Direnci, R_G	10 m Ω	Giriş Direnci, R_G	10 m Ω



Şekil 6.3 Endüktif ve kapasitif yüklü diyot köprü doğrultucular

Üç fazlı tam-dalgı diyot köprü doğrultucunun üreteceği harmonik seviyeleri Eş. 6.2’deki gibi verilmektedir. Buna göre, diyot doğrultucuların 31. harmoniğe kadar akım harmonik bileşenlerinin değeri ve yüzde toplam harmonik bozulma değeri Çizelge 6.2’de verilmiştir [20].

$$h = 6k + 1 \quad (6.2)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$V_h = \frac{4 V}{h \pi} \sin\left(\frac{h \varphi}{2}\right) \quad (6.3)$$

$$I_h = \frac{V_h}{|Z_h|} = \frac{V_h}{\sqrt{R^2 + (2\pi h f L)^2}} \quad (6.4)$$

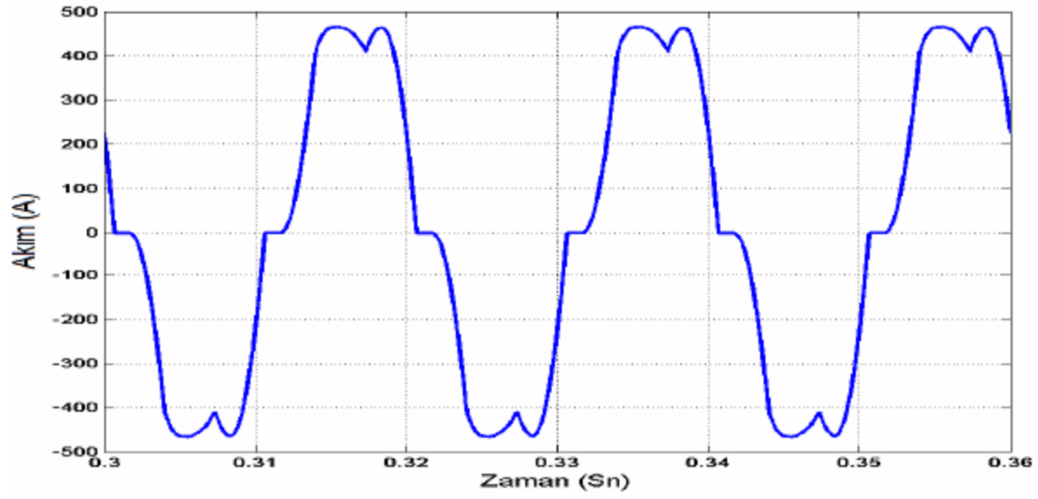
φ = Kare dalga gerilimin genliği (120 derece).

Z_h = Doğrusal olmayan yük [22].

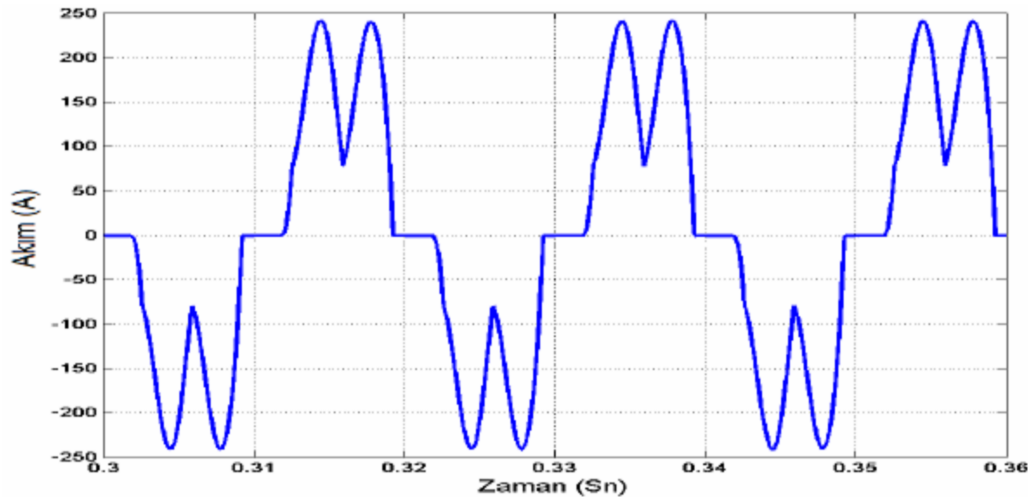
Çizelge 6.2 Yük akımı harmonik bileşenleri

Harmonik Numarası	Endüktif Akım (Arms)	Kapasitif Akım (Arms)
1	345,4	135,82
5	52,05	51,66
7	18,67	16,71
11	7,72	7,90
13	4,07	3,97
17	3,02	3,33
19	2,11	2,20
23	1,77	1,60
25	1,30	1,34
29	1,05	0,89
31	0,84	0,95
THD	% 16,29	% 40,65

Doğrultucuların şebekeden çektikleri akım dalga şekilleri ise sırasıyla şekil 6.3 ve şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4 Doğrultucu giriş akımı dalga şekli (Endüktif yük)



Şekil 6.5 Doğrultucu giriş akımı dalga şekli (Kapasitif yük)

6.4. Giriş Filtresinin Özellikleri

Aktif güç filtreleri şebekeye bir alçak geçiren filtre üzerinden bağlanırlar. Alçak geçiren giriş filtresi yeterli bant genişliği ve anahtarlardan kaynaklanan harmoniklerin yeterince zayıflatılması arasında iyi bir uzlaşımında bulunmalıdır. Bu tasarımda diyot köprü doğrultucunun ürettiği bütün Harmonikler elenmek istendiği için giriş filtresinin kesim frekansı 1,5 kHz olarak seçilmiştir. Benzetim çalışmaları için öngörülen anahtarlama frekansının ABAGF’de 3-5 kHz ise GBAGF’de 25-30

kHz civarında olması da 1,5 kHz gibi yüksek sayılabilecek kesim frekansının seçilmesine olanak tanımıştır. Giriş filtresinin tasarımında öncelikle şebeke empedansının filtrenin reaktör değerini ve dolayısıyla filtrenin kesim frekansını etkilememesi göz önünde bulundurulmuştur. Bunu sağlamak için filtrenin endüktansı şebeke endüktansının on katı büyüklüğünde seçilmiştir:

$$L_f \gg L_{tr} \quad , \quad L_f = 10 L_{tr} \quad , \quad L_f = 500 \mu H$$

Giriş filtresinin kesim frekansı 1,5 kHz olarak belirlendiği için geriye kapasitörün değerinin belirlenmesi kalmıştır [20].

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} = 1,5 \text{ kHz} \quad , \quad C_f = 22,5 \mu F$$

6.5. DA Bağın Özellikleri

Tasarımlanan gerilim beslemeli aktif güç filtresi ile diyot köprü doğrultucunun üreteceği 31. harmoniğe kadar olan bileşenler filtreleneceği için DA bağ kapasitörün alabileceği minimum değer aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_n = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{l-l} \cdot I_{load \cdot n}}{2 \cdot f n} \quad (6.5)$$

$$C_{dc} = \frac{2 \cdot E}{(V_{dc})^2} \quad (6.6)$$

Kaynak gerilim 400 V olduğu için gerilimi 400 V alınır, burada yük akımının temel bileşen rms değeri 345 A rms'dir. Buna göre, harmonik akımların değerinin yaklaşık olarak harmonik seviyesi ile ters orantılı olduğu varsayılırsa toplam enerji miktarı aşağıdaki gibi bulunur.

$$E_{\Sigma} = \sum_{n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31} \frac{\sqrt{2} \cdot V_{l-l} \cdot I_{load, f}/n}{2 f_n \cdot n} \quad (6.7)$$

$$E_{\Sigma} = \sum_{n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31} \frac{\sqrt{2} \cdot 400 \cdot 345/n}{2.50 \cdot n} = 170 \text{ Joul}$$

$$C_{dc} = \frac{2 \cdot E_{\Sigma}}{V_{dc}^2} = \frac{2 \times 170}{400^2} = 2.12 \text{ mF}$$

Eğer tasarımılanan filtre akım beslemeli aktif güç filtresi ise aynı şekilde devam edeceğiz, DA bağ reaktörünün alabileceği minimum değer aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$L_{dc} = \frac{2 \cdot E_{\Sigma}}{(I_{dc})^2} \quad (6.8)$$

$$E_{\Sigma} = \sum_{n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31} \frac{\sqrt{2} \cdot 400 \cdot 345/n}{2.50 \cdot n} = 170 \text{ Joul}$$

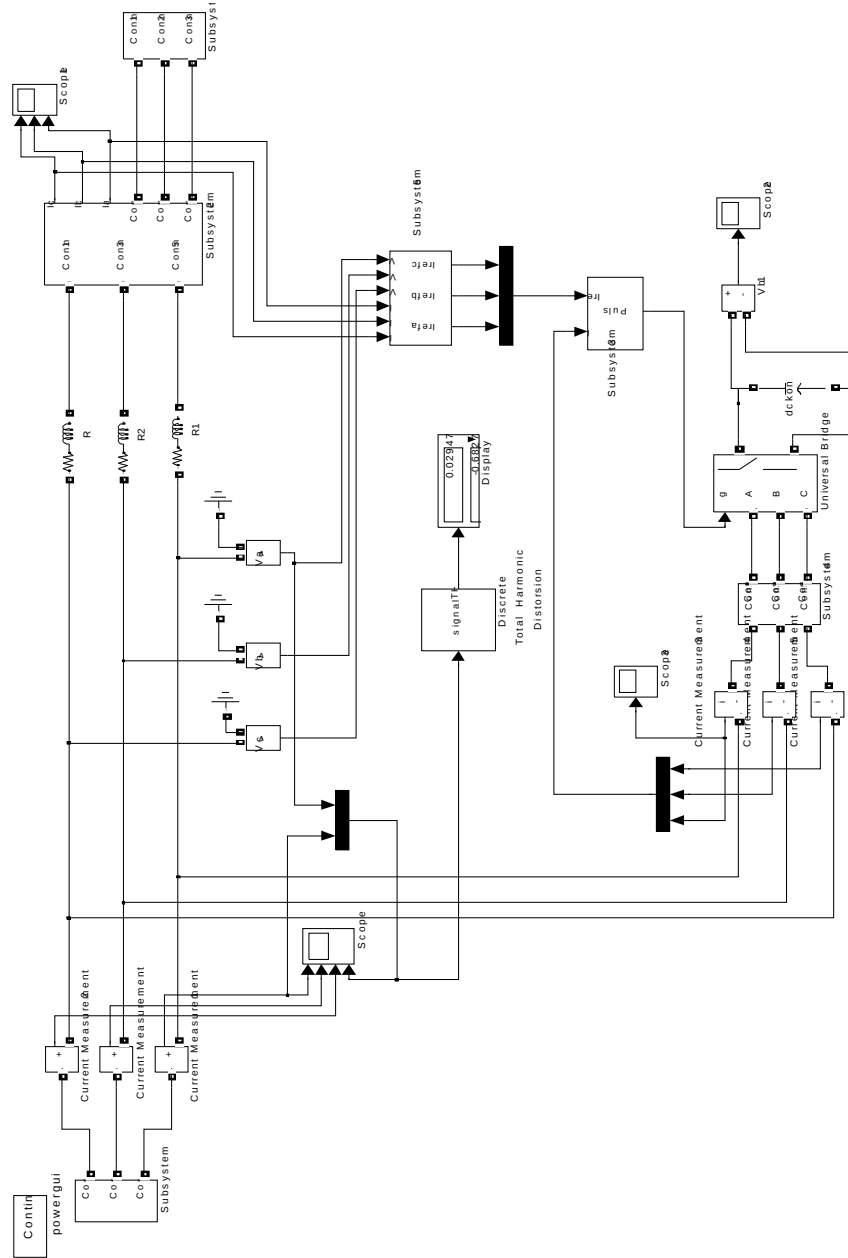
$$L_{dc} = \frac{2 \cdot E_{\Sigma}}{(I_{dc})^2} = \frac{2 \times 170}{150^2} = 15 \text{ mH}$$

Yapılan hesaplamalardan kullanılabilecek en küçük DA bağ reaktör değeri 15 mH olarak bulunmuştur. Benzetim çalışmalarında DA bağ reaktörünün değeri biraz daha tolerans tanınarak 20 mH olarak alınmıştır. DA bağ reaktörünün iç direnci ise gerçek bir reaktörün iç direncine eşdeğer olması açısından Mangoldt firmasının 20 mH'lik DA reaktör için vermiş olduğu değer olan 56,8 mΩ alınmıştır [20].

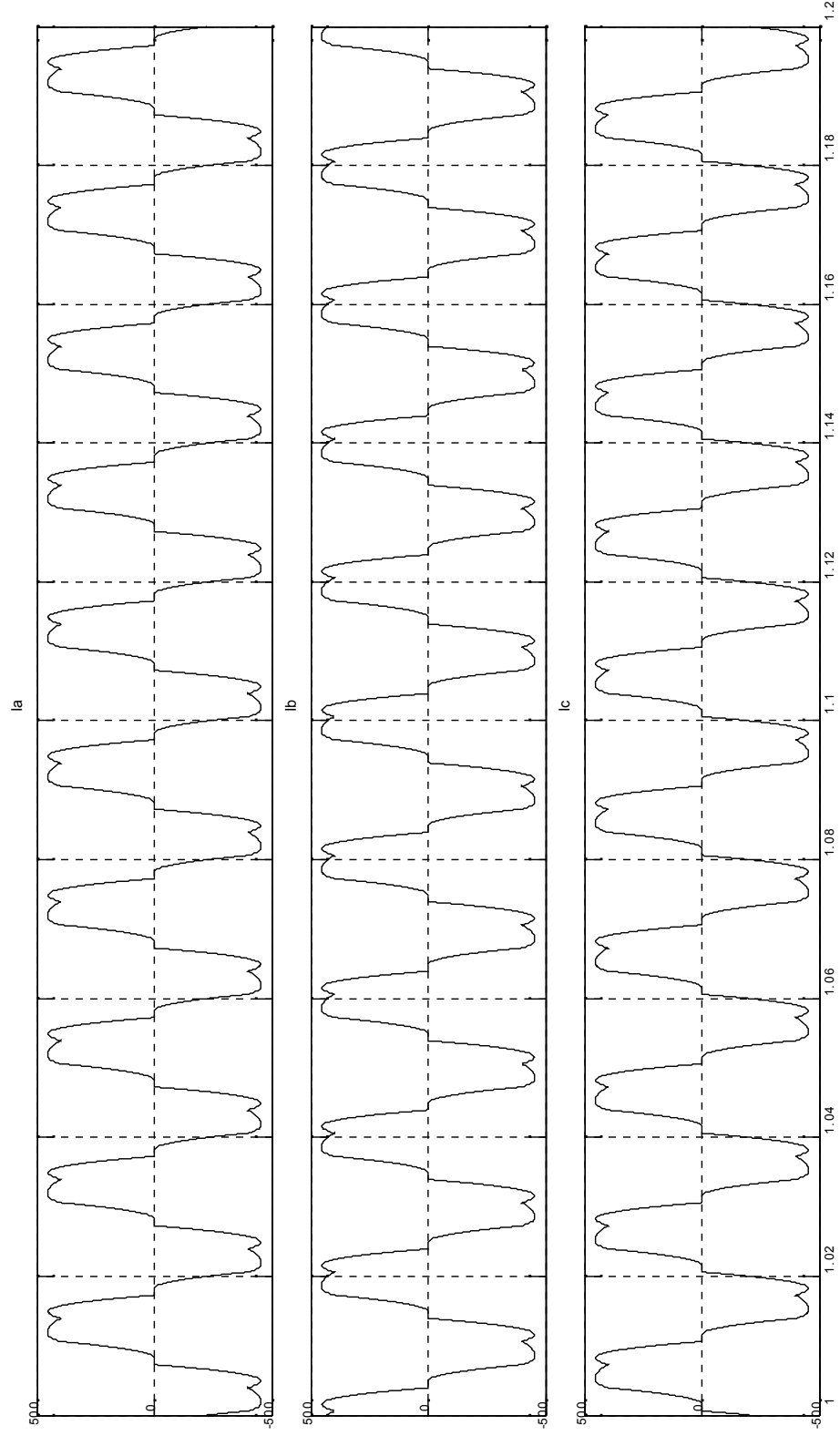
7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Gerilim Beslemeli Aktif Güç Filtresi

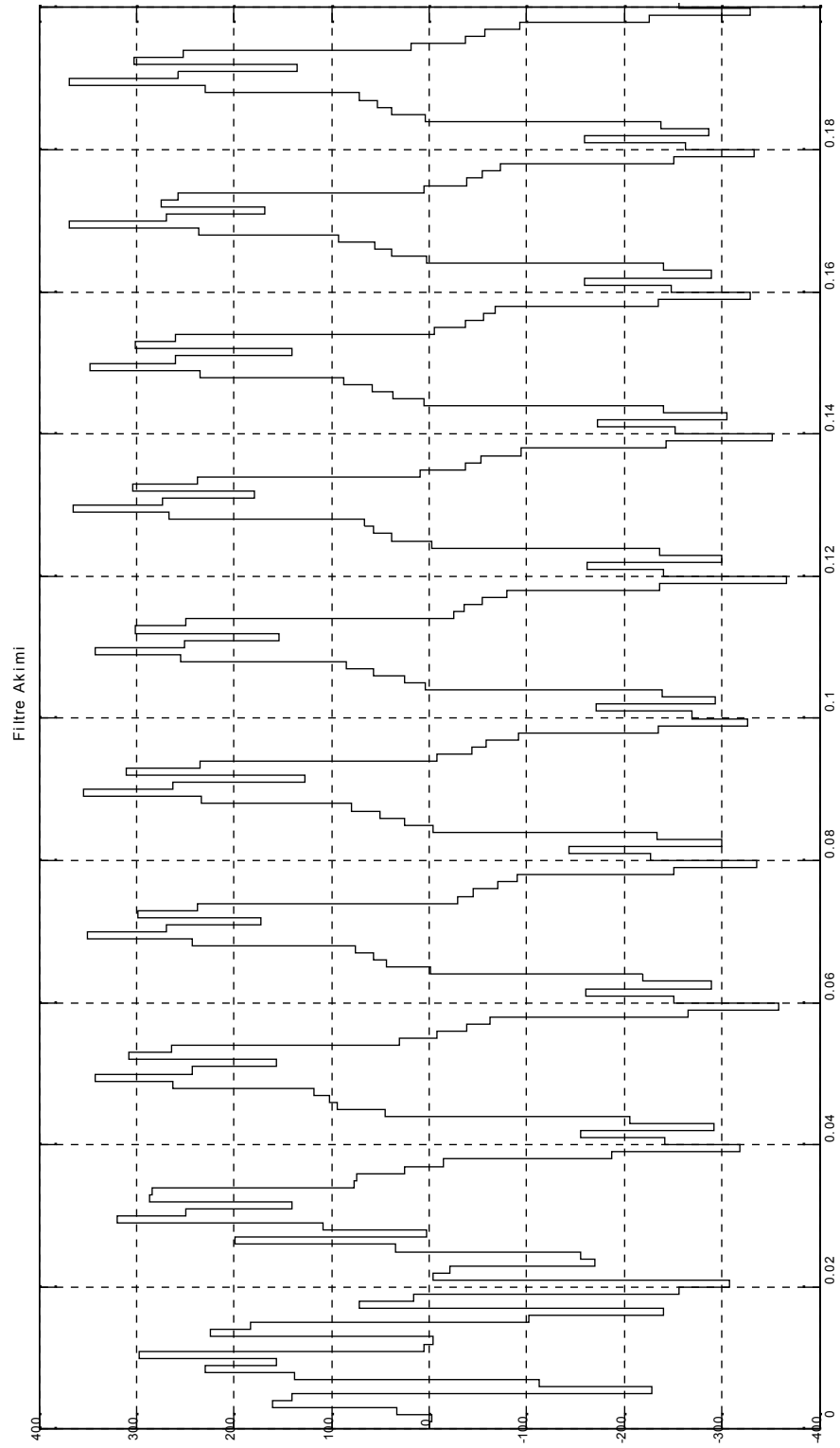
İndüktif yük kullanırsak % THD = % 2.54 standartlara göre %5'ten az olduğu için çok iyi bir sonuç sayılır, kapasitif yük kullanırsak % THD = % 6.9



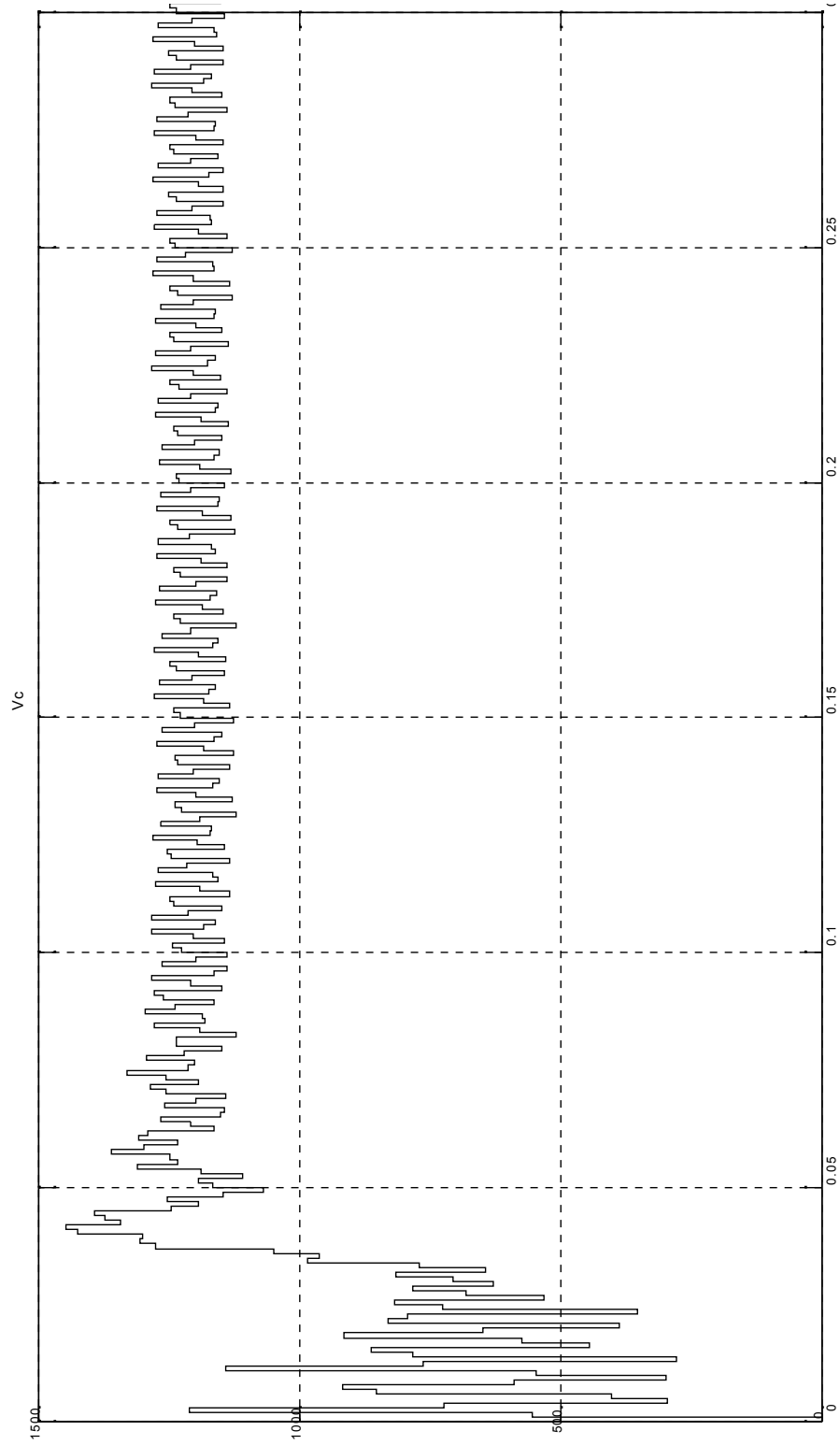
Şekil 7.1 Ana devre



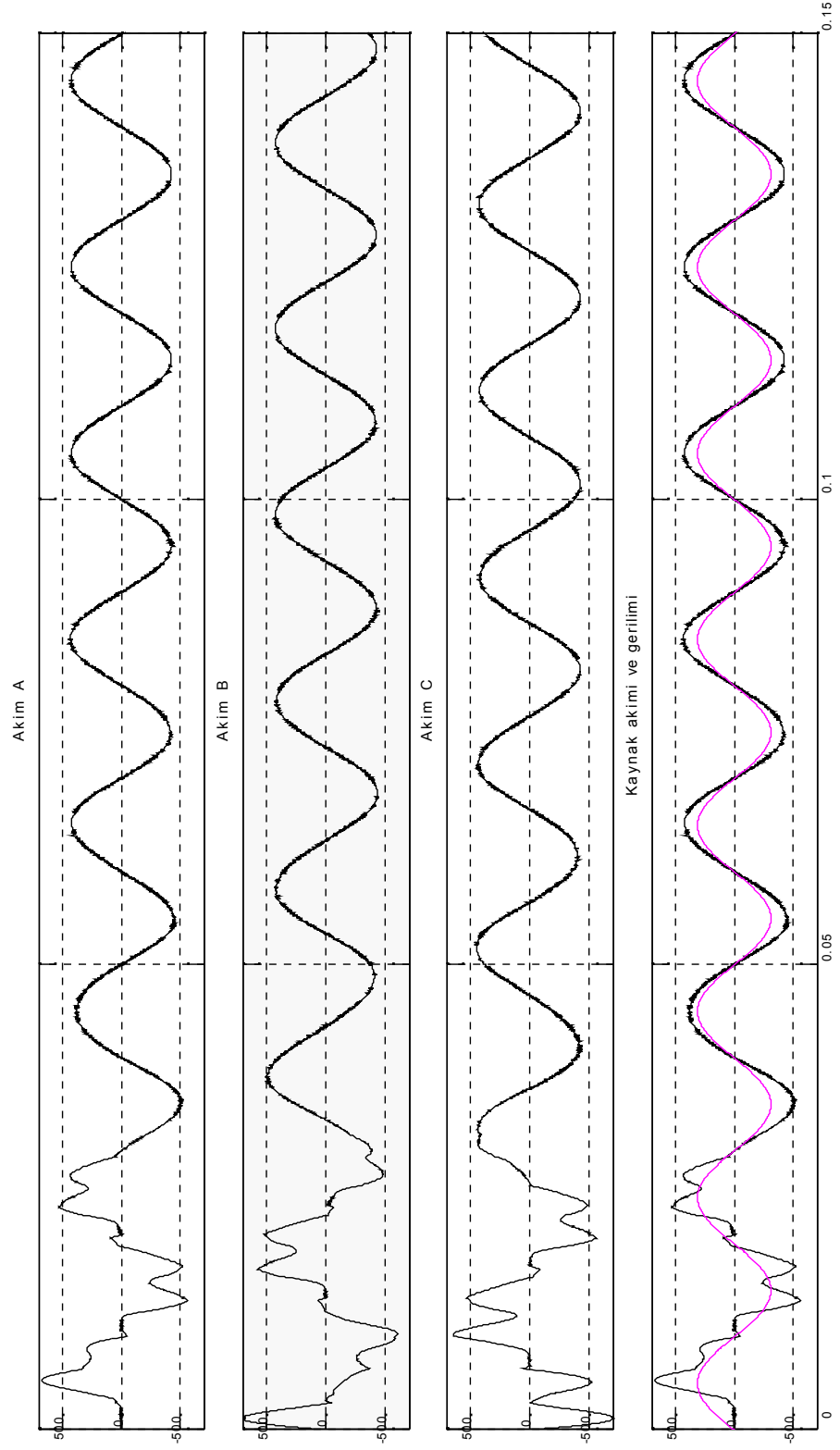
Şekil 7. 2 Yük akımı



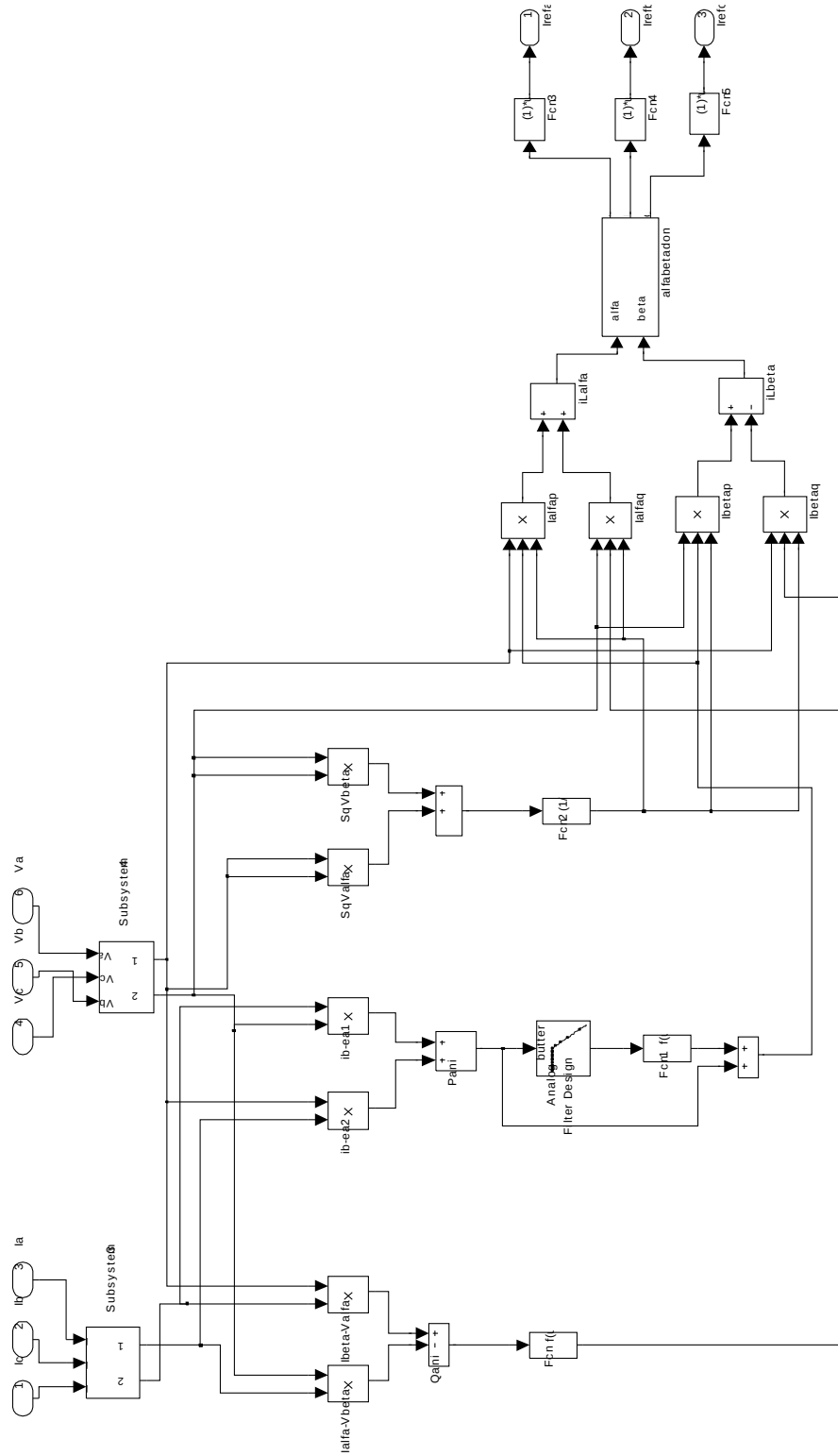
Şekil 7. 3 Filtre akımı



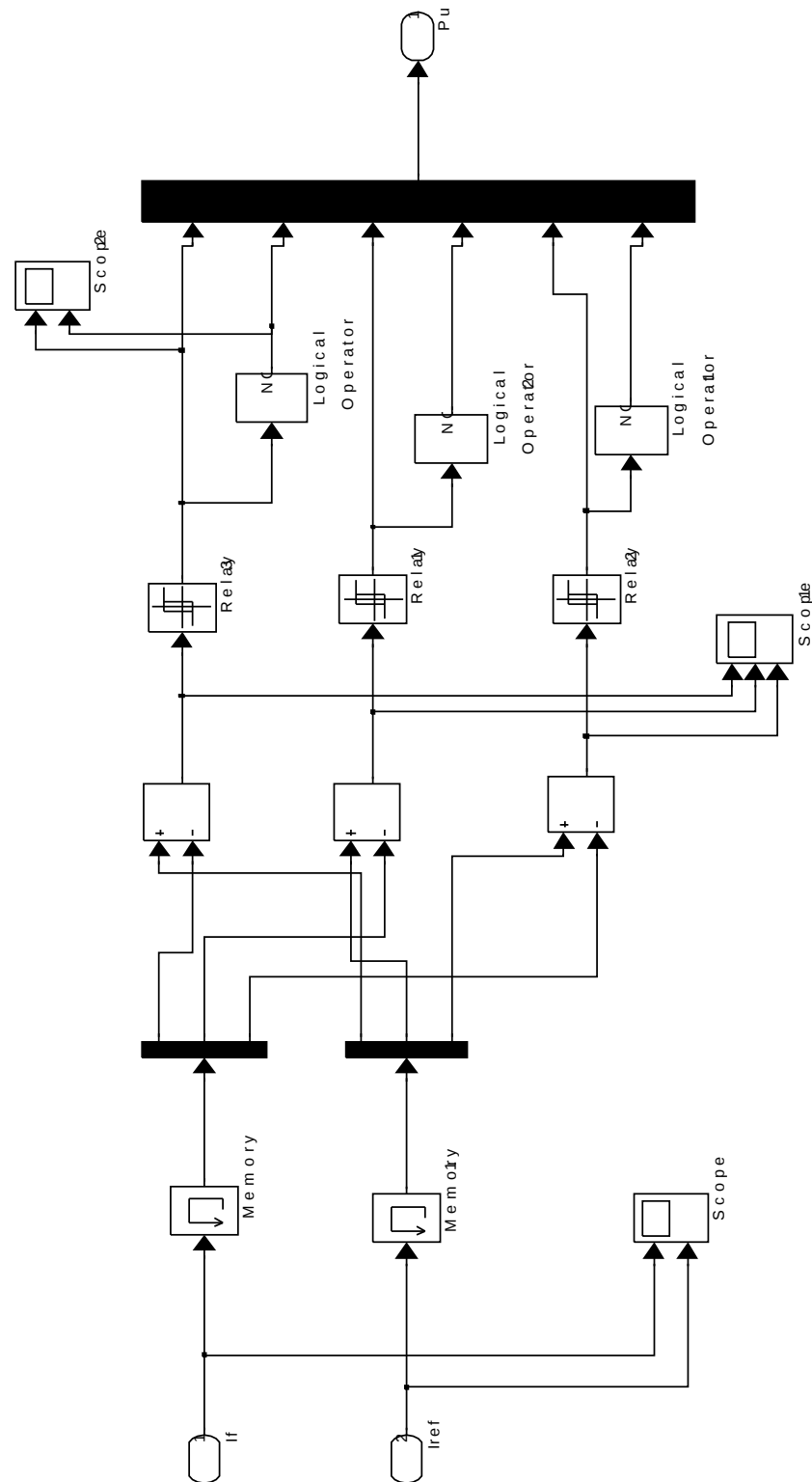
Şekil 7. 4 Kapasitör gerilimi



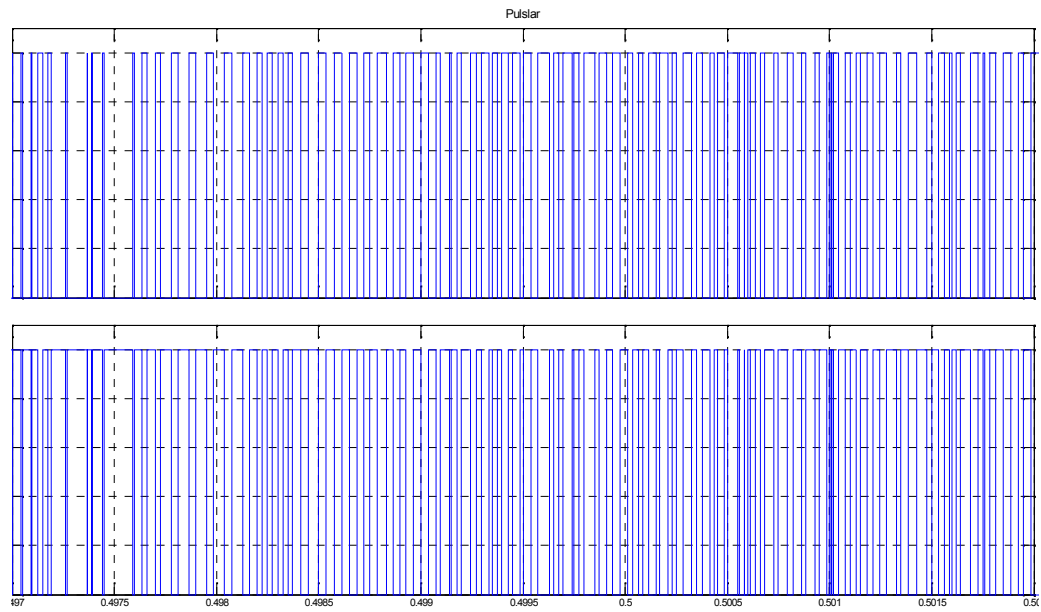
Şekil 7. 5 Kaynak akımı



Şekil 7. 6 Kontrol devresi

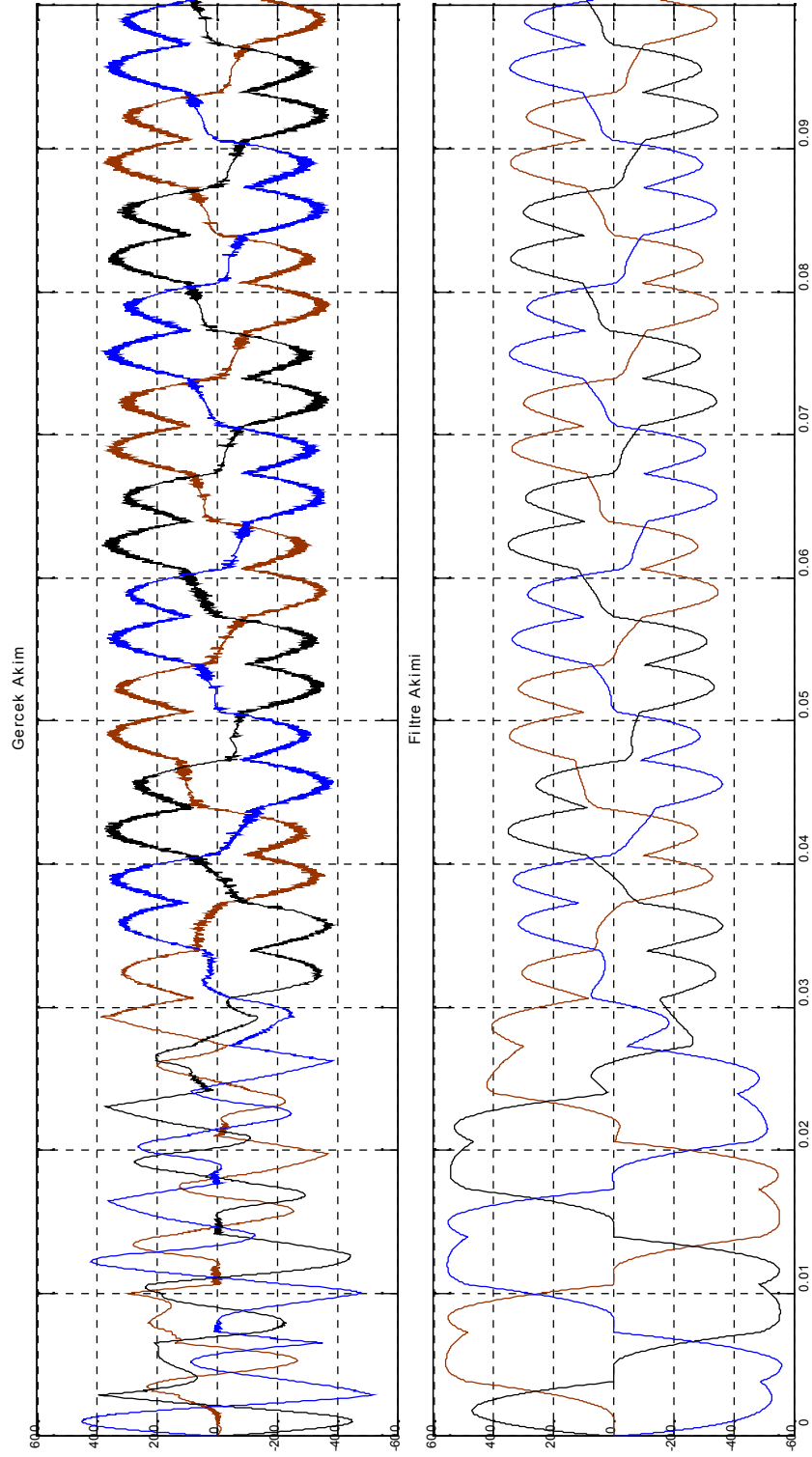


Şekil 7.7 Hysteresis devresi



Şekil 7. 8 Darbeler

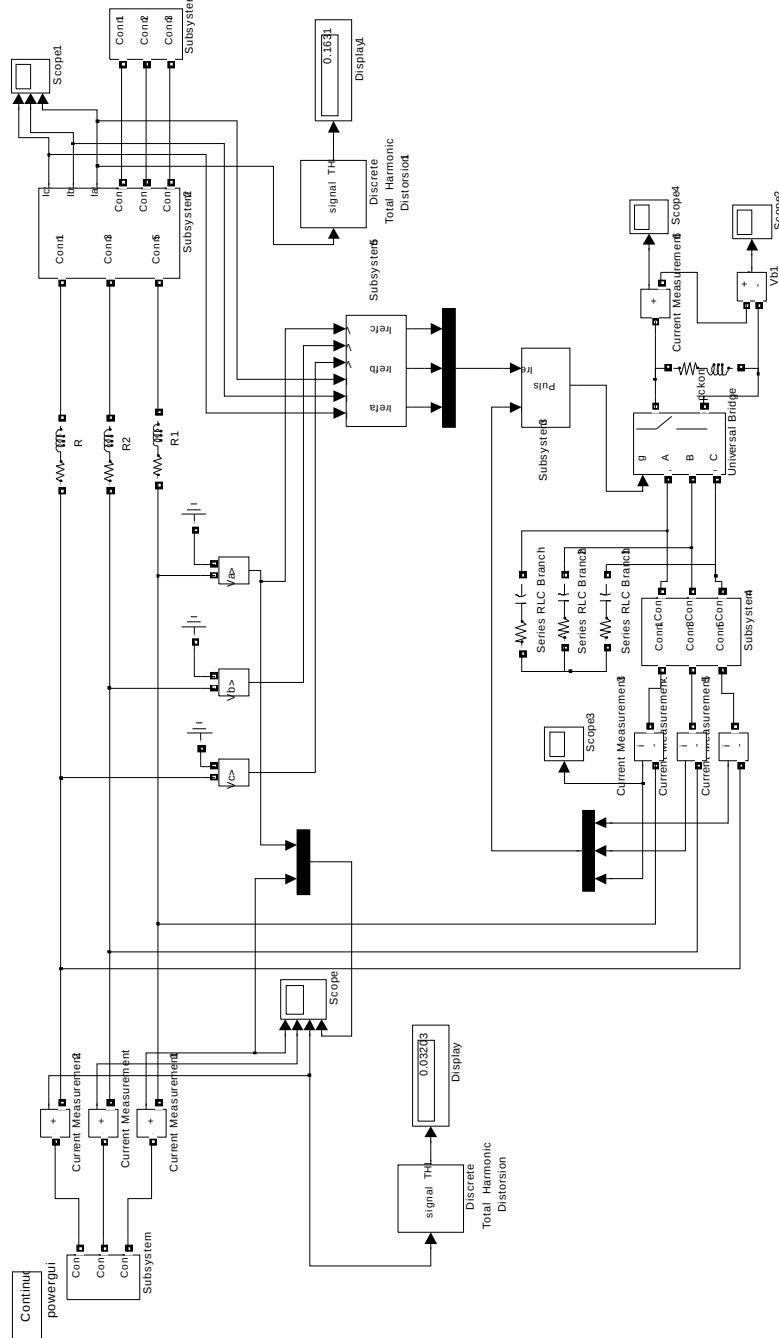
$$\begin{aligned}
 \text{Anahtarlama Frekansı} &= \text{Darbe sayısı} \times \text{temel frekans} \\
 &= 1000 \times 50 \\
 &= 50 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$



Şekil 7. 9 Gerçek akım ve referans akım

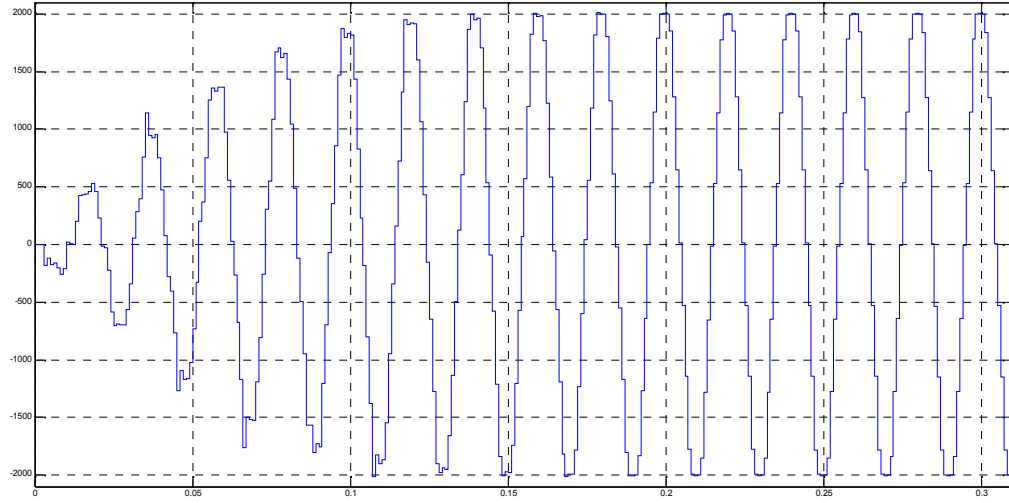
7.2. Akım Beslemeli Aktif Güç Filtre

İndüktif yük kullanarak, % THD = % 3.2 standartlara göre %5'ten daha az olunca iyi sonuç sayılır, kapasitif yük kullanırsak % THD = % 7.36

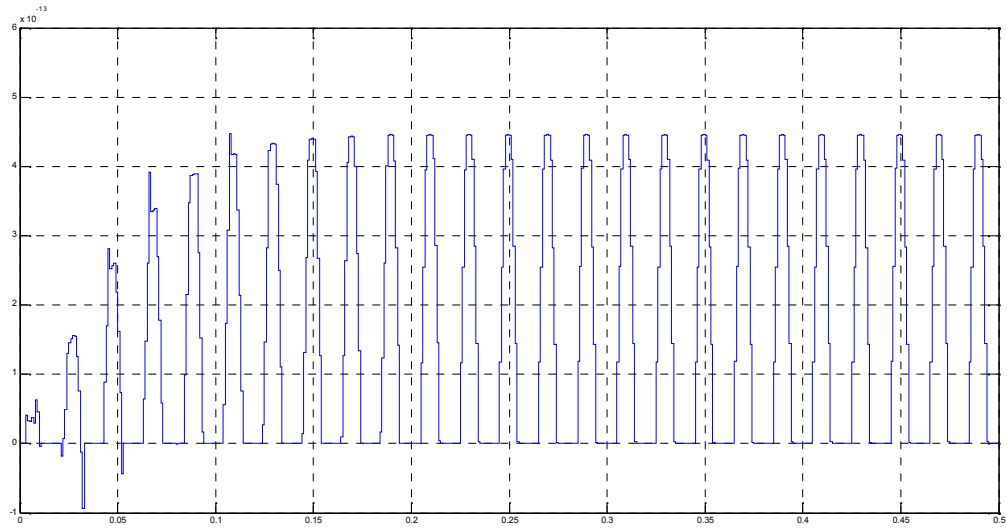


Şekil 7.10 Ana devre

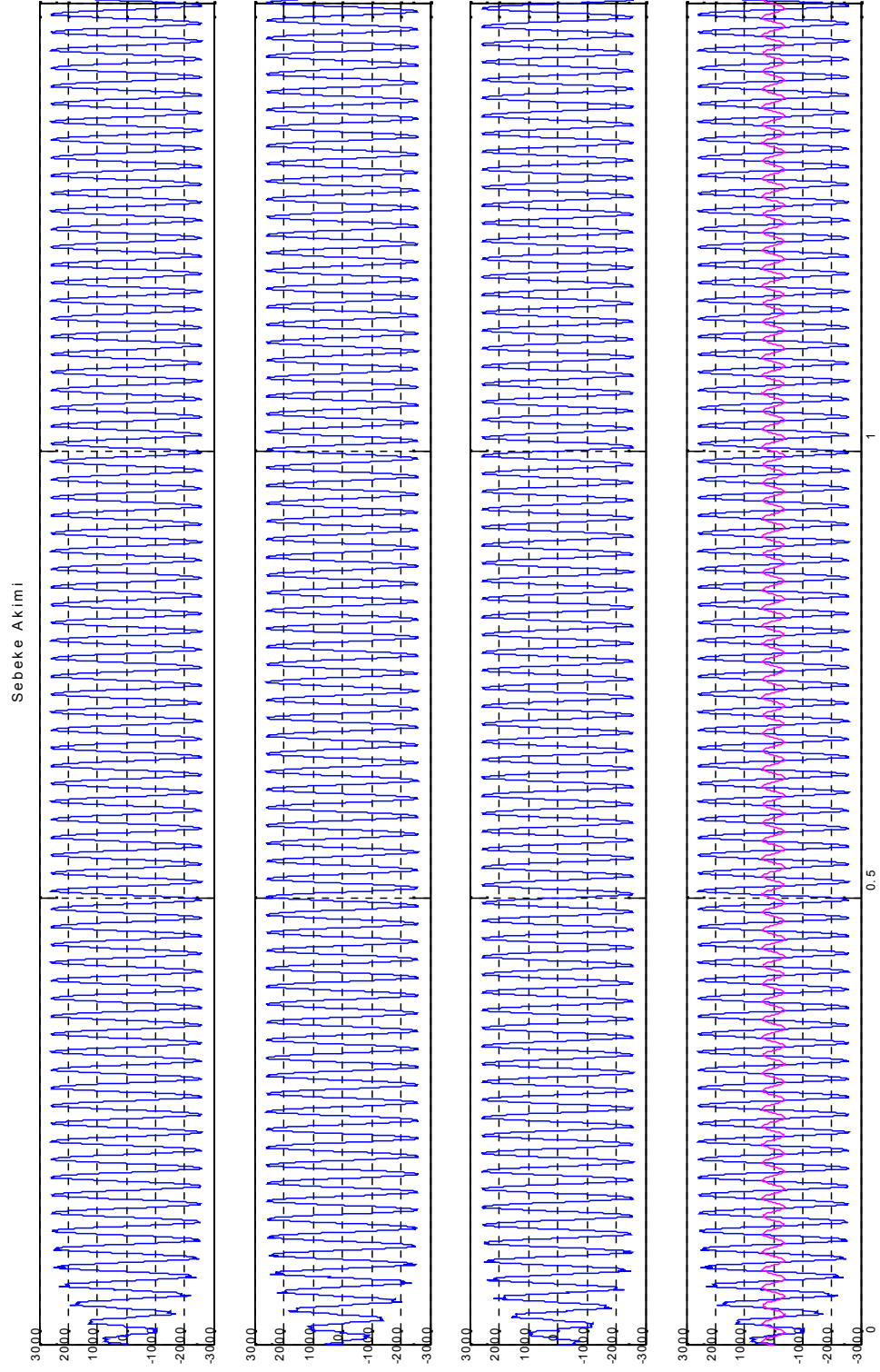
Karşılaştırma aynı yük üzerine olduğu için aynı yük akımı olacak, aynı kontrol ve histeresis devreleri kullanılacaktır.



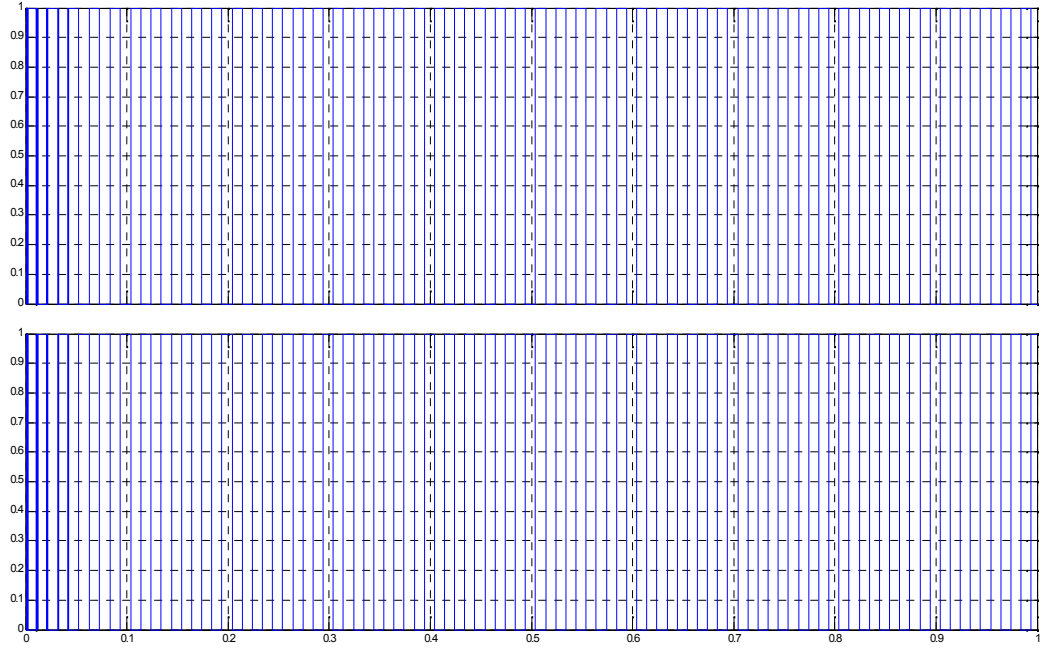
Şekil 7. 11 Filtre akımı



Şekil 7. 12 İndüktör akımı

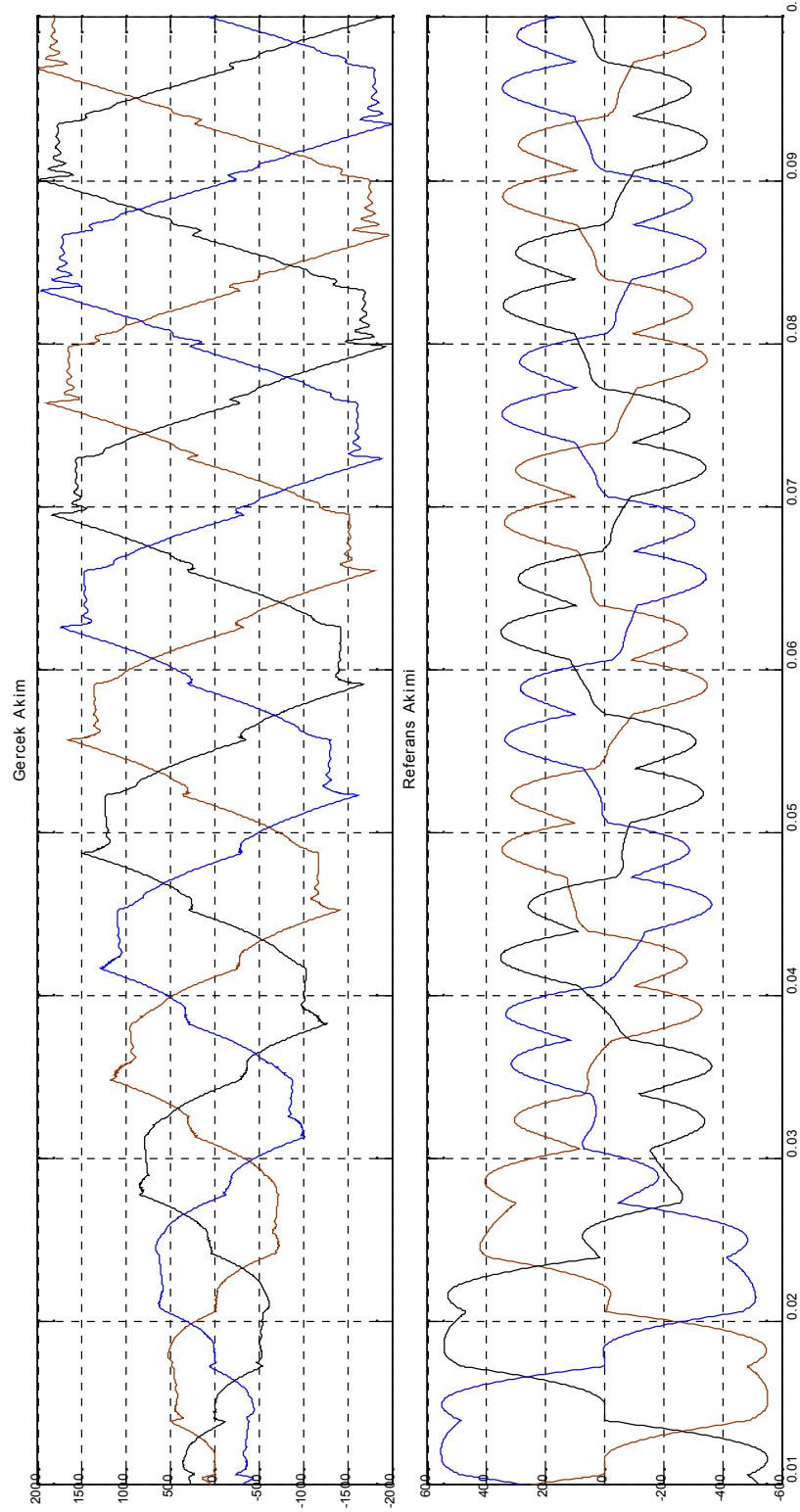


Şekil 7.13 Kaynak akımı



Şekil 7.14 Darbeler

$$\begin{aligned}\text{Anahtarlama Frekansı} &= \text{Darbe sayısı} \times \text{temel frekans} \\ &= 100 \times 50 \\ &= 5 \text{ kHz}\end{aligned}$$



Şekil 7.15 Gerçek ve referans akım

7.3 Sonuçları Değerlendirme ve Öneriler

Elektrik enerji sistemlerinde frekansın sabit (50 Hz), gerilim ve akımın harmoniksiz olması istenir. Ancak bu şekilde tüketicilere kaliteli bir enerji sunulabilir. Gün geçtikçe sisteme giren doğrusal olmayan yüklerdeki artış, gerilimin ve akımın dalga şeklini bozmaktadır. Sistemde oluşan bu harmonikler beraberinde birçok sorun da getirmektedir.

Aktif güç filtreleri doğrusal olmayan yüklerin meydana getirdikleri harmonikleri yok ederek güç kalitesini düzeltmektedirler. Aktif güç filtrelerinin verimli çalışabilmeleri için kullanıldıkları yerlere göre değişik bağlantı şekilleri uygulanmalıdır.

Aktif güç filtreleri harmonikleri yok etmek için kullanılan diğer filtrelere nazaran çok yüksek performans sağlamak ve tüm harmonik dereceleri için etkili olmaktadır. Ayrıca sisteme yeni yükler girdiğinde çok hızlı bir şekilde cevap vermekte, reaktif güç kompanze işlevini görmekte özellikle de gerilim regülasyonunu yapabilmektedir.

Aktif güç filtrelerin tüm bu üstün yanlarının yanı sıra en büyük dezavantajı maliyetlerinin yüksek olması ve ayrıca yüksek güçlü sistemlerin çoğuna uyum sağlayamamasıdır. Yük akımında ani değişiklikler olmadığı zaman aktif filtre çok verimli çalışır. Yüksek frekanslı harmonik bileşenlerin çok olduğu sistemlerde aktif filtrenin verimliliği düşer.

Bu tez çalışmasında 350 A-rms çıkış gücünde bir aktif filtrenin tasarımı ve benzetim çalışmaları anlatılmıştır, % THB (Toplam harmonik bozulma) % 16.3 gibi bir değeri olan doğrusal olmayan yükün üzerine çalışılmıştır.

Uygulamasının kolaylığı açısından seçilmiş olan histeresis akım kontrol metodunda, gerilim beslemeli aktif güç filtrenin (GBAGF'nin) çalışma sonucu % 2.5 (IEEE-519 1992 standartlarına göre % 5'ten az olduğu için çok iyi bir sonuç olmak üzere değerlendirilmiştir) gibi bir değere düşmüş olmasına rağmen anahtarlama frekansı

50kHz'e kadar çıkmaktadır (genelde GBAGF'lerde anahtarlama frekansı (20-30) kHz arasında değişir).

Bu değer yüksek güçlerde sorun yarattığı için gelecekte kurulan yeni tasarımlar üzerinde daha karmaşık modülasyon teknikleri deneyerek anahtarlama frekansı istenilen değerde ve sabit tutulmaya çalışılmalıdır. Gelecekteki çalışmalarda güç olarak daha büyük bir gerilim kaynaklı aktif filtre tipi kurulup onun üzerinde çalışmalara devam edilmesi planlamaktadır.

Akım beslemeli aktif güç filtrenin (ABAGF) çalışma sonucu % THB = % 3.2 olmuştur. Bu değer de GBAGF'ye göre yüksek anahtarlama frekansı değişkenlik göstermiş ve 5kHz'e kadar düşmüştür, ilgili bölümlerde açıklandığına göre genelde ABAGF'lerde anahtarlama frekansı (2-5) kHz arasında değişir, çalışmada bu değer üst limite karşılık gelmiştir.

GBAGF yapısının belirgin avantajı, ABAGF'deki endüktansına göre daha verimli, küçük boyutlu, daha ucuz olan kapasitif enerji depolama elemanında gizlidir. Ne var ki yakın gelecekte süper iletken teknolojisinin uygulanabildiği endüktans tasarımları ABAGF'yi daha avantajlı kılacaktır.

Sonuç olarak üç fazlı sisteminde aynı yük, aynı kontrol yöntemi ve aynı kaynak üzerine çalışarak (GBAGF) ve (ABAGF) yöntemleri ile harmoniklerin %5 seviyesinin altına düştüğü gözlemlenmiştir ve akım dalgasının bozulmasız sinüs dalgası şeklinde eldeki gerçekleşmiştir. Ayrıca GBAGF'nin daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 46 (5) : 960-962, (1999).
2. Altıntaş, A., "Paralel aktif güç filtresinin mikrodeneleyici ile PWM kontrolü", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara, Turkey, 1-2, 20-28, (2003).
3. M. Izhar, C. M. Hadzer, M. Syafrudin, S. Taib, S. Idris, "Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system", *National Power & Energy Conf. (PECon) Proceedings*, Kuala Lumpur, Malaysia, 104-108 (2004).
4. J.C. Das, "Passive filters-potentialities and limitations", *IEEE Trans. On Indst. Appl.*, 40 (1): 232-241 (2004).
5. F. Le Magoarou, F. Monteil, "Influence of the load on the design process of an active power filter" *Int. Conf. on Power Elect. And Variable Speed Drives*, 175-180 (1994).
6. Avcı, T. "Akım kaynaklı aktif güç filtresi için çeşitli kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara, Turkey, 57-63 (2008).
7. Bilgin, H. F., "Design and implementation of a current source converter based statcom", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Turkey, 2-4 (2007).
8. "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems", *IEEE Standards 519-1992*, USA, 63,70,85-87 (1993).
9. Bilki, F., "Reaktif güç ve kompanzasyon teknikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Turkey, 2-6 (2008).
10. Ay, S., "Alçak gerilim tesislerinde harmoniklerin incelenmesi", *Kaynak Elektrik Dergisi*, Sayı: 129, 1-3, Ankara, Turkey, Aralık, (1999).
http://www.enerjiplatformu.org/index.php?option=com_content&task=view&id=1591&Itemid=53
11. H. Akagi, E. H. Watanabe & M. Aredes "Instantaneous power theory and applications to power conditioning", 42-51, (2007).
12. Terciyanlı, A., "Güç sistemlerinde harmonikler, etkileri ve çözüm yöntemleri", *EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni*, Turkey, (2002).
<http://www.elektrik.gen.tr/content/view/97/30/>

13. Tunçalp, K., Kakilli, A., Sucu, M. “Bir alçak gerilim elektrik enerji tesisinde harmonik ölçüm sonuçlarının MATLAB’de simülasyonu ve pasif filtre uygulanması” **Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü**, İstanbul, Turkey, 2-4, (2003).
14. Filiz, C. “Güç sistemlerinde harmonikler ve filtrelemelerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**. Kırıkkale, Turkey, 7-11,35-36,127-129, (2006).
15. Kestane, K., “Tek fazlı paralel aktif güç filtresi analizi ve tasarımı” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, Turkey, 10-12,18-22, (2005).
16. Fang Z. P., “Application issues of active power filters”, **IEEE Ind. Appl. Magazine, 7th. international Conference on Harmonics and Quality of Power**, 1-6, Las Vegas, Nevada, USA, Sep. (1998).
17. İlaslaner, İ., “Güç kalitesinde harmonikler ve filtrelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**. Ankara, Turkey, 54, (2006).
18. Köse, K., “Gerilim beslemeli şönt aktif güç filtresi tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 13-14,25-28,35-39, 44, 47, Ankara, Turkey, (2001).
19. Emadi, A., Nasiri, A., Bekiarov, Stoyan B., “Uninterruptible power supplies and active filters”,126-135, (2005).
20. Hans Von Mangoldt GmbH & Co., Achen Germany.
<http://www.mangoldt.com/de/job.php>
21. H. Akagi and A. Nabae , “Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters”, **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, 22(3): 1-3, (1986).
22. P. G. Marambeas, P. Stergiopoulos, S. A.Papathanassioul, P. Bauer, S. N. Manias “Interactive multimedia material for an electrical power quality course” **National Technical University of Athens, Delft University of Technology, Netherlands**, 1-3, Greece, (1999).
23. S. Bhattacharya, T.M. Frank, D.M. Divan and B. banerjee “Parallel active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive SystemsActive filter system implementation” **Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin-Madison 1415 Engineering Drive**,1037, Madison, USA, (1996).

24. B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, USA, 46 (5): 961-962, (1999).
25. Uçar, M., Kesler, M., Özdemir, E., "DSP kontrollü paralel aktif güç filtresi ile harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu", *Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi*, 2-3, İzmit, Turkey, (2002).
26. Surya S., H. Wayne B., Roger C. Dugan & Mark F. McGranaghan "Electrical power systems quality" *McGraw-Hill Professional*, second edition, 167-183, 225-228, USA, (2002).
27. İ. Kocabaş, O. Uçak, A. Terciyanlı, "DSP tabanlı gerilim kaynaklı şönt aktif güç filtresinin uygulaması" *TÜBİTAK-Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü 06531*, 2-3, ODTÜ / Ankara, Turkey, (2006).
28. Nava, A. S., and Hernhdez, M. C. "A detailed instantaneous harmonic and reactive compensation analysis of three-phase AC/DC converters, in abc and $\alpha\beta$ coordinates", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (3):1039-1040,USA, (1999).
29. H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 20 (3): 625-630,USA, (1984).
30. Edson H. Watanabe, M. Stephan and M. A. Coppe, "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic load", *Federal University of Rio de Janeiro*, Caixa Postal 6850421945 - Rio de Janeiro, RJ, Brazil, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8 (2): 697-701, April (1993).
31. M.K.Darwish and P.Mehta M.El-Habrouk, "Active power filters: A review", *IEEE Proc.-Elertr. Power Appl.* 147 (5): 406, September (2000).
32. Efe, S. B., "Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi", Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enistitüsü*, 8-10, 33-34, Malatya, Turkey, (2006).
33. Altuntaş, A. "Tanımlanmış veya ölçülmüş dalga şekilleri için bir harmonik analizörü" *Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Simav-Kütahya, Turkey, 10 (2): 1-3, (2006).
34. Knight, W., King, A. "Uninterruptible power supplies" *McGraw-Hill Professional Engineering*, 117-120, 136-138, USA, (2004).

EKLER

EK -1 DA Reaktör Teknik Özellikleri (Hans Von Mangoldt GmbH & Co., Achen Germany) [31].

HANS VON MANGOLDT GmbH & Co. KG

D- 52080 Aachen / Germany

Hergelsbendenstraße 18

Reaktors / Filterkreisdrosseln ♦ Blocking Filter / Sperrkreise ♦ Components for Power Electronics / Wickelgüter für Umrichter

☎ +49-241/16607-0

☎ +49-241/16607-21

www.mangoldt.com



Empfänger/receiver

Firma/comp. : TUBITAK-UZAY METU Campus

Ort/place : 06531 TR, ANKARA-TURKEY

Name/name : Mr. Alper Tercivanli

Abt./dep. : Chief Researcher

MAIL: alper.tercivanli@uzay.tubitak.gov.tr

Referenz : Your E-Mail inquiry 16th Feb. 2007

Absender/sender

Name/name : Mr. Rautenberg ☎ - 44

Abt./dep. : sales department

Datum/date : 07.02.08

Seiten/pages : 2

Angebots-Nr/quot.no : 08/ 02 / 052

(please always state)

Dear Mr Tercivanli

We thank you for your inquiry, please find hereafter our quote:

SMOOTHING REACTOR

Design : single - phased, iron cored; PolyGapCoreConstruction

Enclosure : IP00 for indoor use

Cooling : AN; air cooled

coil windings : aluminium foil

temperature class : T45/H

Electrical - lay - out : acc.to VDE 0532 and IEC 289

Impregnation : completely impregnated under vacuum and overpressure in polyester resin acc. to temperature class H, temper-hardened under furnace temperature of 150 °C

Terminals : copper-bars acc. or similar to DIN 46206

Insulation level : LI / AC -10/3

Temperature control : NONE

Position	1
U_{DC} / V peak	800
I_{DN} / mA – I_{DN} / A (DC current)	20 – 150
I_{W1} / Arms – f_{W1} / Hz	3,2 – 300
I_{W1} / Arms – f_{W1} / Hz	0,4 – 600
I_{W2} / Arms – f_{W2} / Hz	0,1 – 1200
I_{RMS} / A	150
I_{CC} / kA – 1 sec	1,0 Thermal 2,0 Mechanical
Windings resistance $R_{DC}(20^{\circ}C)$ / mΩ	56,8
N_V / W (total losses)	1780
type of core	UI-Special
electrical connections	Copper bars 30 * 3 with Ø 11
weight / kg app.	220
number of units	1
price per unit / EURO	1 pcs 1.217,00 2-4 pcs 1.145,00

We deliver according to the „General Conditions of Sale for Products and Delivery of there Electrical Industry“

Time of delivery : 5-7 weeks after approval of autocad drawings EXW

Conditions : EXW

Payment : 14 days after date of invoice with 2 % discount, 30 days after date of invoice net

Kind regards

(U. Rautenberg)

EK –1 (devam) DA Reaktör Teknik Özellikleri (Hans Von Mangoldt GmbH & Co., Achen Germany) [31].

HANS VON MANGOLDT GmbH & Co. KG
D- 52080 Aachen / Germany
Hergelsbendenstraße 18

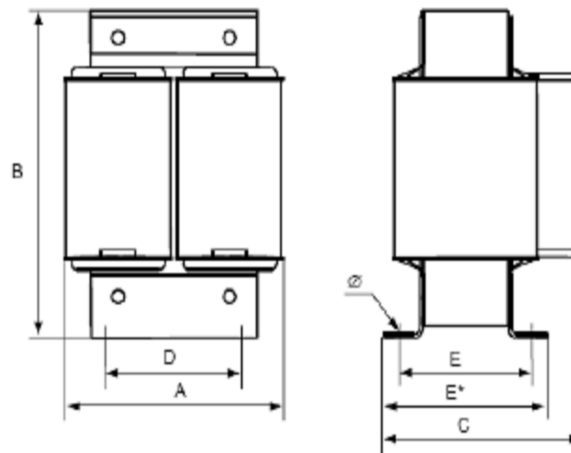
+49-241/16607-0
+49-241/16607-21
www.mangoldt.com



Reactors / Filterkreisdrosseln ♦ Blocking Filter / Sperrkreise ♦ Components for Power Electronics / Wickelgüter für Umrichter

Appendix

Preliminary drawing; not showing details



Item	A ca. [mm]	B ca. [mm]	C ca. [mm]
1	380	650	360

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : K. ANWAR, HUSSEIN
 Uyruğu : Irak
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1980 Kerkük
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 009 0539 217 53 70 – 00964 770 134 83 07
 e-mail : al_kabeily@yahoo.com
 : al_muhendis@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Musul Üniversitesi/ Elektrik Müh. Böl.	2002
Lise	Al-Velid Lisesi/ Kerkük	1997

İş Deneyimi

Yer	Görev	Yıl
Mullaabdullah elektrik üretimi ve güç istasyonu / Irak-Kerkük	Nöbetçi Mühendis	2003

Yabancı Dil

İngilizce, Arapça

Hobiler

Spor yapmak, Futbol, Kitap okuma