BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ DEVRELERİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Olcay PALTA

Yüksek Lisans Tezi
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr. Hanifi GÜLDEMİR

MAYIS-2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ DEVRELERİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olcay PALTA

(101131114)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2015

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Hanifi GÜLDEMİR (F.Ü)**
Diğer Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Servet TUNCER (F.Ü)**
Yrd. Doç. Dr. Korhan KAYIŞLI (İ.G.Ü)

MAYIS-2015

ÖNSÖZ

Bu çalışma sırasında benden akademik birikimiyle birlikte moral ve motivasyon desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Hanifi GÜLDEMİR' e teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı zamanda, benden yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Servet TUNCER, Yrd. Doç. Dr. Korhan KAYIŞLI hocama ve kıymetli eşim Selver PALTA' ya teşekkür ederim.

Olcay PALTA
MAYIS-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ……II

ŞEKİLLER LİSTESİ……III

TABLOLAR LİSTESİ……..…V

SİMGELER VE KISALTMALAR…….……VI

ÖZET…….…….VII

SUMMARY……..VIII

1. **GİRİŞ 1**

1.1. Tezin Amacı 4

1.2. Tezin İçeriği 4

2. HARMONİKLER.....5

2.1. Harmonik Standartları.....6

2.2. Harmonikleri Oluşturan Sebepler.....7

2.3. Harmonik Kaynakları.....9

2.3.1. Çeviriciler.....10

2.3.2. Transformatörler.....10

2.3.3. Generatörler.....10

2.3.4. Ark fırınları 11

2.4. Harmoniklerin Fabrikalar İçerisindeki Olumsuz Etkileri 11

3. GÜÇ FİLTRELERİ 12

3.1. Pasif Güç Filtreleri.....12

3.2. Aktif Güç Filtresi.....13

3.2.1. Aktif güç filtrelerinin yapıları ve kullanım alanları.....14

3.2.2. Aktif güç filtrelerinin tepki hızlarına ve gücüne göre sınıflandırılması 15

3.2.2.1 . Düşük güç uygulamaları 16

3.2.2.1.1. Tek fazlı sistemler.....16

3.2.2.1.2. Üç fazlı sistemler 16

3.2.2.2. Orta güç uygulamaları.....17

3.2.2.3. Yüksek güç uygulamaları.....17

3.3. Pasif Güç Filtresi İle Aktif Güç Filtrenin Karşılaştırması 17

4. AKTİF GÜÇ FİLTRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI 19
4.1. Aktif Güç Filtrelerinde Kullanılan Topolojiler 19
4.1.1. Paralel aktif güç filtreleri 20
4.1.2. Seri aktif güç filtreleri 21
4.1.3. Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici 22
4.1.4. Hibrid aktif güç filtreleri 23
4.2. Eviricide Kullanılan Güç Devresi Yapılarına Göre Aktif Güç Filtreleri 25
4.2.1. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi 25
4.2.2. Akım kaynaklı aktif güç filtresi 25
4.2.2.1. Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtrelerinin Genel Özellikleri 26
5. BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN MODELLENMESİ 28
5.1. Benzetimi Yapılan Bir Fazlı PAGF Sistem Modeli 29
5.2. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Modeli 30
5.3. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Benzetim Modeli 30
5.4. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Üniteleri 32
5.4.1. Doğrusal olmayan yük modeli 32
5.4.2. Evirici modeli 33
5.4.3. Kontrol yöntemi 34
5.4.3.1. Referans çıkarma yöntemleri 35
5.4.3.1.1. Fourier Yöntemi 35
5.4.3.1.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi 36
5.4.3.1.3. Senkron Referans Çatı Yöntemi 37
5.4.3.1.4. PAGF' si için kullanılan referans akım çıkarma yöntemi 38
5.4.3.2. Akım denetim yöntemi 39
6. BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN BENZETİMİ 44
6.1. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımdaki THB 46
6.2. Sistemdeki akım ve gerilim dalga şekilleri 47
7. SONUÇLAR 52
8. KAYNAKLN 56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Doğrusal olmayan bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi 5
Şekil 2.2. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri 8
Şekil 3.1. Pasif filtre blok şeması 13
Şekil 3.2. AGF' sinin temel şeması 14
Şekil 3.3. Pasif filtre, Aktif güç filtresi genel yapıları 15
Şekil 3.4. Aktif güç filtrelerinin tepki hızlarına ve gücüne göre sınıflandırılması 15
Şekil 4.1. Seri aktif güç filtresi, Paralel aktif güç filtresi, Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici Hibrid filtre.....20
Şekil 4.2. PAGF'nin tek hat diyagramı.....21
Şekil 4.3. Seri aktif güç filtresinin şematik diyagramı 22
Şekil 4.4. Birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok şeması.....23
Şekil 4.5. Hibrid aktif güç filtresi devresi.....24
Şekil 4.6. Hibrid aktif güç filtresi blok şeması.....24
Şekil 4.7. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi devre yapısı 25
Şekil 4.8. Akım kaynaklı aktif güç filtresi devre yapısı 26
Şekil 4.9. Şebekeye paralel bağlı akım kaynaklı aktif güç filtresi 27
Şekil 5.1. Tasarlanan bir fazlı PAGF sisteminin akış şeması 28
Şekil 5.2. Bir fazlı paralel aktif güç filtresi modeli 29
Şekil 5.3. Tasarlanan bir fazlı PAGF sisteminin şematik gösterimi.....30
Şekil 5.4. Bir fazlı PAGF' sinin benzetim modeli.....31
Şekil 5.5. Benzetimi yapılan PAGF' sinin üniteleri.....32
Şekil 5.6. Doğrusal olmayan yük 33
Şekil 5.7. Evirici blok gösterimi.....33
Şekil 5.8. H' köprü IGBT anahtarlı evirici 34
Şekil 5.9. Fourier yöntemi ile harmonik akımlarının elde edilmesine ait blok şema.....35
Şekil 5.10. ARGY kullanılarak referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram.37
Şekil 5.11. SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram.....38
Şekil 5.12. AGF'nin kontrol yöntemi 39

Şekil 5.13. Histerezis kontrol (Hysteresiscontrol).....40
Şekil 5.14. Histerezis akım denetleyicisinin pratikte uygulanması.....40
Şekil 5.15. Histerezis akım kontol devresi.....41
Şekil 5.16. Referans sinyal ve referans sinyale bağlı olarak oluşan DGM sinyal.....42
Şekil 5.17. DGM sinyallerinin, IGBT anahtarlarına uygulanması gereken ayak portları ...42
Şekil 5.18. Referans akım sinyaline bağlı meydana gelen DGM sinyali 43
Şekil 6.1. PAGF' sinin pasif olduğu durumda ki doğrusal olmayan yükün benzetimi.....44
Şekil 6.2. Devreye uygulanan kaynak gerilimi sinyali 45
Şekil 6.3. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu harmonikli akım.....46
Şekil 6.4. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu güç.....46
Şekil 6.5. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımın THB değeri 47
Şekil 6.6. PAGF'li doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akım 48
Şekil 6.7. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımdaki THB 48
Şekil 6.8. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu güç.....49
Şekil 6.9. Tasarlanmış eviricinin çekmiş olduğu akım.....49
Şekil 6.10. Eviricide kullanılan IGBT üzerinden geçen akım 50
Şekil 6.11. Doğrusal olmayan yükün, çekmiş olduğu harmonikli akıma, enjekte akımın uygulanması.....50
Şekil 6.12. Yükün çekmiş olduğu farklı akımlarda, oluşan harmonikler 51

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. 1992 yılına ait IEEE-519 akım harmonik standartları. 7
Tablo 2.2. 1992 yılına ait IEEE-519 gerilim harmonik standartları 7
Tablo 3.1. Pasif ve aktif filtrenin karşılaştırılması.....18
Tablo 6.1. Farklı yüklerde çekilen akım harmonikleri ve PAGF'li harmonikler 51

KISALTMALAR

AC : Alternatif akım
AF : Aktif filtre
AGÇF : Alçak geçiren filtre
AGF : Aktif güç filtresi
ARGY : Anlık reaktif güç yöntemi
BGAD : Birleşik güç akım denetleyicisi
DC : Doğru akım
DGM : Darbe genişlik modülasyonu
EMC : Elektromanyetik uyum
HF : Hibrid filtre
HVDC : Doğru akım ile enerji nakli
IGBT : İzole kapılı bipolar transistör
kVA : Kilovolt amper
LC : Bobin ve kondansatör
MVA : Megavolt Amper
PAF : Paralel aktif filtre
PAGF : Paralel aktif güç filtresi
PF : Pasif filtre
PGF : Pasif güç filtreleri
PPF : Paralel pasif filtre
RL : Direnç ve bobin
SAF : Seri aktif filtre
SAGF : Seri aktif güç filtresi
SRÇY : Senkron referans çatı yöntemi
THB : Toplam harmonik bozulma
UPQC : Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici
UVDGM : Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu
UVGM : Uzay vektör genişlik modülasyonu
YGF : Yüksek geçiren filtre

ÖZET

Güç elektroniği uygulamalarında çoğu zaman tercih edilen yarı-iletken malzemelerin yaygın olarak kullanımı enerji iletim hatlarında harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Gerilim ve akım dalga şekillerinin temel dalga şekillerinden uzaklaşmasına sebep olan bu harmonikler, güç faktörünün düşmesine, güç kayıpların artmasına ve elektrik-elektronik sistemlerinin zarar görmesine sebep olmaktadır.

Şebekede oluşan bu harmoniklerin giderilmesi için pasif filtreleme(PF) ve aktif filtreleme(AF) sistemleri kullanılmaktadır. Bobin ve kondansatörden oluşan geleneksel PF belirli frekans aralıklarındaki harmonik bileşenleri ortadan kaldırırken, AF' ler birçok frekansta harmonik bileşenlerini ortadan kaldırmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlayan aktif güç filtreleri(AGF), seri aktif güç filtreleri(SAGF), paralel aktif güç filtreleri(PAGF) ve bunların birleştirilmesiyle meydana gelen, hibrid filtre(HF) çeşitlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan yüklerin kaynakta oluşturduğu harmoniklerin, PAGF yardımıyla giderilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle MATLAB/Simulink benzetim programında doğrusal olmayan tek fazlı bir yük modeli oluşturulmuş ve kaynakta oluşan harmonikler gözlemlenmiştir. Kaynakta oluşan bu harmoniklere karşı yine bir fazlı PAGF modeli oluşturulmuş ve bu sistemin benzetimi yapılmıştır. Söz konusu harmoniklerin giderilmesinde uluslararası standartlarda belirtilen sınır değerlerin altında harmonik değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif güç filtreleri, Paralel aktif güç filtresi, Harmonik filtreleme

SUMMARY

Modelling and Simulation of Single-Phase Parallel Active Power Filters

Wide spread use of semiconductor elements in power electronics applications have yield harmonics in energy transmission lines. These harmonics cause voltage and current wave shapes to be differ from main component wave shape, reduce power factor, increase power losses and damage electrical and electronic systems.

Active and passive filtration systems are used for the suppression and elimination of the harmonics induced in the mains. Traditional passive filtration systems includes inductor and capacitor can suppress harmonics for only defined range of harmonics but active filters can suppress and eliminate harmonics in the more frequency range.

Today, widely used active power filters can be used in various forms such as series active power filters, parallel active power filters, combination of these two and hybrid active power filters.

In this thesis, it's aimed to eliminate or suppress harmonics in single-phase source caused by the nonlinear loads using parallel active filter. A single-phase nonlinear load model has been constructed and the harmonics induced in the source caused by the nonlinear load was observed. A single-phase parallel active power filter is modelled and used for the suppression of source harmonics. The whole system is simulated using Matlab/Simulink simulation environment. The current wave shape is recorded before and after use of active power filter. The effectiveness of the active power filter is observed from the obtained results. It has been observed that the suppression of harmonics is under the value defined by international standards.

Key Words: Active power filters, parallel active power filter, harmonic filtering

1.GİRİŞ

Enerji dağıtım sistemlerinde statik güç dönüştürücülerinin kullanımının artmasıyla birlikte güç kalitesi önemli bir sorun haline gelmeye başlamıştır. Güç kalitesi, elektrik güç sisteminde akım ile gerilimi tanımlayan çeşitli elektromanyetik olguları kapsamaktadır [1].

Enerjinin kullanımında verimin artırılması için güç elektroniği elemanları daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır [2]. Gün geçtikçe artan gerilim bozucu etkilere yeni bir etken daha ilave edilmiş ve harmonik olarak adlandırılmıştır. Şebekedeki harmoniklerin yükler üzerinde oldukça önemli miktarda istenmeyen etkileri olmasına rağmen dikkate alınmaması nedeniyle elektrik şebekesinde ve yüklerde verim ve kalite düşüklüğüne sebep olmaktadır. Dağıtım sistemlerinde hatların iletim kapasitesini ve verimini arttırmak, gerilim dalga şeklini iyileştirmek gibi nedenlerle enerji dağıtım sisteminde daha fazla sayıda kondansatör ya da kondansatör grubu kullanılmaktadır. Kompanzasyon amacıyla konulan bu kondansatörler hatların ve hatlardaki transformatörün endüktansları nedeniyle rezonans devresi oluşturabilmektedir. Gerçekte çok küçük değerli olan harmoniklerin etkisi, rezonans oluşumuyla artarak oldukça etkili hale gelebilmektedirler. Bu durum gerilim dalga şeklinin bozulmasını önemli ölçüde arttırabilmektedir.

Harmonikler, güç katsayısını azaltırken, enerji hatlarındaki kayıpları ise arttırmaktadır. Ayrıca devredeki kondansatörler ile elektrik makinelerinin aşırı ısınmasına ve çalışma ömürlerinin azalmasına, sayaçların ve koruyucu devre elemanlarının hassasiyetinin bozulmasına, iletişim hatlarında ve radyo alıcılarında parazitlere, bilgisayar ve benzeri cihazların etkilenmesine sebep olmaktadır [3].

Elektrik enerjisindeki kısa süreli kesiklik, frekans, genlikteki yükselme ve düşmeler, gerilim ve akım harmonikleri ve fazlar arası dengesizlik güç kalitesini etkileyen faktörlerdir. Bununla birlikte, kalite kavramındaki amaç, sabit şebeke frekansında, sabit genlikli ve sinüzoidal dalga şekline sahip gerilim ve akımlar elde etmektir. Sistemdeki mevcut güç dönüştürücüleri, endüstrideki büyük güçlü ayarlanabilir hız sürücülerinden ofis ve evlerdeki bilgisayarlar, yazıcılar, televizyonlar ve elektronik balastlı flüoresanlar gibi küçük uygulamalara kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kullanılan bu sistemler doğrusal olmayan yükler olarak tanımlanmaktadır. Bu yükler elektrik şebekesinden harmonik içeren akımlar çekerler ve üç fazlı elektrik sistemlerinde dengesizliğe ve nötr hattan Doğru akım (DC) akım çekilmesine sebep olabilirler. Harmoniklerin varlığı, reaktif

güç yüklemesi, gerilim dengesizliği ve nötr hattan çekilen akımlar sistem veriminin ve güç faktörünün düşmesine sebep olmaktadır [1].

Elektrik güç sisteminde doğrusal olmayan elemanlar, harmoniklere sebep olmakta ve tüketicinin aldığı enerji kalitesini olumsuz yönde etkilemektedirler. Harmoniklerin elektrik sistemleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve olumsuzlukların giderilmesi bu sistemlerde detaylı analizlerin yapılmasını gerektirmektedir.

Harmonik etkilerini azaltma ve güç faktörünü iyileştirme iki şekilde mümkün olmaktadır. Bunlardan ilki, yük tarafında yapılan işlem olup, yükün harmonikli yapıya daha az duyarlı olması, belli gerilim veya akım harmonikleri altında çalışmaya izin vermesini sağlaması şeklindedir. Diğer yöntem ise, harmonikli yapıyı azaltmak için hat üzerinde yapılan işlemlerdir. Hat üzerindeki güç kalitesindeki bozulmayı önlemek için kullanılan sistemler, pasif güç filtreleri (PGF) ve aktif güç filtreleri (AGF) diye adlandırılır. PGF' ler yaygın olarak kullanılmakta olup daha ekonomiktir. Ancak PGF' leri belli harmonik bileşenler için tasarlandığından harmoniklerin değişmesi durumunda oluşan yeni harmoniklerin bastırılmasına cevap verememektedir. AGF' lerin performansı PGF' lere göre daha iyi olup akım harmoniklerinde azaltma sağlamakta ancak güç elektroniği sistemleriyle gerçekleştirildiği için daha pahalı olmaktadır [4].

Geleneksel olarak PF' lerde bobin ve kondansatör (LC) elemanları kullanılmakta olup, hat akımı harmoniklerini yok etmek ve güç faktörünü düzeltmek için kullanılmaktadır. L ve C elemanları kullanıldığı için PGF' lerin rezonans oluşturma gibi olumsuzluğu bulunmaktadır. PF' lerin olumsuzluklarını gidermek için AGF' ler geliştirilmiştir [5].

2003 yılında Dursun [6] tarafından, doğrusal olmayan sistemler için bir SAGF' si tasarımı ve analizi çalışmasında, filtre devresi üzerinden yük akımının tamamı geçtiğinden uygulamada hem anahtarlama elemanları, hem de kondansatör yük akımının tamamını taşıyabilecek özellikte seçilmesi önerilmiştir. Yük akımının tamamının filtre kondansatörü üzerinden geçmesi, yük akımının denetimi açısından bir avantajdır. Uygun kondansatör seçimi açısından ise dezavantaj olduğu belirtilmiş, ancak filtre devresi şebekeye bağlanırken herhangi bir transformatör kullanılmaması ve kondansatör gerilimi denetlenirken yük akımının DC tamamının denetlenebilmesi, doğrusal olmayan yük akımlarının denetiminde büyük bir üstünlük sağladığı, şebeke geriliminin tamamının kondansatör üzerinde düşmemesi, kondansatörün gerilim değerinin düşük olmasına imkân tanıdığı belirtilmiştir. PAGF' leriyle karşılaştırıldığında SAGF' sinin daha düşük

anahtarlama frekansında kompanzasyon yapabilme ve harmoniklerin etkilerini bastırabilme imkânı sunduğu vurgulanmıştır.

2005 yılında Özdemir ve arkadaşı [5] tarafından AGF' si ile harmoniklerin filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu çalışmasında AGF' si sisteminin referans kaynak akımı tepe değeri yöntemi ve anlık güç teorisi tabanlı denetim ile performans iyileştirilmesi incelenmiştir. Bu amaçla geliştirilen her iki denetim algoritması ile hem reaktif güç kompanzasyonu hem de akım harmonik filtrelenmesi gerçekleştirilmiştir. Denetim algoritmalarının kararlı hal ve geçici durum performansları, şebekeden harmonik ve reaktif güç bileşenleri çekmesi durumunu incelemiş, harmonik bozulma açısından Referans Tepe Kaynak Akımı Yönteminin daha iyi sonuç verdiği söylenmiştir.

2009 yılında Siğergök [1] tarafından gerçekleştirilen uzay vektör genişlik modülasyonu (UVGM) denetimli PAGF' sinin modellenmesi ve benzetimi çalışması yapılmış ve PAGF' nin performansı filtre bobininin endüktans değeri ve filtre kondansatörünün kapasitesi ile yakından ilişkili olduğu, filtre bobini endüktans değerinin normalden büyük olması, yüksek mertebeli harmoniklerin bastırılamamasına sebep olurken, endüktans değerinin normalden küçük olması, kaynak akımının anahtarlama frekansında darbeler içermesine sebep olduğu, bununla birlikte filtre kondansatörünün normalden küçük olması, gerekli kompanzasyon akımının sağlanamamasına sebep olacağı, ayrıca filtre performansını arttırmak için sisteme pasif filtre ilave edilebileceği belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) yöntemiyle geniş bir modülasyon indeksi aralığı elde edilerek harmonik bileşenleri önemli derecede azaltıldığını gözlemlemiştir.

2011 yılında Çöteli ve arkadaşları [2] tarafından gerçekleştirilen, "PAGF' sinin denetimi için farklı referans işaret çıkarma yöntemlerinin incelenmesi" isimli çalışmada AGF'sinin modeli oluşturulmuş ve denetimi için gerekli olan referans işaretler farklı yöntemlerle elde edilmiştir. Akım denetimi ise dayanıklı yapısından dolayı histerezis akım denetleyicisi ile gerçekleştirilmiş olup, PAGF' si kullanılarak doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmoniklerin azaldığı benzetim sonuçlarından görülmüştür. Aynı çalışmada uygun denetim algoritması ile aktif filtrelerin farklı amaçlar için de kullanılabilirliği belirtilmiş ayrıca referans işaret çıkarma yöntemlerinden anlık reaktif güç yöntemi (ARGY) ve senkron referans çatı yöntemi (SRÇY) kullanılan filtrelere bağlı gecikmelerin AF performansını olumsuz yönde etkilediği açıklanmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Elektrik sistemlerindeki güç kalitesine etki eden harmonikler ve bu harmoniklerin bastırılmasına yönelik çalışmaların araştırılması, özellikle tek fazlı sistemlere yönelik olarak oluşturulan AGF' lerin incelenmesi ve bu filtrelerden tek fazlı PAGF' sinin MATLAB/SIMULINK' de matematiksel modelinin elde edilmesi, benzetiminin yapılması ve faklı yükler altında alınan sonuçların irdelenmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Tezin İçeriği

Birinci bölümde, genel bir giriş yapıldıktan sonra konu hakkında yapılmış olan bazı bilimsel çalışmalardan bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, harmonik kavramının ne olduğu, sebeplerinin ve kaynağının neler olduğu belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde, güç filtreleri ve bunların kullanım alanları gösterilmiş ve sınıfları belirtilmiştir.

Dördüncü bölümde, AGF' leri sınıflandırılarak, topolojilerine ve yapılarına göre incelenmiştir.

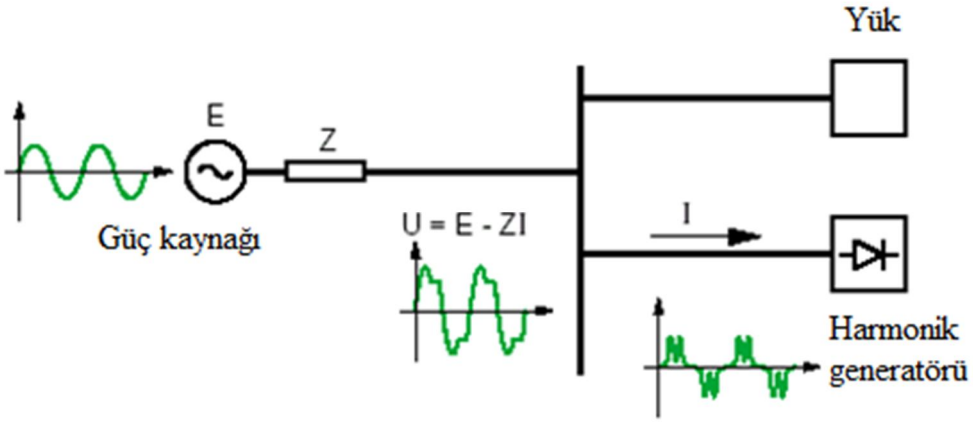
Beşinci bölümde, bir fazlı PAGF' sinin modellenmesi yapılmış ve model yapısı gösterilmiştir

Altıncı bölümde, bir fazlı PAGF' sinin benzetimi yapılmış benzetimde kullanılan üniteler açıklanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Yedinci bölümde; Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. HARMONİKLER

Yarı iletken elemanlar ile sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Şekil 2.1' de temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalar harmonik olarak adlandırılmaktadır [7].



Şekil 2.1. Doğrusal olmayan bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi [7].

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüzoidal olmayan kaynaklardan oluşmaktadır. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüzoidal dalganın bozulmasına sebep olmaktadır. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilmektedir. Fourier analizi ile sinüzoidal olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilmektedir. Böylece harmonik analizi yapılabilmektedir. Enerji sistemlerinde, gerilim ve akım dalga şekillerinin harmonik kaynaklı bozulmaları çeşitli problemlere yol açmaktadır.

Bunlar maddeler halinde;

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,
- Gerilim düşümünün artması,
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma olarak verilebilir [1].

2.1. Harmonik Standartları

Doğrusal olmayan yükler içeren tesisler kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için gerekli önlemler alınmalıdır. Toplam harmonik bozulma (THB) akım ve gerilim dalgalarındaki bozulmayı ifade eden bir göstergedir. THB, harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının, temel bileşenin efektif değerine oranı şeklinde hesaplanmaktadır (IEEE 1992). Ayrıca mümkün olduğu kadar, tüketicilerin güç çeviricileri kullanımında ekonomik kriterler de dikkate alınarak, daha az sayıda ve düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren yüksek darbe sayılı çevirici devreleri tercih etmesi teşvik edilmelidir.

Birçok ülkenin kendine ait harmonik standartları olmasına karşın, bunların en çok bilineni IEEE 519 standardıdır. IEEE -519 standardının ilk versiyonu IEEE-519 1981 olup, 1981 yılında (IEEE Static Power Converter Committee of Industry Applications Society) "Endüstriyel Uygulamalar Derneğinin IEEE Statik Güç Dönüştürücü Komitesi " tarafından (IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Power Converters) "Güç Dönüştürücülerinin Reaktif Kompanzasyonu ve Harmonik Kontrolü için IEEE Klavuzu" olarak sunulmuştur. Bu bildiri 1989-1992 yılları arasında gözden geçirilip (IEEE

Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electric Power Systems) "Elektriksel Güç Sistemlerinde Harmonik Kontrolü için IEEE tarafından Önerilen Alıştırmalar ve Gereksinimler" olarak güncellenmiştir. Bu bildiri, bazı sınırlamalardan daha çok uygulanmış bir grup tavsiyeden oluşmaktadır [1,22].

IEEE-519 1992 standardı tarafından belirlenen akım ve gerilim harmonik standartları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.1. 1992 yılına ait IEEE-519 akım harmonik standartları [1].

I_{sc}/I_1	h<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	THB(%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	4.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

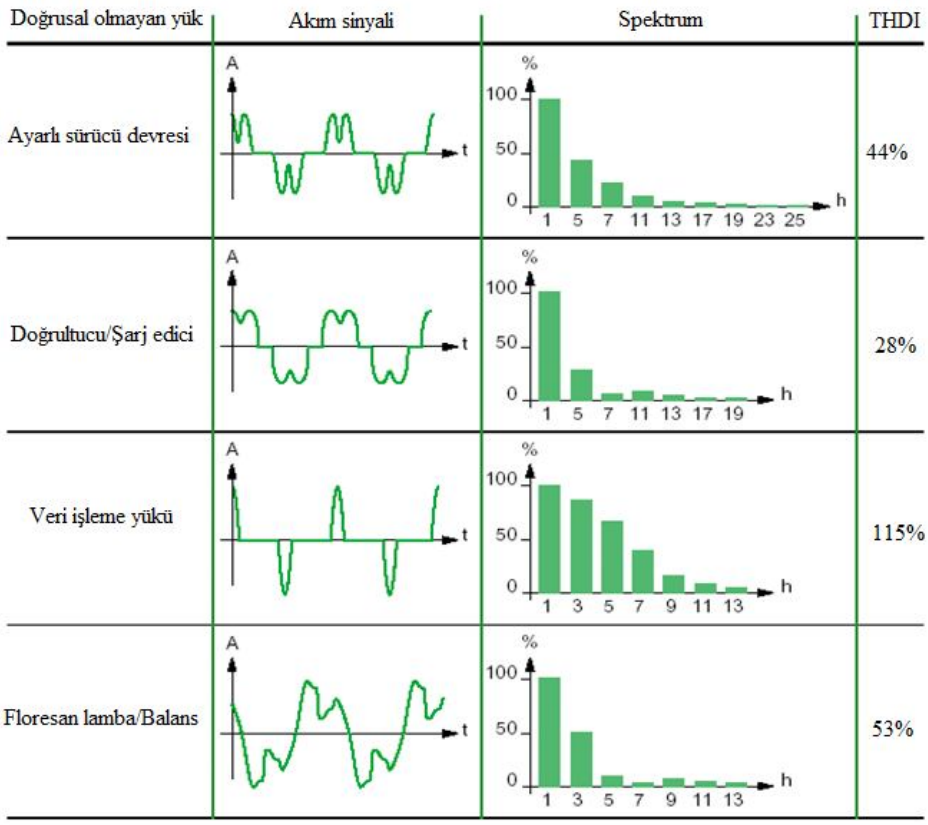
Tablo 2.2. 1992 yılına ait IEEE-519 gerilim harmonik standartları [1].

Bara Gerilimi	Maksimum bireysel Harmonik bileşen	Maksimum THB(%)
2.3-6.9 kV	3.0	5.0
69-138 kV	1.5	2.5
>138 kV	1.0	1.5

2.2. Harmonikleri Oluşturan Sebepler

- Manyetik devrelerde doyma,
- Güç kontrol elemanları,
- Lineer olmayan yükler,
- Doyma bölgesinde çalışan transformatör mıknatıslanma akımları,
- İndüksiyon ısıtma,
- Yarıiletken kontrollü cihazlar,
- Tristörlü dinamik kompanzasyon,
- Deşarj lambaları,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Bilgisayarlar,

- Flüoresan lambaları, Elektronik balastlar,
- Akü şarj sistemleri,
- Elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler,
- Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler.
- Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar.
- Senkron makinelerinin hava aralığı döner alanının harmonikler.
- Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- Şebekedeki nonlineer yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler, v.b.
- Motor hız kontrol düzenleri,
- Doğru akım ile enerji nakli (HVDC),
- Statik VAR generatörleri
- Olasılıkla elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri
- Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemleridir [7].



Şekil 2.2. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri [7].

Şekil 2.2' de farklı yüklerden çekilen, farklı THB ve sinyaller görünmektedir. Çıkan sonuçlara bakıldığında her bir yükün çektiği akım sinyali bunun yanında oluşan THB' lerin farklı olduğu görünmektedir.

2.3. Harmonik Kaynakları

Bilindiği gibi elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir.

Harmonikleri meydana getiren elemanlar genel olarak şu şekilde verilebilir;

- Çeviriciler,
- Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarj prensibiyle çalışan aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlamalı güç kaynakları,
- Kaynak makineleri,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- Statik VAR kompanzatörler,
- Ark fırınları,
- HVDC sistemleridir.

Enerji sisteminde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzluklarının giderilmesi bakımından tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Bazı harmonik kaynaklar ise şöyledir [9].

2.3.1. Çeviriciler

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklardan biri, üç ve tek-fazlı hat komütasyonlu Çeviricilerdir. DC iletim sistemleri akü ve fotovoltaik sistemler, hat komütasyonlu çeviriciler üzerinden beslenir. Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü çeviricilerin (kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demir yolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) çeviricilerin bir fazlı çeviricilere göre avantajı, üç fazlı çeviricilerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı çeviriciler, çevirici transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısıyla tanınır genel olarak çeviricilerin ürettikleri harmonik bileşenler n=k.p±1 ile ifade edilir. Burada k=1,2,3 değerlerinde olup tam sayıları p=6,12, olmak üzere darbe sayısını belirtmektedir. Darbe sayısı artıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir.

2.3.2. Transformatörler

Enerji sistemine bağlanan transformatörler harmoniklere neden olurlar. Transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden kaynaklanan harmonik bileşenler transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının topraklanıp topraklanmamasına bağlı olarak değişmektedir. Transformatörlerin yük durumuna göre de harmonik genliklerinin değişimi söz konusu olmaktadır. Sürekli enerji altında bulunan bu elemanla harmonik kaynağı olarak sistemde harmonik akımları dolaştırarak harmonik bozulmaya yol açarlar. Bu nedenle transformatörlerin harmonik özelliklerinin irdelenmesi, harmoniklerin etkileri bakımından önem kazanmaktadır.

2.3.3. Generatörler

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun

yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim dalga şeklinin sinüzoidal olması sağlanır.

2.3.4. Ark fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Ark fırınları, elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal olmaması nedeniyle harmonik bileşenler üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup zaman göre rast gele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rast gele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörler yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir.

Zaman zaman ark tutuşması veya sönmesi de harmonik akımların oluşmasına yol açmaktadır. Harmonikler en üst düzeye ergitme safhasında ulaşırlar. Arıtma safhasında ise tamamen erimiş, metal karşısında her yarım dalgada tutuşan ark her seferinde bir öncekine benzer bir durum gösterir. Bu nedenle, akım harmonikleri daha düşük düzeyde ve istikrarlıdır. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne, çalışma safhasına, ocaktaki malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişir [9].

2.4. Harmoniklerin Fabrikalar İçerisindeki Olumsuz Etkileri

- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve normal çalışmama,
- Mikroişlemciler üzerinde hatalı çalışma
- CAD/CAM terminallerinde hafızaların silinmesi,
- Elektronik kart arızaları,
- Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması [10].

3. GÜÇ FİLTRELERİ

Doğrusal olmayan yüklerin ve güç dönüştürücülerinin, güç sistemlerinde oluşturduğu harmonikler, bu harmoniklerin oluşturduğu güç kayıpları üzerinde durulması gereken bir konu oluşturmuştur. Alternatif akım(AC) sistemlerinde, kayıpların en aza indirilmesi ve sistemin enerji performansının arttırılması için, oluşan harmonikleri en aza indirme gerekliliği meydana gelmiştir.

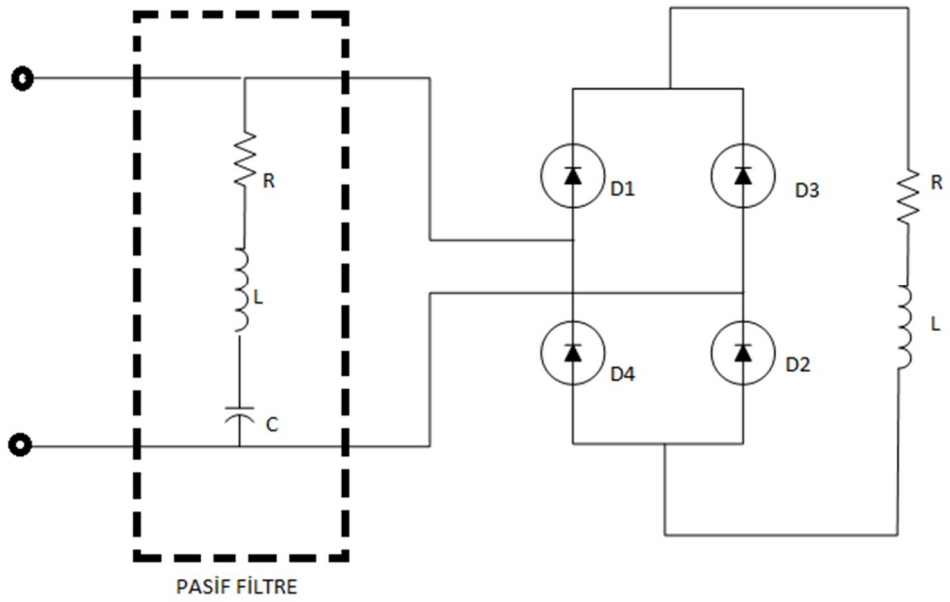
Bu sebepler doğrultusunda, oluşan harmoniklerin filtrelenmesi ihtiyacı doğmuş, ilk olarak ise günümüzde de geleneksel olarak kullanılan PGF' ler ortaya çıkmıştır. Maliyetinin düşük ve tasarımının kolay olması PGF' lerin cazibesini artırmıştır. Son zamanlarda ise gelişen teknolojik aletler ve bu teknolojik aletlerin hassasiyetlerinin artmasıyla güç dengesi faktörünün önemi, daha da fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu da oluşan harmoniklerin kontrolünü daha etkin yapan AGF' leri, üzerine çalışmaları artırmıştır.

AGF' lerin, PGF' lerine göre dezavantajı ise maliyeti fazla ve tasarım aşamasının zorlu olmasıdır. Fakat AGF' lerinin performansı bu gibi dezavantajları bypass etmektedir.

3.1. Pasif Güç Filtreleri

PGF direnç, bobin ve kondansatör (RLC) elemanlarından oluşmaktadır. PGF' lerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşenin frekansında bir rezonans oluşturacak şekilde L ve C değerlerini belirlemektir [4].

PGF, şekil 3.1' de göründüğü gibi doğrultucu önüne R-L-C elemanları ekleyerekten oluşturulmuş filtrelemedir. PGF' den, üst düzeyde performans beklenilemez, ayarlanmış değerlerde filtreleme sağlanır.



Şekil 3.1. Pasif filtre blok şeması

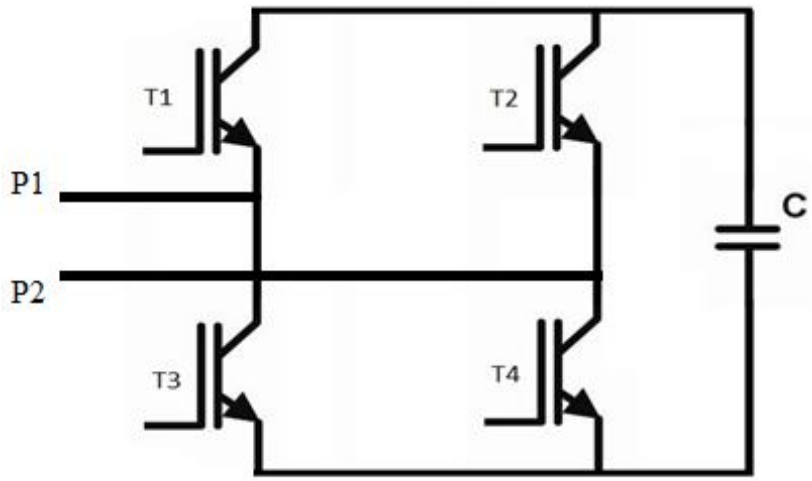
3.2. Aktif Güç Filtresi

Güç sistemlerinde oluşan problemlerin etkisini en aza indirmek, hat akım ve gerilimlerinin harmonik bileşenlerini azaltmak ve güç faktörünü arttırmak için filtreleme teknikleri geliştirilmiştir. Güç faktörü düzeltimi ve harmoniklerin bastırılmasında yaygın olarak PGF' ler kullanılmaktadır. PGF' ler, güç sistem akımlarındaki sadece 3. ve 5. harmonik akımı gibi temel harmonik frekanslarını filtrelemek için ayarlanabilirler. Kaynak empedansından etkilenerek kompanzasyon sürecinde istenmeyen rezonans problemlerine neden olurlar.

PGF' nin dezavantajları nedeniyle, güç faktörü ve harmonik kompanzasyonu için AGF' ler geliştirilmiştir. Güç elektroniği devrelerinin gelişimi ile AGF' ler, PGF' lerin bir alternatifi haline gelmiştir. Statik güç dönüştürücüleri ve diğer yüksek güçlü yüklerin ürettiği harmoniklerin bastırılması için 1980'den beri aktif filtreler geliştirilmektedir. AGF' ler, harmonik akımları kompanze etmekte ve zamanda gerilim dengesizlikleri ve gerilim düşmelerinde de kullanılmaktadır [3,5].

AGF' leri, doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonikleri, kullanılan kondansatörle, aynı genlikte ters yönde işaret üreterek, oluşan harmoniğin bastırılması yöntemini kullanır.

Şekil 3.2' de AGF' sinin temel yapısı gösterilmiş, oluşan harmoniğin durumuna göre anahtarlama elemanlarından T1-T4 iletimde iken T2-T3 kesimde, T2-T3 iletimde iken T1, T4 kesimde olur.



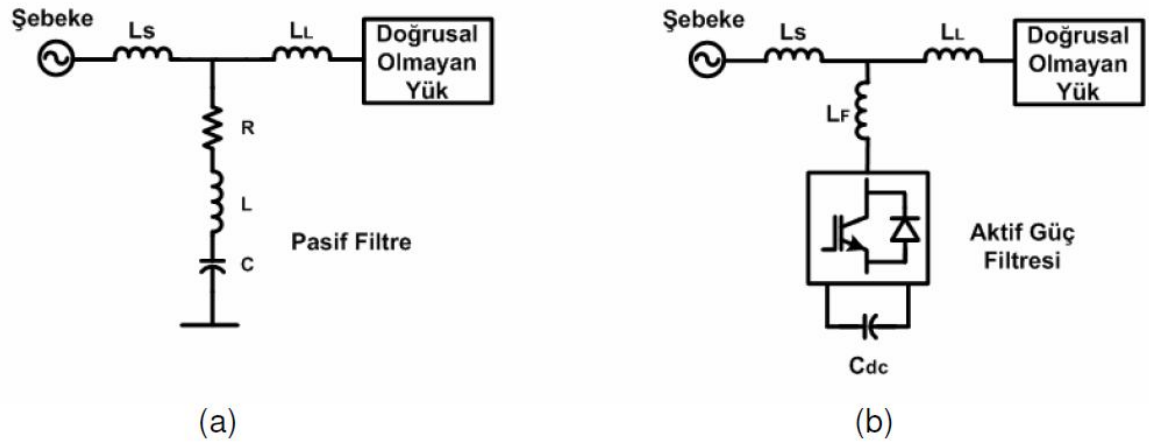
Şekil 3.2. AGF' sinin temel şeması

3.2.1. Aktif güç filtrelerinin yapıları ve kullanım alanları

AGF' si, geniş kapsamlı bir terim olup, güç yarı-iletkenleri ile reaktör ve kondansatör gibi enerji depolayan pasif devre elemanlarının birlikte çalıştığı güç elektroniği devrelerini içerir. DC devrelerinde bulunan kondansatör veya reaktör üzerinde oluşturulan gerilim veya akımı yarı-iletken anahtarları vasıtasıyla anahtarlayan AGF'leri, oluşturdukları gerilim veya akımı alternatif akım şebekesine ileten güç elektroniği eviricileridir.

AGF' leri; akım ve gerilim harmoniklerinin filtrelenmesi, reaktif güç kompanzasyonu, geriliminin ayarlanması, küçük gerilim dalgalanmalarının önlenmesi, akım ve gerilim dengesizliklerinin giderilmesi gibi güç kalitesi probleminin çözümünde çeşitli aktif güç filtresi topolojileri ile kullanılmaktadırlar.

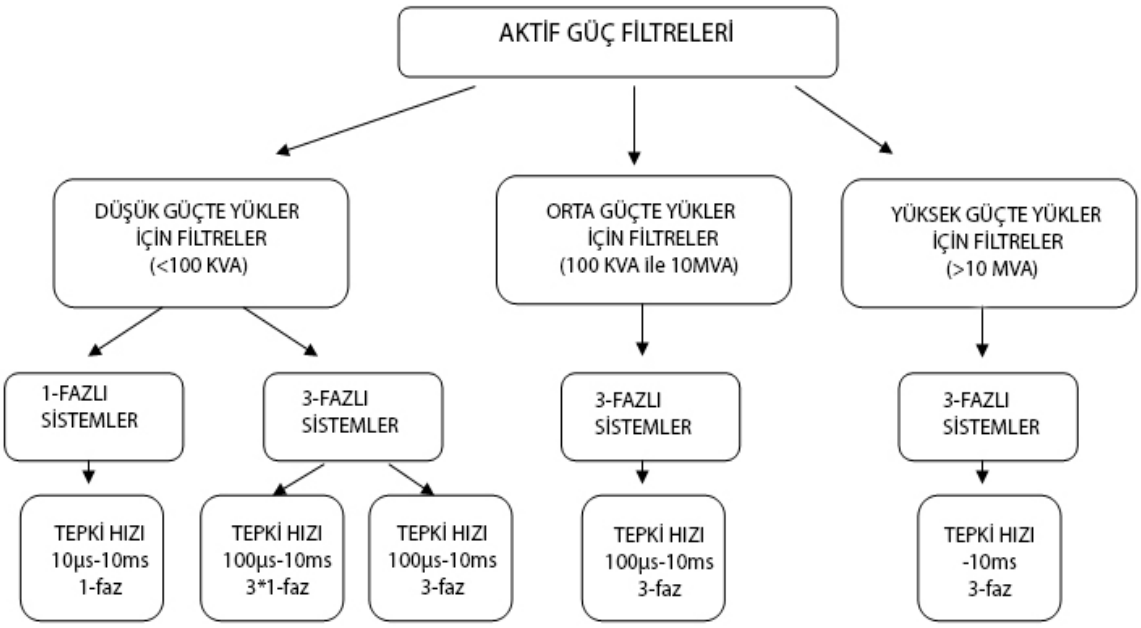
AGF' lerinin, şebeke empedansı ile paralel rezonans riski taşımamaları, AGF ile sağlanacak kompanzasyonun, PGF gibi sabit değil, değiştirilebilir olması, elenecek harmoniklerin PGF' lerde olduğu gibi birkaç frekans ile sınırlı değil belirli seviyeye kadar olan frekansları kapsayacak nitelikte olması AGF' lerini ön plana çıkarmaktadır. Şekil 3.3' de en sık kullanılan paralel sönümsüz ikinci dereceden bir PGF ile gerilim kaynaklı PAGF' sinin elektrik sistemine bağlantıları, blok şema olarak gösterilmiştir [11].



Şekil 3.3. (a) Pasif filtre **(b)** Aktif güç filtresi genel yapıları [11].

3.2.2. Aktif güç filtrelerinin tepki hızlarına ve gücüne göre sınıflandırılması

AGF' leri çekilen kilovolt amper (KVA) değerlerine göre sınıflandırılırlar. Şekil 3.4' de, 100 KVA altında ise düşük güçte olan yükler için, 100 KVA ile 10 MVA arasında ise orta güçte olan yükler için, 10 MVA üstünde ise yüksek güçte olan yükler için filtreler kullanılır.



Şekil 3.4. Aktif güç filtrelerinin tepki hızlarına ve gücüne göre sınıflandırılması [12].

3.2.2.1. Düşük güç uygulamaları

Düşük güçteki uygulamalar genellikle 100 KVA' in altındaki güç oranlı sistemlerle ilgilidir. Bunlar daha çok konaklama alanları, ticari binalar, hastaneler ve orta derecede fabrika gibi yüklerde ve motor sürücü sistemleriyle alakalıdır. Bu ölçekteki uygulamalar dinamik aktif filtrelerin karmaşık tekniklerini yürütür. Özelliklede yüksek darbe genişlik modülasyonlu işaretlere sahip, voltaj ve akım kaynaklı çevirici inverterlerde tepki zamanları diğer uygulamalardan daha hızlıdır. Mikro saniyelerden milisaniyelere kadar değişen, güç tüketimini önemli ölçüde azaltan uygulamalardır. Bu tür uygulamalar tek fazlı ve üç fazlı AGF' ler olmak üzere iki türden oluşur.

3.2.2.1.1. Tek fazlı sistemler

Tek fazlı AGF' ler genellikle düşük güç oranlarındaki sistemlere uygulanır. Bu uygulamalar, genel olarak akım harmoniklerinin oluştuğu küçük fabrikalar, ticari yerler, eğitim veren binalar gibi bilgisayar yükünün olduğu yerlerde uygulanır. Böylece düşük güç filtresi adı geçen dağıtım noktalarına ayrı ayrı konularak, merkezi dağıtım noktasına yüksek güç filtresinin konulmasına ihtiyaç kalmadan kullanılır. Düşük güç filtrelerinin ayrı ayrı noktalara kurulmasının, yüksek güçteki filtrenin merkezi dağıtım noktasına kurulmasına kıyasla, tek bir binada tek fazlı yüklerin çok sayıda olması ve tek hatta yüksek miktardaki harmoniklerin zararlı sonuçlarından dolayıdır. Öte yandan yerleşim yeri yükleri, büyük ölçüde harmoniklere yol açmamaktadır. Tek fazlı AGF' lerinin en büyük avantajı düşük güçte ve yüksek frekansta çalışmasıdır.

3.2.2.1.2. Üç fazlı sistemler

Üç fazlı uygulamalar için filtre yada konfigürasyon seçeneği üç fazlı yüklerin dengede olup olmadığına bağlıdır. Düşük güç seviyelerinde (100 KVA) üç fazlı sistem, üç-tek faz ya da bir-üç fazlı sistemleri telafi edebilen cihazlar kullanılabilir. Dengeli yükler için tek-üç faz çevirici konfigürasyonu kullanılır. Eğer her fazda akım veya gerilimi dengelemeye gerek yoksa her fazdaki açıların ve büyüklüklerin aynı olduğu düşünülerek, mümkün olduğunca daha fazla harmoniği ortadan kaldırmak amacıyla bu durum kabul edilebilir.

3.2.2.2. Orta güç uygulamaları

Bu kategoride 100 KVA'den 10 MVA'e kadar olan güçler için kabul edilir ve üç faz sistemleri ele alınmıştır. Faz dengesizliğinin etkisinin az çok göz ardı edilebildiği etkilerin olduğu orta voltajdan, yüksek voltaja kadar olan dağıtım sistemleri ve yüksek güç yüksek voltaj sürücü sistemleri bu sınıflandırmanın içerisine girer. Buradaki asıl amaç akım harmoniklerini yok etmek veya azaltmaktır.

3.2.2.3. Yüksek güç uygulamaları

Yüksek güçteki yüklere, dinamik filtrenin uygulanmasının maliyeti oldukça fazladır. Çünkü benzer güçteki yüklerin akım akışını kontrol edecek frekansta anahtarlamaların bulunmayışı ve orta güçte birkaç KVA yükleri kaldıracak yarı iletken malzemeler bulunmakta olmasına rağmen birkaç yüz KVA deki yüksek güçte anahtarlamaların mevcut olmamasıdır. Bu anahtarlamalarda seri ve paralel kombinasyonlar mevcuttur fakat uygulaması hem zor hem de maliyeti fazladır. Neyse ki yüksek güçteki yüklerin oluşturduğu harmonik bozulmalar (>10 MVA) düşük güç uygulamalarındaki gibi bir problem oluşturmaz. Yüksek güç sistemlerindeki AGF' lerinden birisi de birkaç AGF' nin paralel kombinasyonunu kullanan Japon hızlı treni uygulamasıdır [12].

3.3. Pasif Güç Filtresi İle Aktif Güç Filtrenin Karşılaştırması

AGF, devreye bağlandığı noktadaki akımı ölçerek, içeriğindeki güç elektroniği devresi ile tespit ettiği harmoniğin tam ters işaretlisini kendi tetikleme devresi ile üreterek sisteme enjekte eder.

Pasif harmonik filtreler ekonomik bir çözüm olmakla birlikte, çok yer kaplamaları, sabit bir kompanzasyon imkanı sunmaları, performanslarının şebeke empedansına bağlı olması ve en önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturmaları gibi belirgin dezavantajlar sunmaktadır. Güç kalitesindeki bozulmanın giderek artması ve PGF' lerin bu olumsuz yönleri harmoniklerden kaynaklı problemlerin giderilmesinde aktif çözümlere olan ilgiyi artırmıştır [14]. Tablo 3.1' de AGF ve PGF' nin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.1. Pasif ve aktif filtrenin karşılaştırılması [14].

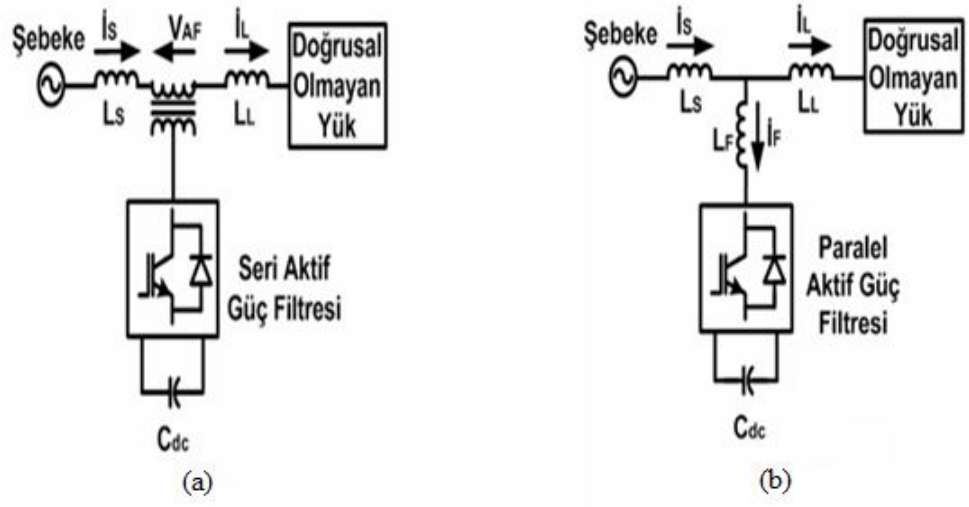
KONU	PASİF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonik akımlarının kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister	Aynı anda birçok harmonik akımının kontrolü mümkündür
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Filtrenin etkinliği azalır	Etkilenmez
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkilenmez
Akım yükselmesi riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır	Aşırı yüklenme riski yoktur
Sisteme yeni yük ilave edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Sistemdeki temel dalganın frekans değişimi	Ayarlanması mümkün değil (değiştirilmesi gerekir)	Ayar ile uyum mümkün
Boyutlar ve ağırlık	Harmonik genliğine ve derecesine göre çok değişken	Oldukça küçük
Maliyet	İlk maliyet düşük, orta vadede bakım maliyetleri yüksek	İlk maliyet yüksek, orta vadede bakım maliyetleri yok.

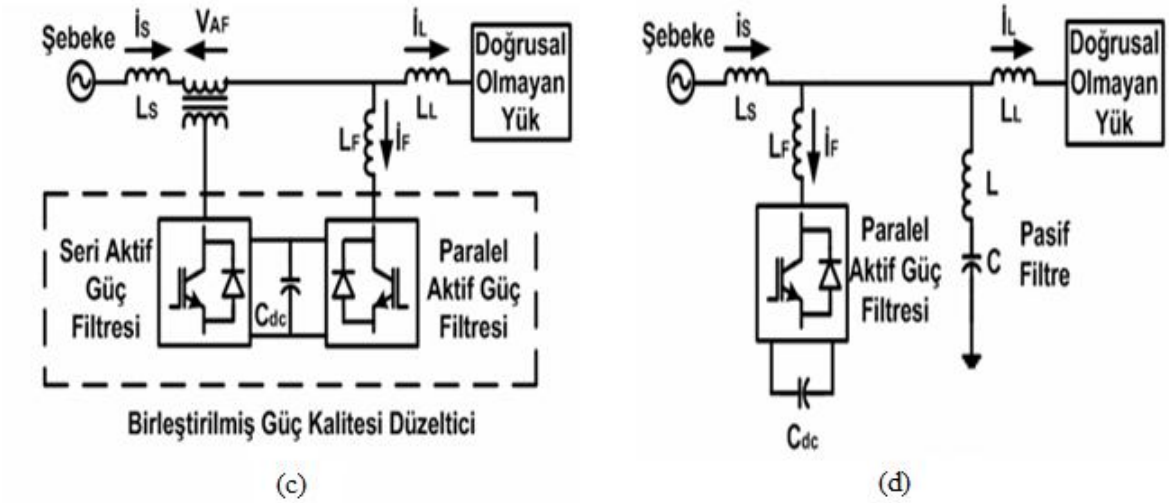
4. AKTİF GÜÇ FİLTRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde; AGF' lerinde kullanılan topolojiler ve bunların eviricilerde kullanılan güç devresi yapılarına göre sınıflandırılması yapılmıştır. AGF' leri yapıları itibariyle seri, paralel, bunların bir arada kullanımıyla birleştirilmiş, ayrıca pasif ve aktif filtrelerin bir arada kullanımıyla oluşturulmuş hibrid filtreler, olarak sınıflandırılmaktadır. Eviricilerde kullanılan güç devresi yapılarına göre ise gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı filtreler olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.

4.1. Aktif Güç Filtrelerinde Kullanılan Topolojiler

AGF' leri, kullanılan topolojiye göre, seri, paralel, birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici ve hibrid filtreler olarak adlandırılabilir. Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici, seri ve paralel AGF' lerin birlikte kullanılmasıyla, hibrid filtre ise, PGF ve AGF' nin birlikte kullanılmasıyla oluşur. Şekil 4.1' de topolojilerine göre sınıflandırılmış, AGF' lerin basitleştirilmiş devre şemaları görülmektedir [11].



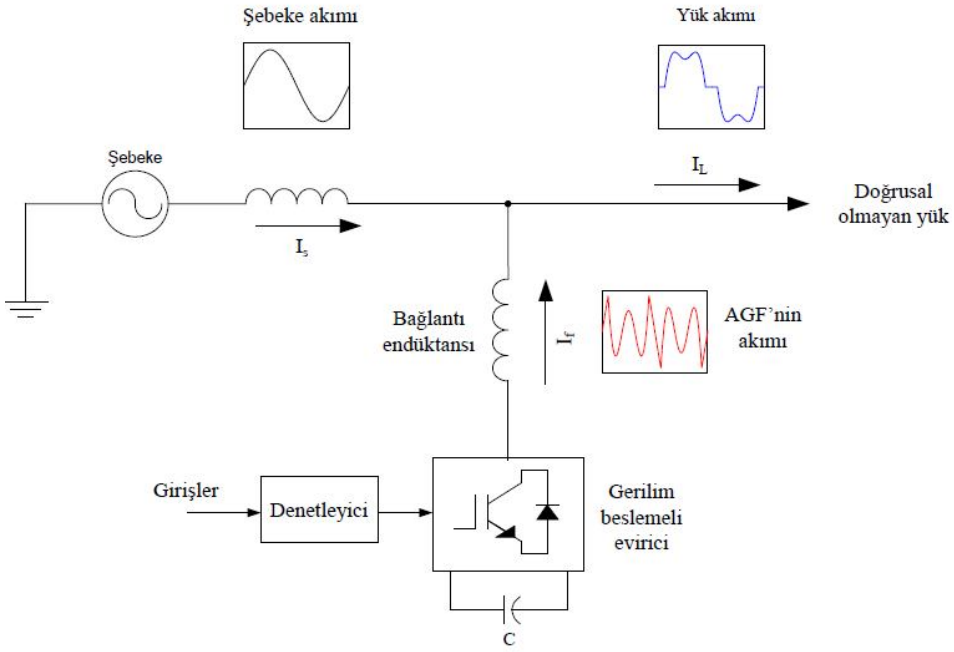


Şekil 4.1. (a) Seri aktif güç filtresi **(b)** Paralel aktif güç filtresi **(c)** Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici **(d)** Hibrid filtre [11].

4.1.1. Paralel aktif güç filtreleri

AGF' sinin, çalışma prensibi Sasaki ve Machidal tarafından açıklanmıştır [15]. AGF' si yükün çektiği harmonik akıma eşit genlik fakat zıt fazda akımlar oluşturarak şebekeye gönderir. Böylece şebekeden çekilen akımın harmoniksiz bir şekilde yaklaşık olarak sinüzoidal yapıda olması sağlanır.

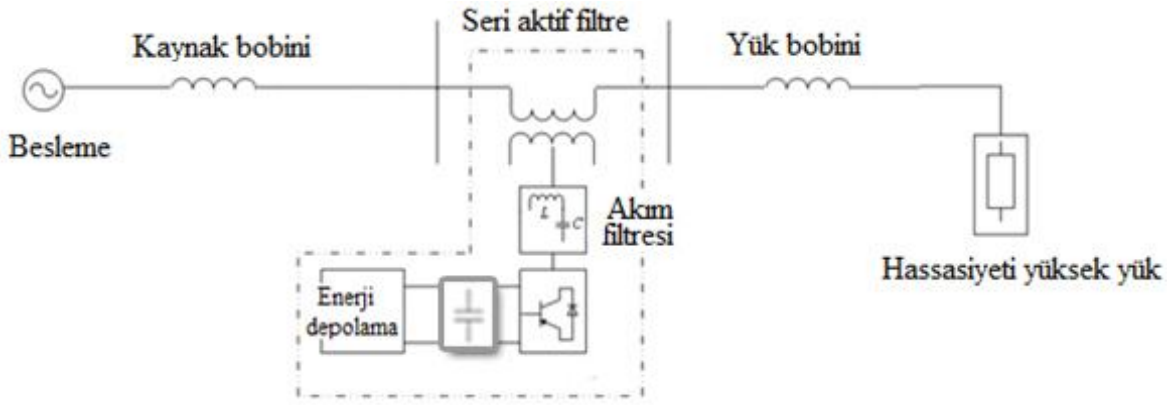
PAGF' si, yapısı AF uygulamalarında en yaygın kullanılan yapıdır. Şekil 4.2' de AGF' sinin blok şeması verilmiştir. Burada PAGF' si, bir evirici, eviriciye DC-hat gerilimi sağlayan bir kondansatör, eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı ve güç anahtarlarının denetimi için bir denetleyici biriminden oluşmaktadır [2].



Şekil 4.2. PAGF'nin tek hat diyagramı [2].

4.1.2. Seri aktif güç filtreleri

Harmoniklere karşı aşırı duyarlı cihazlar ile reaktif güç isteği çok ani değişen cihazların endüstride aynı anda kullanılma zorunluluğu, daha iyi kompanzasyon yapabilecek yeni tasarımları gerektirmektedir. Alternatif akımda doğrusal olmayan yükler, sabit ve değişken güç katsayılı olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu yüklere, birincisi için akımı sabit tetikleme açısıyla denetlenen triyak denetimli omik bir yük, ikincisi için ise, bir akü şarj devresi örnek olarak verilebilir. Akım yada gerilimi anahtarlamalı güç elektroniği devre elemanları ile denetlenen diğer yüklerde bu yüklere benzer özellik göstermektedirler. SAGF' leriyle, reaktif güç kompanzasyonu yapılırken, tepki hızlarının çok yüksek olması nedeniyle aynı zamanda harmonikler de filtre edilebilmektedirler. . SAGF' lerinin verimlerinin yüksek oluşu, güç katsayısının 1'e çok yakın bir değerde tutulabilmesi, doğrusal olmayan yüklerde kullanılabilmeleri ve akımın tam bir sinüs dalgasına benzetilebilmesi kullanımda tercih nedeni olmaktadır [5].



Şekil 4.3. Seri aktif güç filtresinin şematik diyagramı [8].

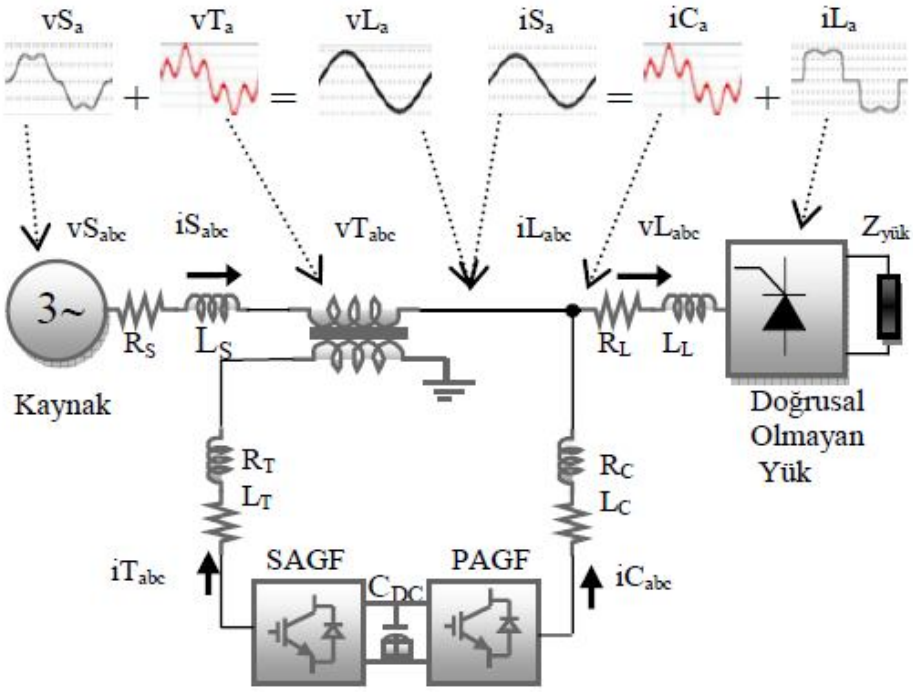
Şekil 4.3' de SAGF' si görülmektedir. Kaynak ve yük arasına seri bir şekilde filtre yerleştirilmiştir. Enerji depolama elamanı kullanılarak filtreleme işlemi gerçekleşmiştir [8].

4.1.3. Birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici

Birleşik güç kalite düzenleyicisi ilk olarak Birleşik Güç Akış Denetleyicisi adıyla Gyugyi tarafından 1992'de ortaya atılmıştır [16]. SAGF ve PAGF' sinin birleşimi olan birleştirilmiş güç kalitesi düzeltici (UPQC) ise 1995'de Akagi [17] ve 1998'de Fujita ve Aredes [18, 19] tarafından önerilmiştir. Bununla birlikte UPQC sistemi yapı olarak benzer olmakla birlikte amaç işletim ve denetim açısından birleşik güç akım denetleyici (BGAD)' den oldukça farklıdır.

Birleşik güç kalite düzenleyicisi, SAGF' si ile PAGF' sinin birlikte kullanılması ile oluşturulmuş filtre sistemidir. AGF' lerinin, en gelişmiş ve en yeni uygulaması olan birleşik güç kalitesi düzenleyicisinin temel işlevi; IEC 61000-4-30 "Electromagnetic compatibility (EMC)" standardında tanımlanan güç kalitesi bileşenlerinin frekans, kaynak gerilim büyüklüğü, fliker, kaynak gerilimindeki çukur ve tepeler, gerilim kesilmeleri, geçici rejim gerilim bileşenleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler, gerilim harmonikleri, gerilim ara harmonikleri, kaynak gerilimindeki ana sinyal gerilimi, hızlı gerilim değişiklikleri, ölçümdeki alt ve üst değişim parametrelerinin düzeltilmesidir. Şekil 4.4'de birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok diyagramı verilmektedir.

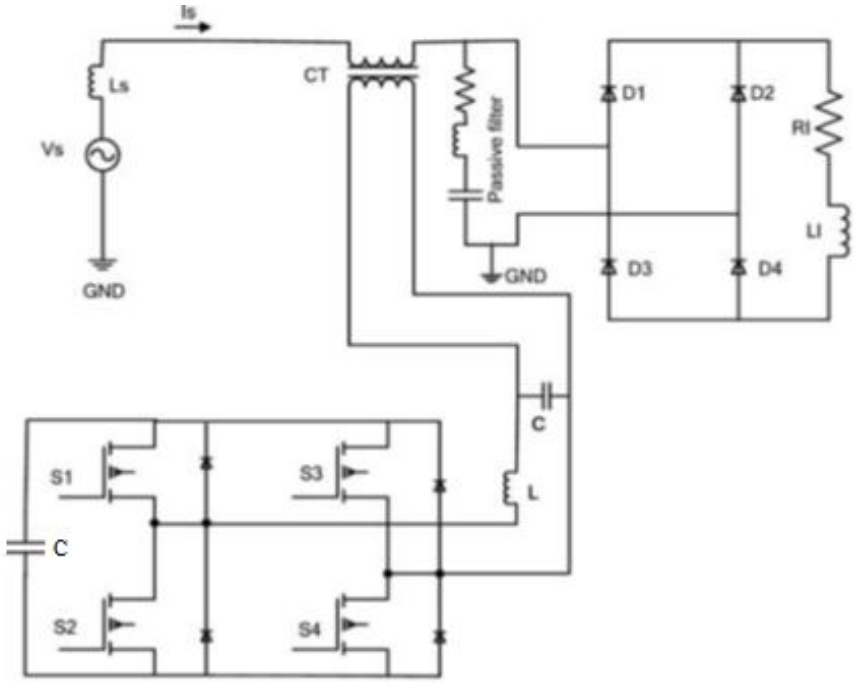
Şekilden anlaşılacağı gibi UPQC ortak bir DC hattını kullanarak şebekeye seri olarak bağlanmış gerilim kaynağı olarak çalışan SAGF' si ve yüke paralel bağlanmış akım kaynağı olarak çalışan PAGF sistemlerinin birlikte kullanılması ile oluşmaktadır [13].



Şekil 4.4. Birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok şeması [13].

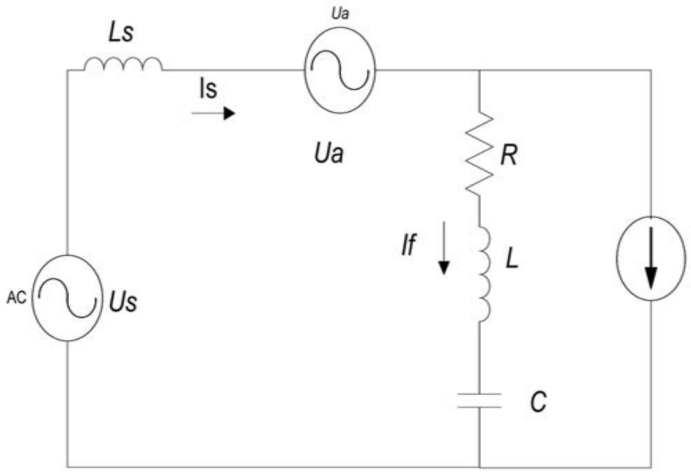
4.1.4. Hibrid aktif güç filtreleri

Hibrit filtre (HF), pasif ve aktif filtrelerin birlikte kullanıldığı topolojiye denilmektedir. Seri aktif filtre (SAF) ve paralel pasif filtre (PPF), paralel aktif filtre (PAF) ve PPF veya PPF' ye seri bağlı AF ile oluşturulanlar gibi çeşitli yapılarda HF' ye rastlamak mümkündür. HF' ler, harmoniklerin elenmesinden gerilim ayarlanmasına, dengesizliklerin giderilmesinden doğrusal olmayan yük ile şebeke arasında izolasyon oluşturulmasına kadar pek çok yerde kullanılmaktadırlar. HF' ler, birçok fonksiyonun bir arada yapılmasına olanak verdiği için sadece PAGF veya SAGF' si kullanılması yerine tercih edilirler [11].



Şekil 4.5. Hibrid aktif güç filtresi devresi [16].

Şekil 4.5 devre konfigürasyonunda, RL(direnç ve bobin) yükü ve buna bağlı doğrultucu olarak kullanılan köprü diyot bağlantısı, yükün girişine bağlı RLC pasif güç devresi ve hat üzerine seri olarak bağlı AGF trafosu bulunmaktadır. Topolojinin eşdeğer devresi ise şekil 4.6' da görünmektedir [20].



Şekil 4.6. Hibrid aktif güç filtresi blok şeması [20].

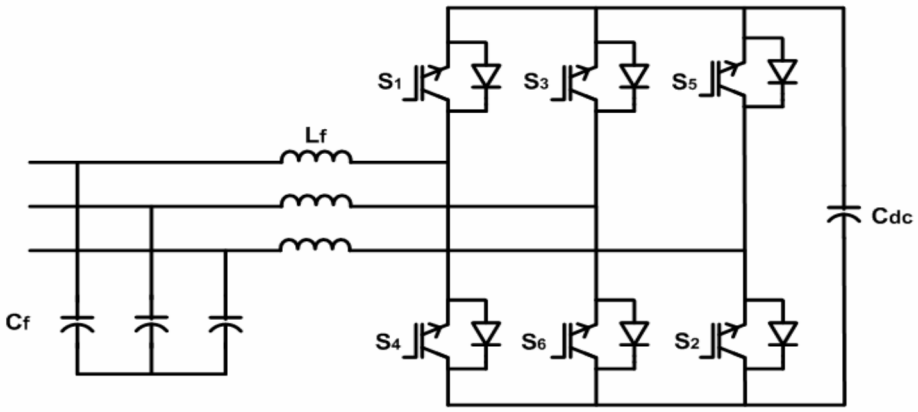
4.2. Eviricide Kullanılan Güç Devresi Yapılarına Göre Aktif Güç Filtreleri

AGF' leri, eviricilerde kullanılan güç devresi yapılarına göre ikiye ayrılmaktadır. DC bağda kullanılan depolama elemanına göre, reaktör veya kondansatör, akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı aktif güç filtresi olarak adlandırılırlar.

AGF' leri doğru akım taraflarında DC kaynağa ihtiyaç duymazlar çünkü AC tarafından eviricideki kayıpları sağlayarak sabit bir DC hat akımına veya gerilimine ulaşacak şekilde temel akım bileşeni çekerek kontrol edilirler.

4.2.1. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi

DC hatlarında depolama elemanı olarak DC kondansatör bulunan gerilim kaynaklı AGF' leri şebekeye filtre reaktörü, L_f, üzerinden bağlanırlar. Yapısı şekil 4.7' de verilen gerilim kaynaklı AGF' si, altı adet kontrollü yarı-iletken anahtar ve bunlara anti-paralel bağlı diyotlardan oluşmaktadır.



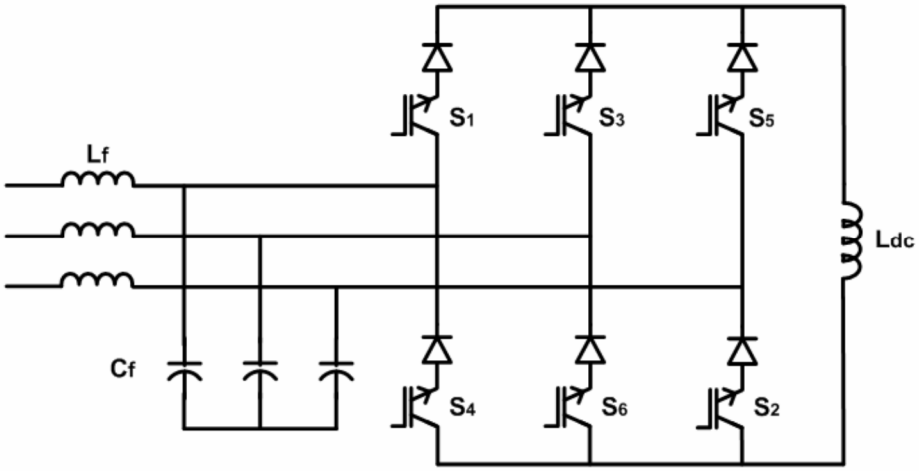
Şekil 4.7. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi devre yapısı [11].

4.2.2. Akım kaynaklı aktif güç filtresi

AF girişinde kullanılan giriş filtre reaktörü (L_f), öncellikle AF akımlarının kontrol edilebilirliğini sağlar. Ayrıca, girişte kullanılan reaktör ve kondansatör (C_f) vasıtasıyla eviricinin 7777kendisinin ürettiği yüksek frekans bileşenlerin bastırılması da sağlanmaktadır.

DC hatlarında depolama elemanı olarak reaktör bulunan akım kaynaklı AGF' leri şebekeye ikinci dereceden alçak geçirgen bir filtre (L_f-C_f) üzerinden bağlanırlar. Yapısı

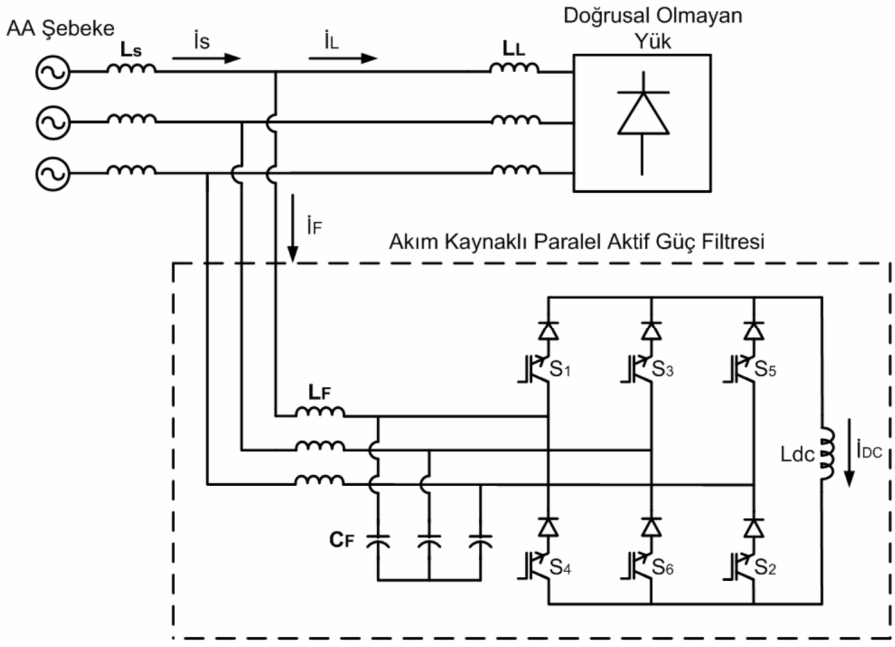
şekil 4.8’ de verilen akım kaynaklı AGF’ si altı adet kontrollü yarı-iletken anahtar ve bunlara seri diyotlardan oluşmaktadır. Yarı iletkenler DC hat akımına ve DC hat akımının anahtarlamasından oluşan çift kutuplu gerilime dayanacak değerlere sahip olmalıdırlar. AF girişinde kullanılan L_f - C_f tarafından oluşturulan ikinci dereceden alçak geçirgen PF üretilen yüksek frekans anahtarlama bileşenlerinin bastırılmasını sağlamaktadır [11].



Şekil 4.8. Akım kaynaklı aktif güç filtresi devre yapısı [11].

4.2.2.1. Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtrelerinin Genel Özellikleri

Akım kaynaklı PAGF’ leri, akım kaynaklı çeviricilerin doğrudan, akım anahtarlama, yüksek güvenirlik ve hızlı tepki süreleri gibi özellikleri ile PAGF’ lerinin, harmonik filtreleme ile reaktif güç kompanzasyonunu bir arada yapabilme özelliklerini taşıyan, altı adet yarı-iletken anahtar ve bu anahtarlara seri diyotlar ile tek yönlü akım taşıyan eviricilerdir. Evirici, şebekeye karşı basmaya çalıştığı akımı bir akım kaynağı, reaktör, üzerinden oluşturduğu için bu adı almaktadır. Akım kaynaklı PAGF’ leri yükün harmonik ve/veya reaktif akım bileşenlerini sağladığı için akım kaynağı olarak da değerlendirilebilir. Harmonik akım üreten yük olarak diyot köprü doğrultucu kullanılan AC elektrik şebekesine Akım kaynaklı AGF’ sinin bağlanması ve filtrenin güç devresi yapısı şekil 4.9’ da gösterilmektedir. Burada akım kaynaklı eviricinin, yük tarafından üretilen temel akım bileşeni haricindeki rastgele akım dalga şekillerini en az gecikmeyle üretmesi ve şebekeye basması beklenmektedir [11].



Şekil 4.9. Şebekeye paralel bağlı akım kaynaklı aktif güç filtresi [11].

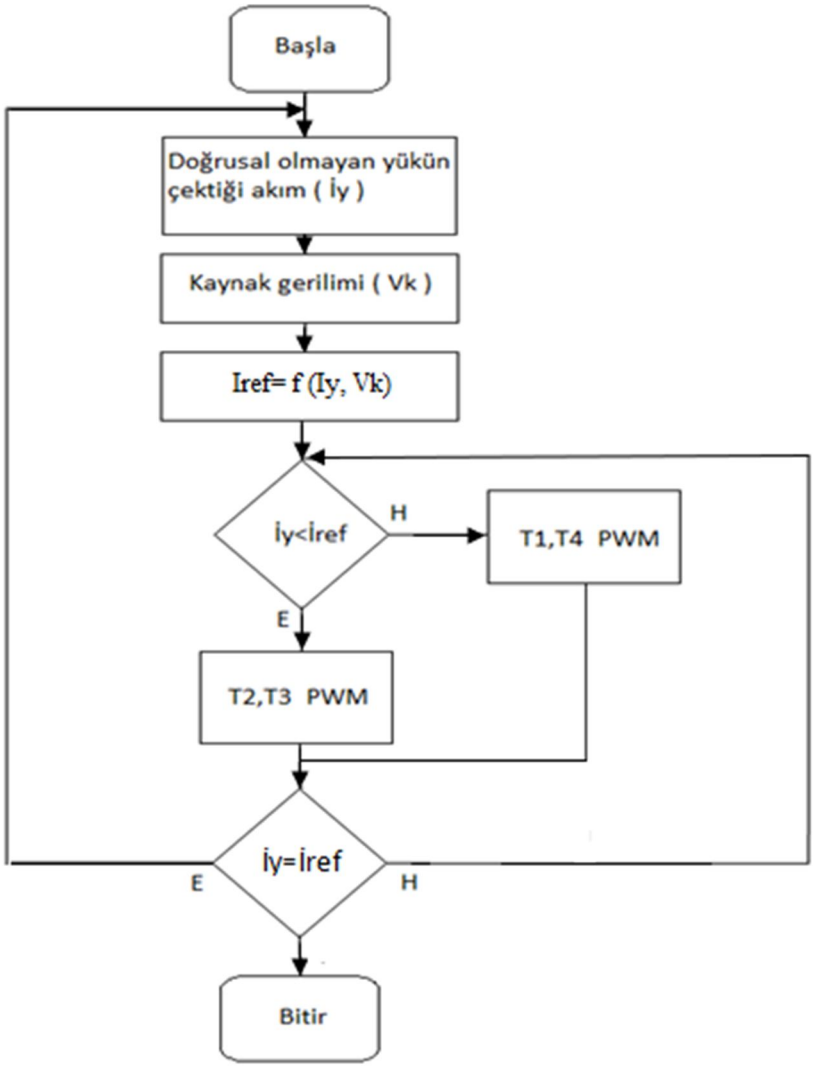
Akım kaynaklı AGF' sinde DC, hatta oluşturulacak akımın sürekliliğinin sağlanması için herhangi bir anda, eviricinin üst kolundaki anahtarlardan yalnızca bir tanesi ve alt kolundaki anahtarlardan yalnızca bir tanesi eş zamanlı olarak devrede olmalıdır [21].

Akım kaynaklı eviricide yarı-iletken anahtarlara seri diyotlar kullanılması, ters gerilim tutma özelliği olmayan anahtarların izole kapılı bipolar transistör (IGBT) diyotları yardımı ile ters gerilim tutmasını sağlamaktadır.

5. BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN MODELLENMESİ

Genel

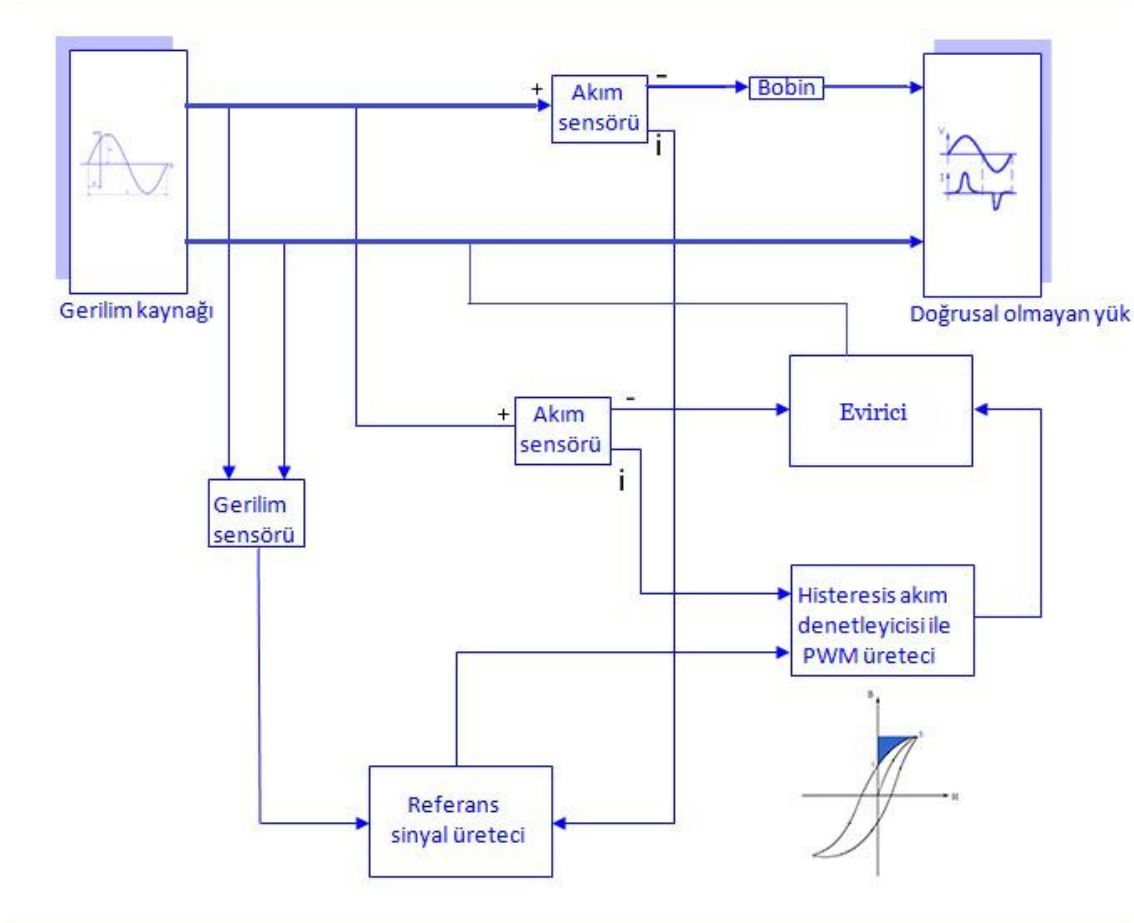
Bu bölümde yüke bağlı olarak, tek fazlı AC kaynaktan çekilen akımda oluşan istenmeyen harmonikleri elimine etmektir. Bu çalışmada, bir fazlı PAGF' si kullanılmış, geriye dönük yapılan çalışmalar incelenmiş ve model yapısı oluşturulmuş olup, her bir ünitenin nasıl bir işlem gerçekleştirdiği ne tür sonuçlarla karşılaşıldığı incelenmiştir. Şekil 5.1' de tasarımı yapılacak olan tek fazlı PAGF modeli akış şeması gösterilmiş olup bu akış şemasına göre devre modellenmiştir.



Şekil 5.1. Tasarlanan bir fazlı PAGF sisteminin akış şeması

5.1. Benzetimi Yapılan Bir Fazlı PAGF Sistem Modeli

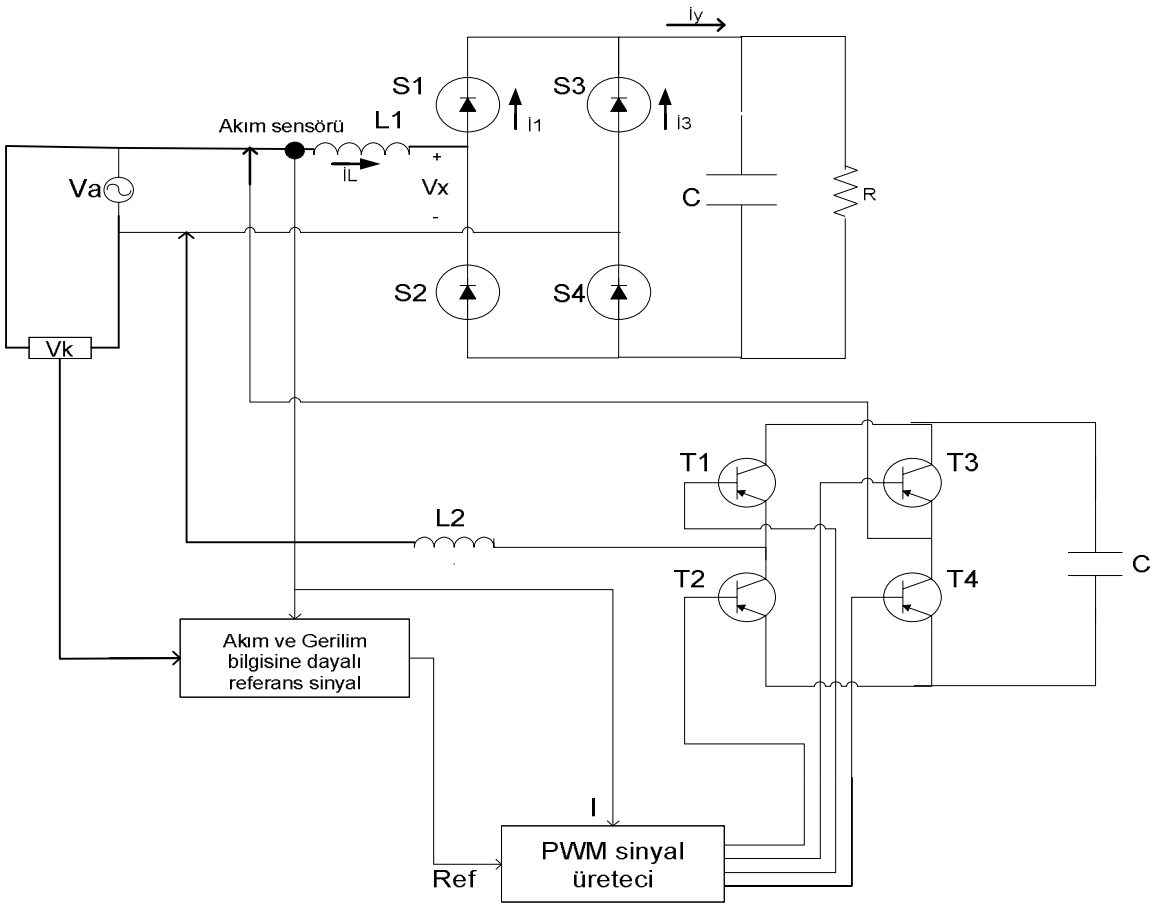
Şekil 5.2'de görülen tek fazlı PAGF' si modelimizde, doğrusal olmayan yüke seri olarak bağlanan akım sensöründen alınan akım bilgisi, filtrenin çekmiş olduğu akımın akım bilgisi ile gerilim kaynağına paralel bağlı gerilim sensöründen alınan gerilim bilgisine bağlı olarak referans sinyal oluşturulmuştur. Böylece sistem tarafından, kaynaktan çekilen gücün, referans sinyale bağlı olarak oluşturduğu harmonikler kontrol edilmiş olur. Doğrusal olmayan yükün oluşturmuş olduğu harmonikli sinyal histerisis akım denetleyicisinde referans sinyalle karşılaştırılır, karşılaştırma sonucu referans sinyalin dışına çıkılan periyotlarda DGM sinyalleri üretilir ve eviricinin anahtarları aktif hale getirilir.



Şekil 5.2. Bir fazlı paralel aktif güç filtresi modeli

5.2. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Modeli

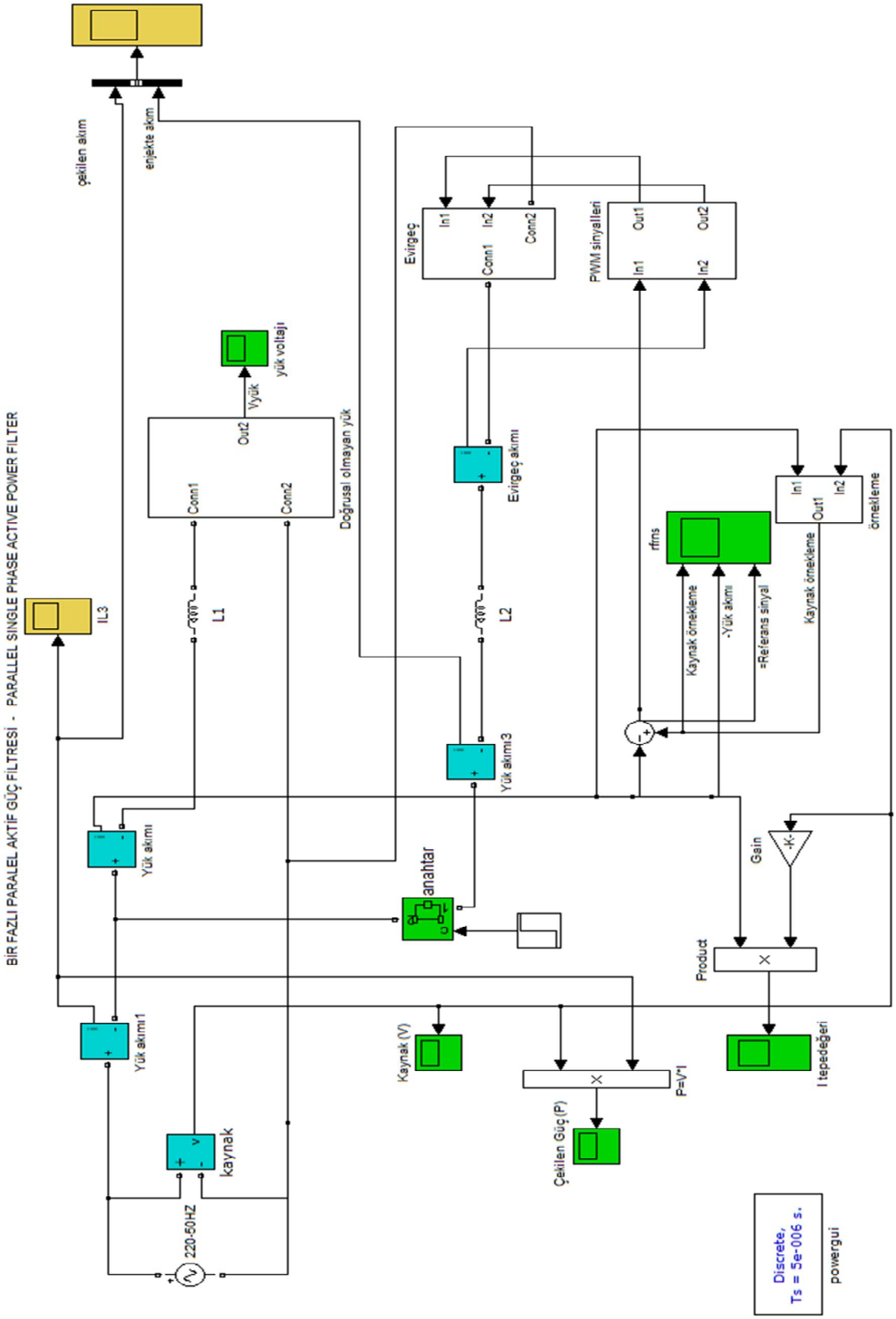
Şekil 5.3' de PAGF' si modelinin şematik görünümü oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan yükü temsilen kondansatör ile direncin birbirine ve sisteme paralel bağlanmasıyla oluşturulmuştur. PAGF' si bloğu anahtarlama elemanlarının durumlarına bağlı olarak şarj-deşarj işlemi gerçekleştiren filtre kondansatörden oluşmaktadır. Doğrusal olmayan yük ve PAGF' sinin önüne akım sınırlandırma bobini konulmuştur.



Şekil 5.3. Tasarlanan bir fazlı PAGF sisteminin şematik gösterimi

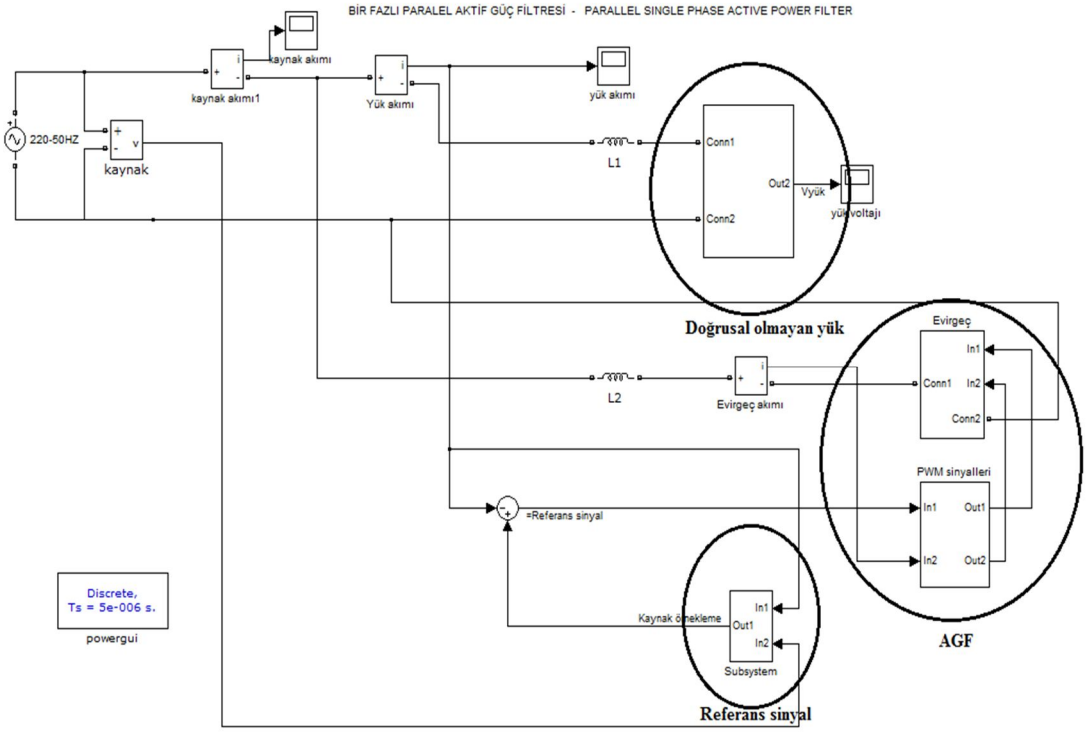
5.3. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Benzetim Modeli

Şekil 5.4' de benzetimi yapılan, bir fazlı PAGF' sinin modeli yer almaktadır. Filtremizi modelledikten sonra modelin temel ünitelerini anlatarak benzetime geçilmiştir.



Şekil 5.4. Bir fazlı PAGF' sinin benzetim modeli

5.4. Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Üniteleri

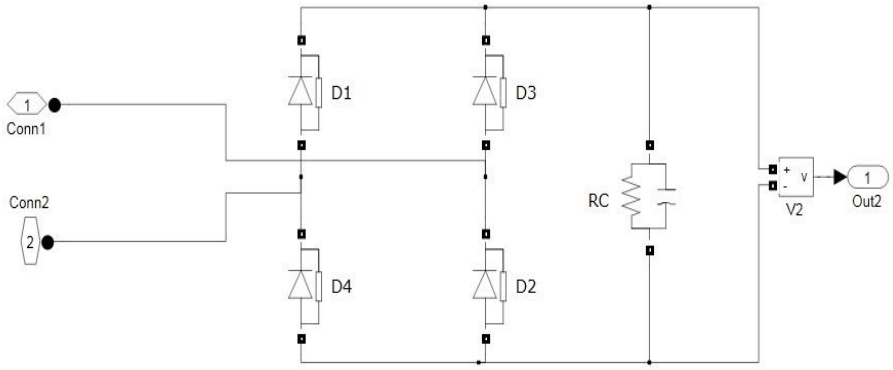


Şekil 5.5. Benzetimi yapılan PAGF' sinin üniteleri

Şekil 5.5' de MATLAB/SIMULINK'de benzetimi yapılan bir fazlı PAGF' sinin ünitelerini incelediğimizde, doğrusal olmayan yükü temsilen oluşturulan doğrusal olmayan yük bloğu, PAGF' sini oluşturan evirici bloğu, DGM sinyal üreteci bloğu ve referans sinyal üreteci bloğundan oluşmaktadır. Benzetimde akımölçerle kaynak akımı, yük akımı ve evirici akımı, gerilimölçerle kaynak gerilimi değerleri kontrol devresinde kullanılmıştır. L_1 ve L_2 bobinleri akım yumuşatma bobini olarak kullanılmış ve doğrusal olmayan yüke ve evirici önüne konulmuştur.

5.4.1. Doğrusal olmayan yük modeli

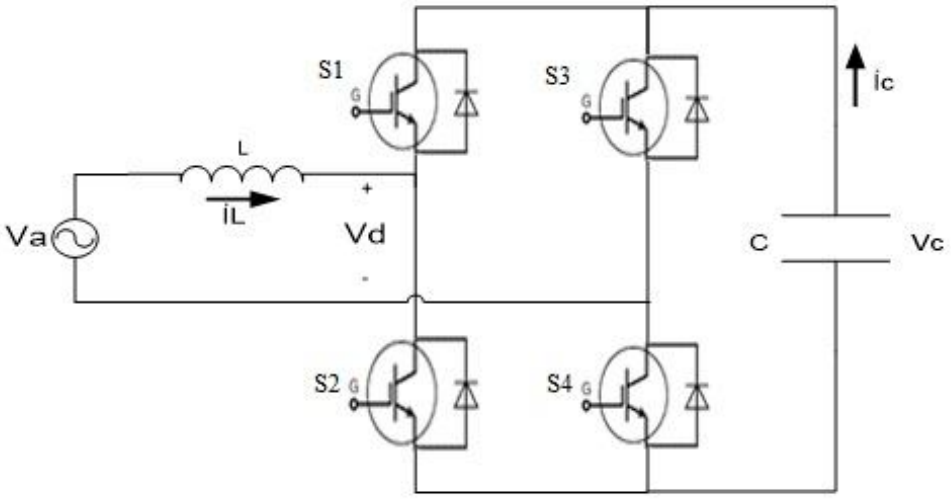
Şekil 5.6' da doğrusal olmayan yük ve giriş uçlarına bağlı denetimsiz bir köprü doğrultucu kullanılmıştır. Doğrusal olmayan yükün MATLAB/SIMULINK' de çekmiş olduğu akımda harmonik oluşturduğu gözlenmiş ve benzetim için ideal bir doğrusal olmayan yük elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Doğrusal olmayan yük

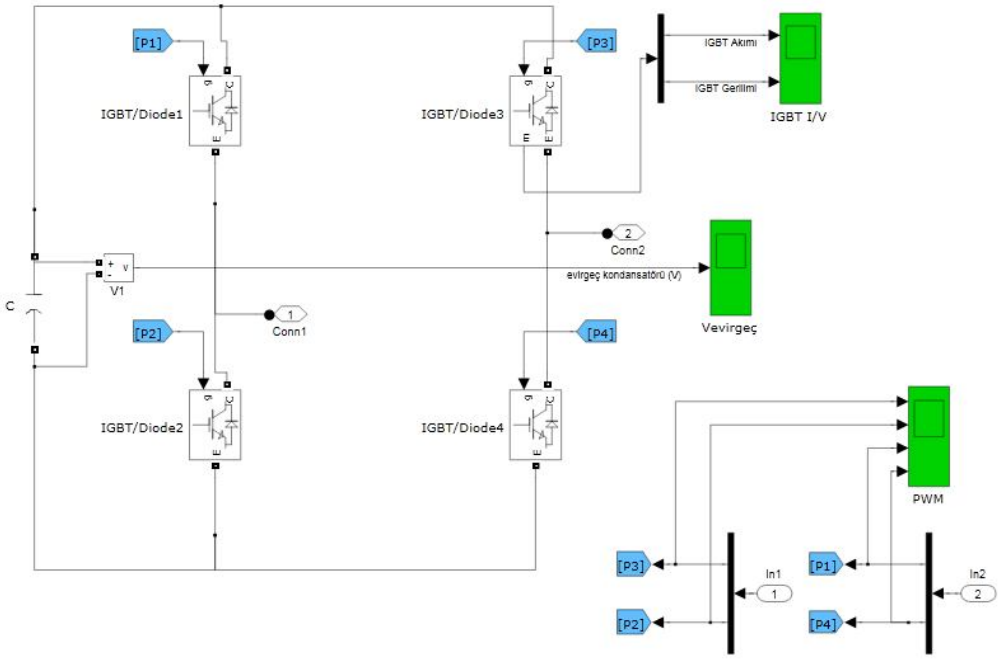
5.4.2. Evirici modeli

Şekil 5.7' de evirici için bir model geliştirilmiş ve bu model AGF olarak kullanılmıştır. S1, S2, S3, S4 anahtarları olarak IGBT' ler kullanılmıştır. Şarj-Deşarj işlemini gerçekleştirmek için ise C kondansatörü kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Evirici blok gösterimi

Şekil 5.8' de ise benzetimi yapılan eviricinin MATLAB/SIMULINK modeli verilmiştir. P1, P4 problarından S1, S4 anahtarına DGM sinyali gönderilirken, P2, P3 problarından ise S2, S3 anahtarlarına DGM sinyali gönderilmektedir.



Şekil 5.8. H' köprü IGBT anahtarlı evirici

5.4.3. Kontrol yöntemi

AGF' lerinin performansını güç devresinin tasarımı kadar etkileyen ikinci unsur kontrol yöntemidir. AGF' ler için kontrol yöntemi iki bölümden oluşmaktadır; referans akımların hesaplanması ve evirici yarı-iletken anahtarları kontrol sinyallerinin üretilmesi. AGF' lerinin, referans akımlarının bulunmasında zaman ve frekans alanlarında çeşitli kontrol yöntemleri mevcuttur. ARGY, SRÇY ve Hızlı Fourier Dönüşümü bunlardan birkaçıdır. Referans akım veya gerilimlerin zaman alanında bulunması yükte meydana gelebilecek değişimlere hızlı tepki vermesi açısından tercih edilen yöntemdir. Frekans alanında ise geçmişe yönelik kaydedilen verinin incelenmesi ile referansların bulunması gecikmeyi de beraberinde getirir. Ayrıca frekans alanında uygulanan yöntemler zaman alanına göre daha fazla hesaplama gerektirmesi bakımından da dezavantajlıdır [22].

Bu bölümde AGF' leri için akım kontrol yöntemleri üzerinde durulmuştur. AGF' lerinde akım denetim yöntemleri açısından, iki ana başlık halinde incelenebilir. İlk bölüm, harmonik kaynağın ürettiği akımı yok etmek ve DC bağ gerilimini istenilen değerde tutmak için üretilmesi gereken akım referansını hesaplama yöntemi, ikinci bölüm ise akım denetim yöntemidir [30].

5.4.3.1. Referans çıkarma yöntemleri

5.4.3.1.1. Fourier Yöntemi

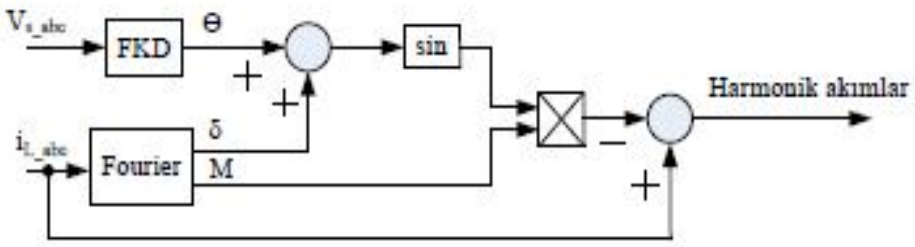
Bu yöntemde; ölçülen yük akımının ana harmoniği, denklem (5.1)' de verilen Fourier serisi ile hesaplanır. Daha sonra yükün çektiği toplam akımdan hesaplanan ana harmonik akımı çıkarılır. Böylece yük tarafından çekilen akımın harmonik bileşeni elde edilir. AF'nin denetimi için gerekli olan referans akım ise yükün çektiği harmonik akıma zıt fazda ve eşit genlikte seçilir. Şekil 5.8' de bu yöntemin prensip şeması gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi üç-faz şebeke gerilimi FKD' sine girilerek şebekenin açısal frekans bilgisi elde edilir. Fourier yöntemi kullanılarak ana harmoniğin faz (δ) ve genlik bilgisi (M) bulunur. Fourier yönteminden elde edilen faz bilgisine FKD' nin çıkışından elde edilen açısal frekans bilgisi eklenerek ana harmoniğin fazı bulunur. Bulunan faz bilgisi genlik değeri ile çarpılarak ana harmonik sinüzoidal formda elde edilir. Ana harmonik toplam yük akımından çıkarılarak harmonik akımlar ve buna bağlı olarak referans akımlar üretilir.

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(i\omega t) + B_i \sin(i\omega t) \tag{5.1}$$

$$A_i = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos(i\omega t)dt \tag{5.2}$$

$$B_i = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin(i\omega t)dt \tag{5.3}$$

şeklinde hesaplanabilir.



Şekil 5.9. Fourier yöntemi ile harmonik akımlarının elde edilmesine ait blok şema [2].

5.4.3.1.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi

Anlık reaktif güç teorisi Akagi [31] tarafından önerilmiştir. Bu teorem üç-fazlı akım ve gerilimlerin denklem (5.4) yardımı ile αβ durağan çatıya dönüştürülmesine dayanır.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

Üç-fazdan iki faza dönüştürülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak yükün çektiği anlık aktif ve reaktif güç miktarı hesaplanır. Eğer şebekeye bağlı olan yük harmonikli bir akım çekiyorsa αβ eksenine göre hesaplanan aktif ve reaktif güç denklem (5.5) ve (5.6)'da gösterildiği gibi hem DC hem de AC bileşene sahip olacaktır.

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \tag{5.5}$$

$$q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \tag{5.6}$$

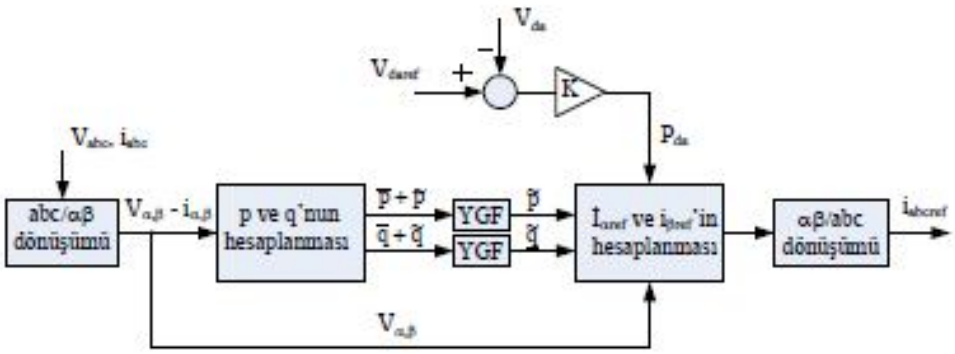
Denklem (5.5) ve (5.6)'da,

$\bar{p}$; şebekeden yüke aktarılan anlık aktif gücün ortalama değerini,

$\tilde{p}$; yük ile şebeke arasında değiştirilen anlık aktif gücün alternatif bileşenini,

q ise anlık reaktif gücü gösterir.

p ve q'nun AC bileşenleri harmoniklerden dolayı meydana gelmektedir. Bu nedenle p ve q'nun AC bileşenleri, yüksek geçiren filtre (YGF) kullanılarak elde edilebilir. Bu teorem sadece üç-fazlı gerilimlerin simetrik ve sinüzoidal olması durumunda geçerlidir. ARGY kullanılarak referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. ARGY kullanılarak referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram [2].

5.4.3.1.3. Senkron Referans Çatı Yöntemi

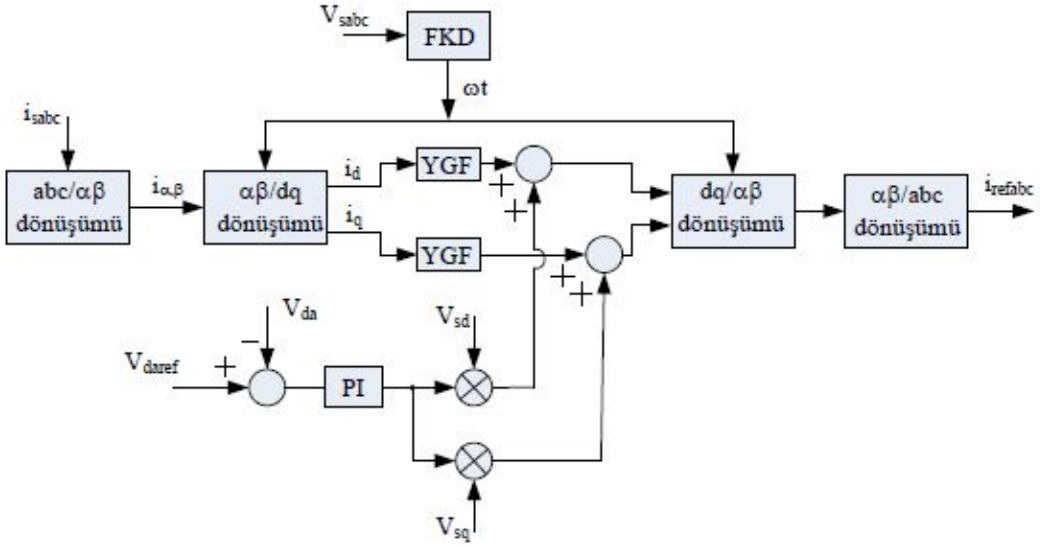
Bu yöntemde, üç-faza ait akımlar park dönüşümü yardımı ile DC değerlere (dq eksen bileşenlerine) dönüştürülür. Böylece YGF ya da alçak geçiren filtre (AGÇF) kullanılarak temel harmoniğin çıkarılması kolaylaşır. Filtre çıkışlarından elde edilen dq-eksen bileşenleri üç-fazlı büyüklüklere dönüştürülerek referans akımlar elde edilir. SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, üç fazlı-şebeke FKD' ye girilerek şebekenin açısal frekans bilgisi elde edilir. Ölçülen üç-fazlı yük akımı (i_{Labc}) denklem (5.2) yardımı ile αβ-eksen bileşenlerine dönüştürülür. αβ-eksen bileşenleri; denklem (5.7)' de verilen Park dönüşüm matrisi ile şebeke hızına kilitlenmiş ve ω hızı ile dönen dq-eksen bileşenlerine dönüştürülür. Böylece yük akımının temel bileşeni DC işaretlere dönüşürken, harmonik bileşenlerin dönme hızları (frekansları) senkron hıza ve dönme yönüne göre kaymaktadır. dq-eksen bileşenlerine dönüştürülen akımlar (i_d ve i_q) denklem (5.8)'de gösterildiği gibi temel ve harmonik bileşen olmak üzere iki terimden oluşur.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

Denklem (5.7)' de, ω şebekenin açısal frekansı, denklem (5.8)' de verilen $\tilde{i}_{d;}$ aktif akımın AC bileşeni, $\bar{i}_d$; akımın DC bileşeni $\tilde{i}_{q;}$ reaktif akımın AC bileşeni ve $\bar{i}_q$ ise reaktif

akımın DC bileşenidir. dq-eksen akımlarındaki AC bileşenler YGF kullanılarak toplam akımdan çıkarılır. Sonuç olarak filtrelenmek istenilen akım harmoniklerinin dq-eksen bileşenleri elde edilmektedir. Bu vektörlere ters Park ve ters Clarke dönüşümleri uygulanarak abc düzleminde referans akımlar üretilmektedir. Ayrıca, da-hat kondansatör geriliminin sabit tutulması için bir Oransal+İntegral (PI) denetleyici kullanılır. Denetleyicinin çıkışından elde edilen işaret YGF' den elde edilen referans akımlara eklenmektedir.



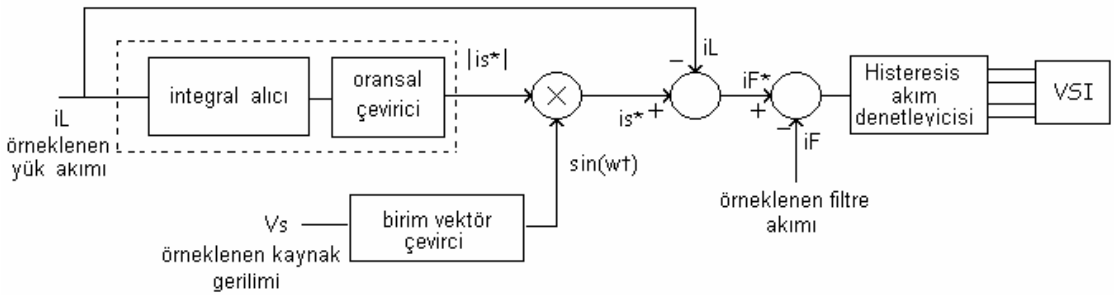
Şekil 5.11. SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram [2].

SRÇY sadece üç-fazlı sistemlere uygulanabilir. Ayrıca bu yöntemde temel bileşenler DC değerlere dönüştürüldüğü için kolaylıkla filtrelenebilir. Hesaplamalar anlıktır fakat filtrelemeden dolayı gecikmeler meydana gelir [2].

5.4.3.1.4. PAGF' si için kullanılan referans akım çıkarma yöntemi

AGF devresinin çalışması esnasında yük akımından (i_L), giriş geriliminden (Vs) 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. Şekil 5.12 Kaynak geriliminin örneklemesinden elde edilen birim sinüs vektör ile bu bulunan tepe değeri çarpıldığında referans kaynak akımı

bulunmuş olur.



Şekil 5.12. AGF'nin kontrol yöntemi [19].

Bulunan referans kaynak akımından, örneklenen yük akımı çıkarıldığında AGF devresinin çekmesi gereken referans filtre akımı bulunur. Histerezis akım yöntemi kullanılarak, AGF' nin referans filtre akımına benzer bir akım çekmesi için eviricinin yarı iletken anahtarlarına uygulanması gereken darbe genişlik modülasyonu (DGM) sinyalleri elde edilir [24].

5.4.3.2. Akım denetim yöntemi

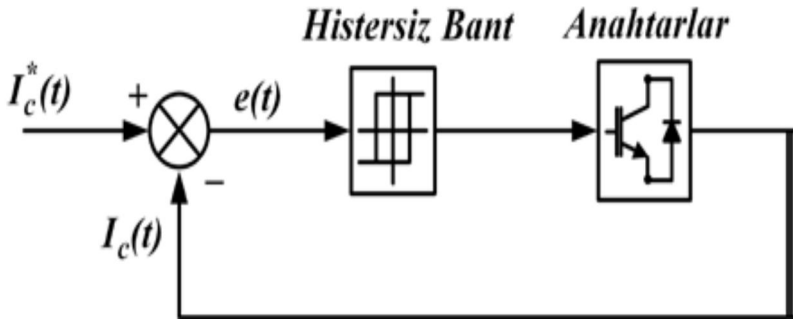
PAGF' lerde köprü eviricinin çıkışındaki akım kontrol edilmektedir. Dolayısıyla kullanılan bu eviriciler akım kontrollü gerilim beslemeli DGM evirici olarak adlandırılır. AGF' si çıkışından istenilen dalga şekline sahip akım almak için akım kontrollü gerilim beslemeli evirici çeşitli metotlarla kontrol edilir. Bunlardan AGF' lerinde, en çok kullanılanları Sinüzoidal DGM, Histerezis bant akım denetimli DGM, Uzay vektör DGM'dir [29].

Pek çok akım denetim yöntemi bulunmasına rağmen, gerek sayısal uygulamaya yatkınlığı gerekse gerçek zamanlı sistemlerde uygulanabilirliği açısından histerezis akım denetim yöntemi ve darbe genişliği modülasyonu akım denetim yöntemi öne çıkan akım denetim şekilleridir. Darbe genişliği modülasyon akım denetim yöntemi uygulama kolaylığı ve sabit frekansta anahtarlama işareti üretilebilmesi açısından en çok tercih edilen PAGF denetim yöntemlerinden biri olmasına karşın literatürde akım denetim yöntemleri için yapılan karşılaştırmalarda histerezis metodunun THB yönünden daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Ayrıca gerilim kaynaklı AGF' lerinde tetikleme sinyallerini bulmak için doğrudan akım referansını kullandığımız tek metot histerezis bant metodudur.

Yani referans akımlar bulunduktan sonra PI denetleyiciden geçirilmesine veya değişik yöntemler uygulanarak gerilime dönüştürülmesine gerek yoktur. Bu avantajlardan dolayı histerezis akım denetim yöntemini kullanılmıştır [25-28].

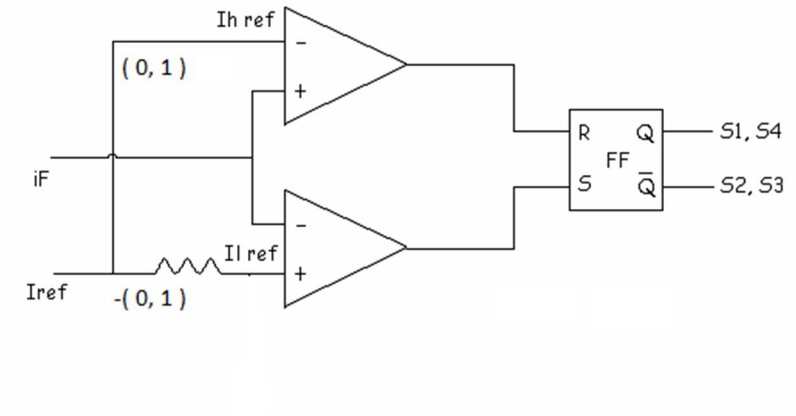
AGF' lerde, anahtarlama sinyalleri üretmek için çeşitli akım kontrol teknikleri kullanılmıştır. Şekil 5.13' de gösterilen referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımının bir histerzis bantta (hb) karşılaştırılarak anahtarlama sinyallerinin üretildiği histerzis kontrol, en çok kullanılan akım kontrol tekniği olmuştur.

Histerzis kontrol tekniği dezavantajlarına karşın, kolay yapısı ile güvenilir sürme sinyalleri üretebilmektedir. Yapılan benzetim ve uygulama çalışmalarında histerzis bant üst sınırı +0,1 histerzis bant alt sınırı -0,1 olarak seçilmiştir [23].



Şekil 5.13. Histerezis kontrol (Hysteresiscontrol) [18].

Şekil 5.14'de iki adet yükselteç, bir gerilim bölücü devre ve bir adet RS flip-flop devresi ile histerezis akım denetleyicisi oluşturulmuştur.



Şekil 5.14. Histerezis akım denetleyicisinin pratikte uygulanması [23].

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

$$fsw(max)= \frac{Vdc}{9hL} \quad (5.9)$$

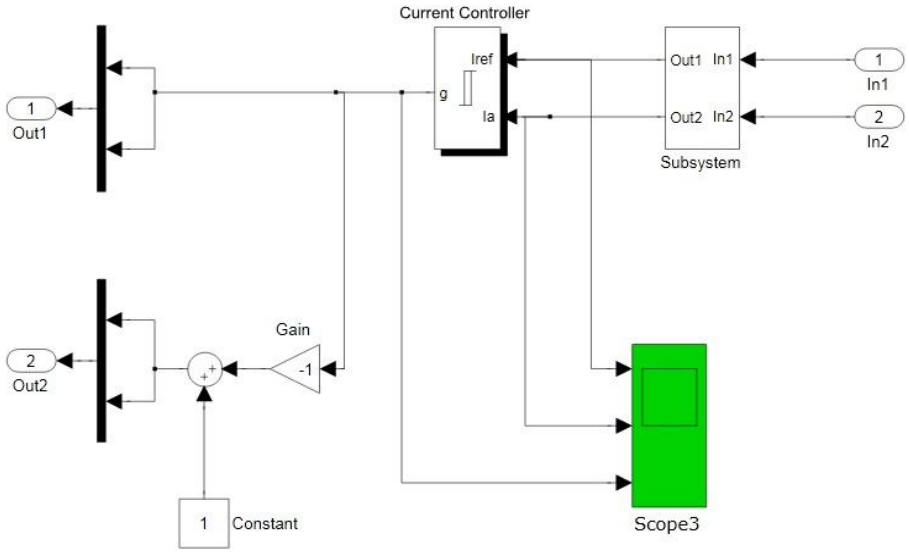
h = histerezis limit

Vdc= eviricideki DC gerilim

L = akımın aktığı bobinin değeri

fsw(max)= Maksimum anahtarlama frekansı

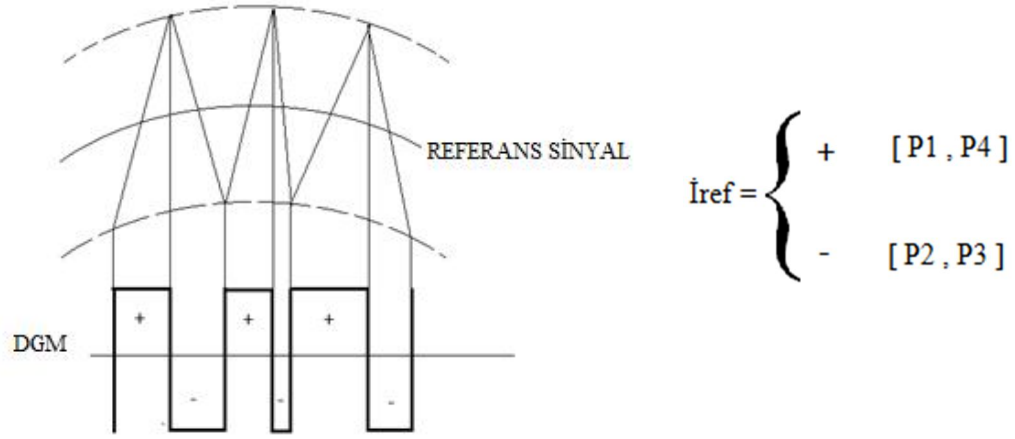
Yüksek anahtarlama frekansı kullanılması akımın histerezis limitlerinin aşmasını azaltır [19].



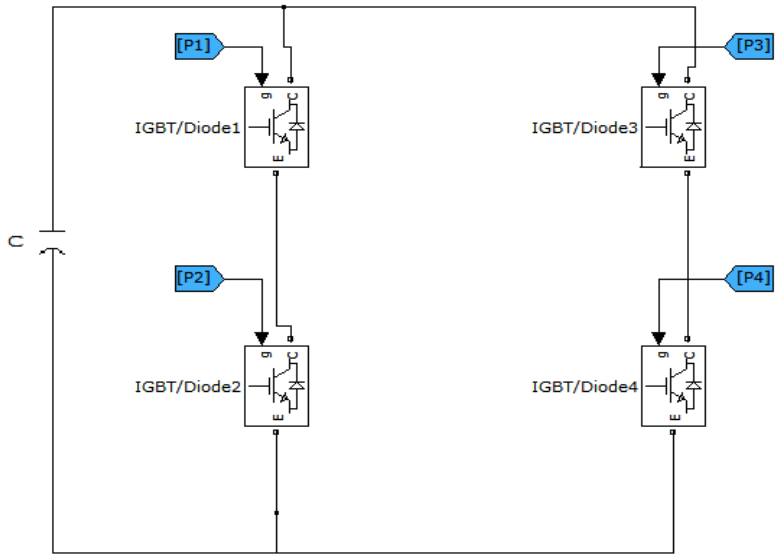
Şekil 5.15. Histerezis akım kontol devresi

Şekil 5.15'de histerezis akım kontrol yöntemi; yükün çekmiş olduğu akımdan gelen akım bilgisi ile referans sinyali karşılaştırılarak DGM sinyali üretir.

Şekil 5.16'da referans sinyal temel alınaraktan, DGM sinyal üretilir ve şekil 5.17'de görünen IGBT anahtarlarını aktif hale getirir.

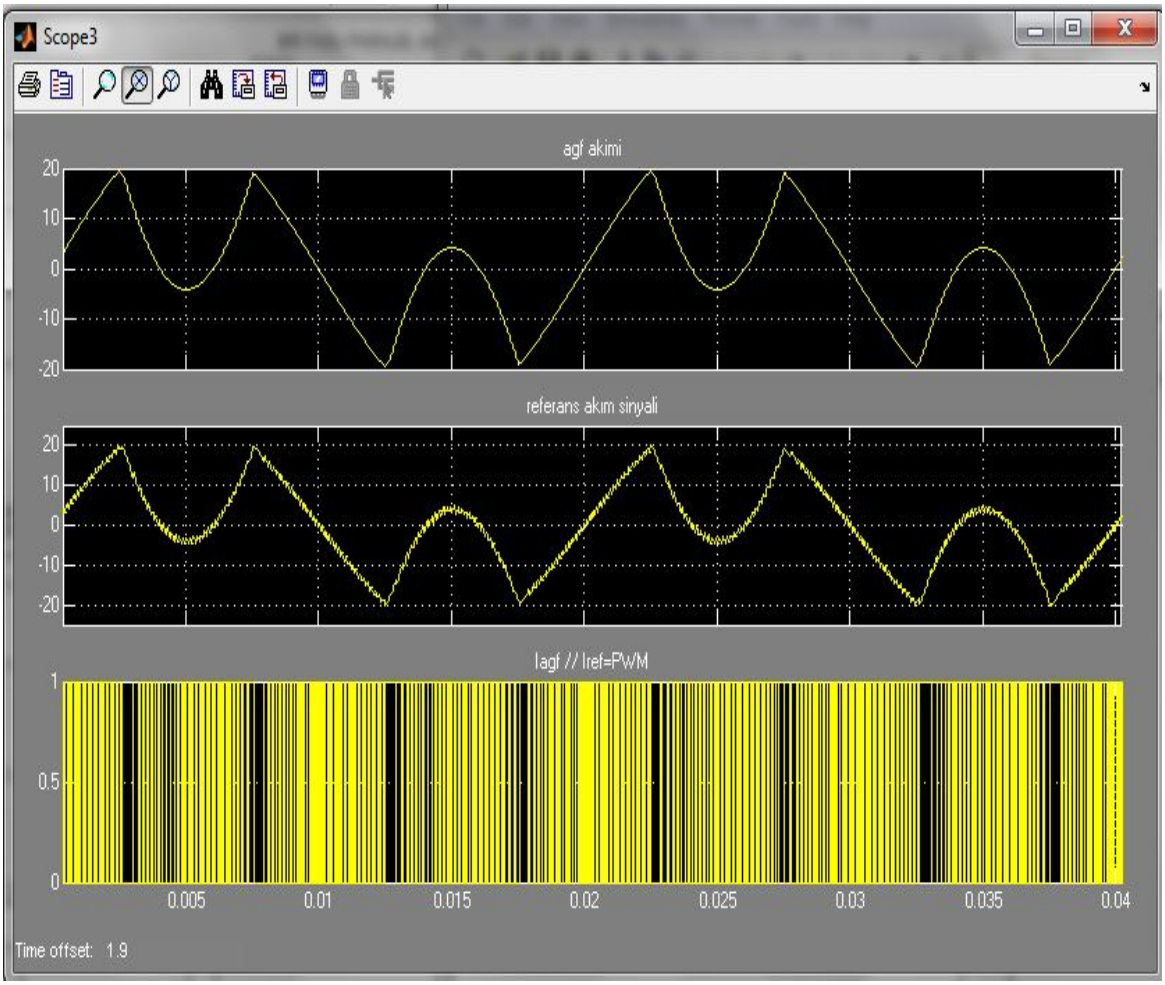


Şekil 5.16. Referans sinyal ve referans sinyale bağlı olarak oluşan DGM sinyal



Şekil 5.17. DGM sinyallerinin, IGBT anahtarlarına uygulanması gereken ayak portları

Şekil 5.18'de IGBT' lere uygulanan DGM sinyalleri görünmektedir. Çekilen akım ve referans akım, histerezis akım denetleyicisinde karşılaştırılarak DGM sinyalleri üretilmiştir.



Şekil 5.18. Referans akım sinyaline bağlı meydana gelen DGM sinyali

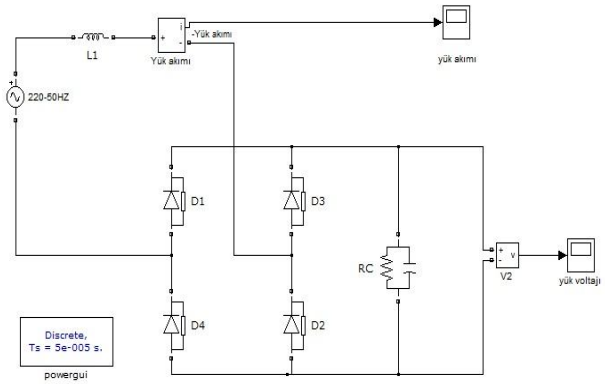
6. BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN BENZETİMİ

Bir fazlı PAGF' sinin benzetimi MATLAB/SIMULINK programında tasarlanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında doğrusal olmayan yükün filtresiz çalışması, ikinci kısmında ise doğrusal olmayan yüke tasarlanan PAGF' si eklenerek sonuçlar alınmış ve karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda PAGF' sinin, devrede olduğu ve olmadığı durumlardaki yükün çekmiş olduğu akımdaki toplam harmonik bozulmalar gözlemlenmiştir.

Benzetimde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir.

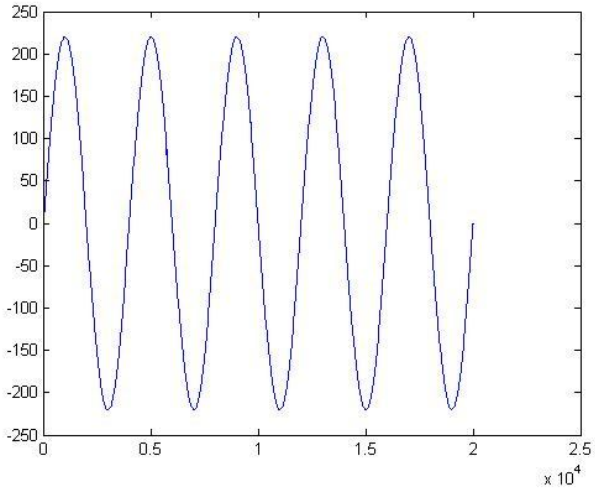
-Kaynak gerilimi/hertz	220 V/50 HZ
-Doğrusal olmayan yük direnci	15 Ω
-Doğrusal olmayan yük kondansatörü	14mF
-Doğrusal olmayan yük için, akım yumuşatma bobini	0.2mH
-Evirici kondansatörü	25 μF
-Evirici direnci	8 kΩ
-Evirici için, akım yumuşatma bobini	150mH

Şekil 6.1' de doğrusal olmayan yük devresi, H köprü diyot doğrultucu ve paralel RC yükünden oluşmaktadır. Devreye 220 V 50 Hz kaynak gerilimi uygulanmış, çekilen akım içinde, L_1 yumuşatma bobini kullanılmıştır.



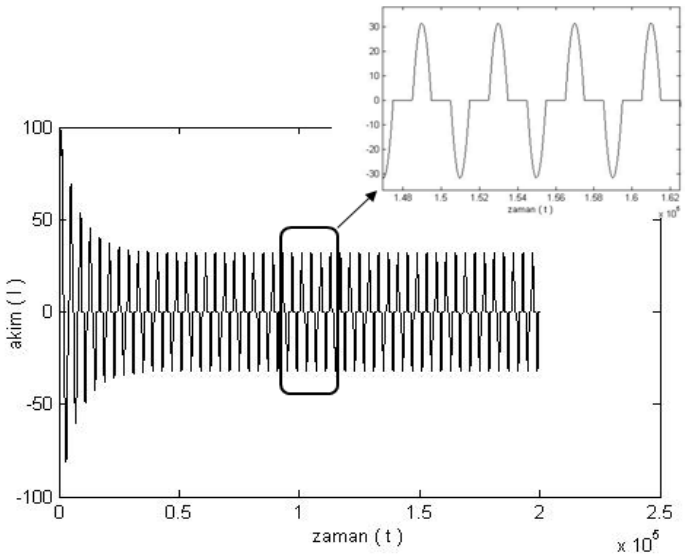
Şekil 6.1. PAGF' sinin pasif olduğu durumda ki doğrusal olmayan yükün benzetimi

Şekil 6.2' de, kullanılan modeldeki RC yüküne kaynak gerilimi olarak, Türkiye standarttı olan 220 V AC ve 50 Hz frekansında tek fazlı bir şehir şebekesi uygulanmıştır. Uygulanan kaynak gerilimi, sinüzoidal AC gerilim kaynağıdır.



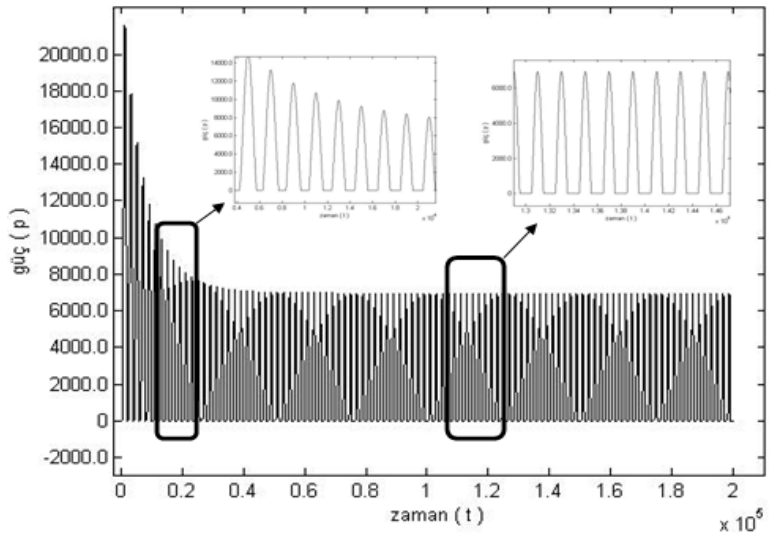
Şekil 6.2. Devreye uygulanan kaynak gerilimi sinyali

Şekil 6.3' de doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akım sinyaline baktığımızda, sinüzoidal olmayan bir akım sinyali görmekteyiz. Benzetimde, doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımın ortalama değeri 32 amperdir. Çalışmamızda ise, sinüzoidal olmayan akım sinyalinin THB' sinin en aza indirilmesi ve sinüzoidal bir sinyal elde edilmesi amaçlanır.



Şekil 6.3. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu harmonikli akım

Şekil 6.4' de doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu güç, harmonikli akım nedeni ile yüksek çıkmıştır. Çekilen harmonikli akım, çekilen gücün kalitesini de etkilemiş ve sinüzoidal olmayan güç sinyali ortaya çıkmıştır. Bu durum sonucunda istenmeyen güç kaybı oluşmuş ve istenilen kalitede güç sağlanamamıştır.

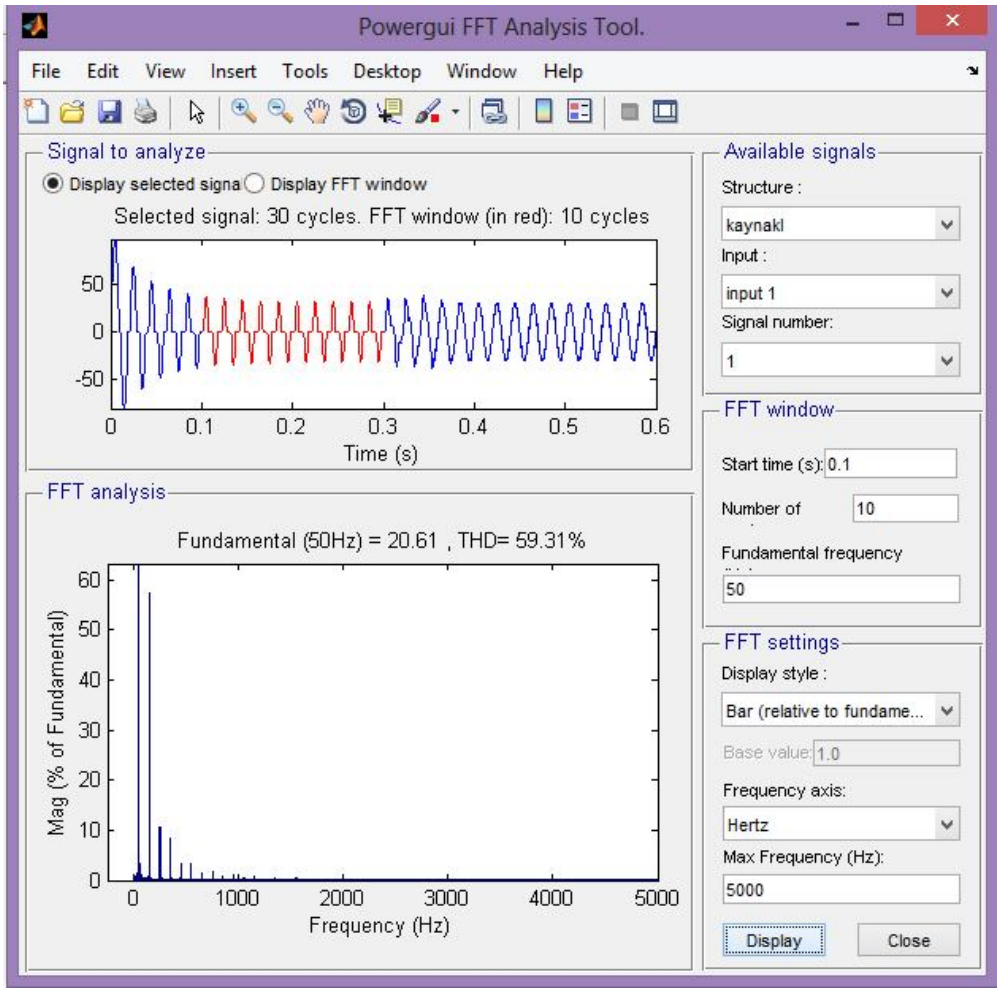


Şekil 6.4. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu güç

6.1. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımdaki THB

Şekil 6.5' de doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımın THB' sına bakıldığında t=0.1-0.3s zamanda %59.31 oranında THB görülmüştür. Herhangi bir filtreleme sisteminin

olmayışından dolayı oluşan bu THB, tasarlanmış olan PAGF' si ile düzeltilmeye çalışılacaktır.

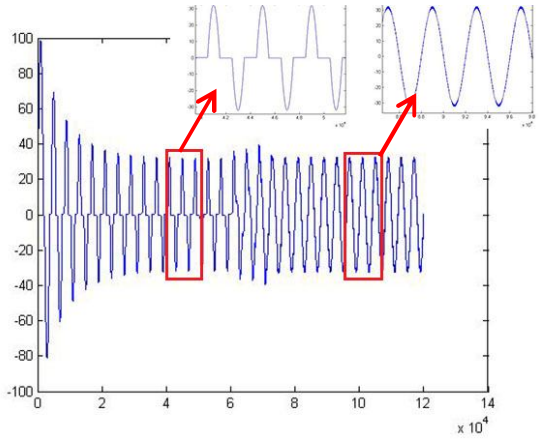


Şekil 6.5. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımın THB değeri

6.2. Sistemdeki akım ve gerilim dalga şekilleri

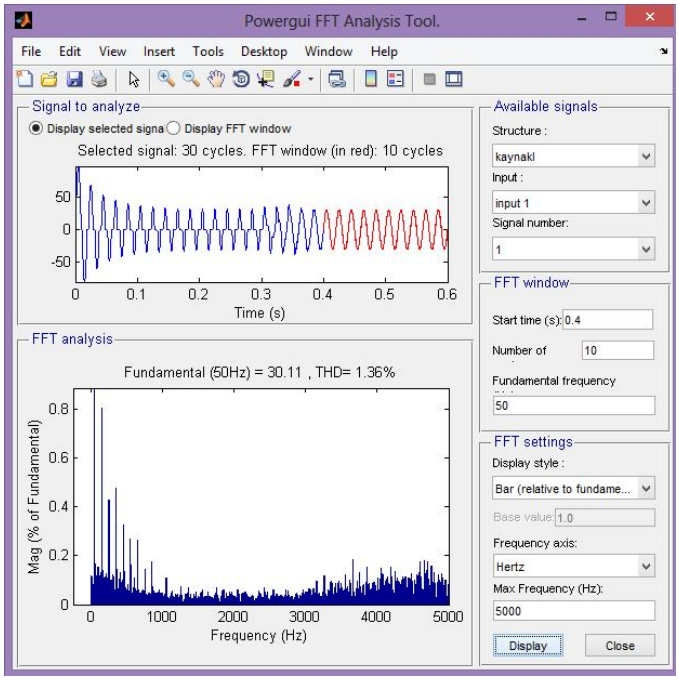
Doğrusal olmayan yük şebekeden beslenirken t=0.3 saniyede PAGF' si devreye alınmış ve akım dalga şekli verilmiştir.

Şekil 6.6' de doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akım sinyalinde, AGF' si devreye girdiğinde akım sinyalinin harmonikleri azalmış ve sinüzoidal hale gelmiştir. Histersiz akım denetleyicisi ile çekilen harmonikli akım referans akıma yaklaştırılmıştır.



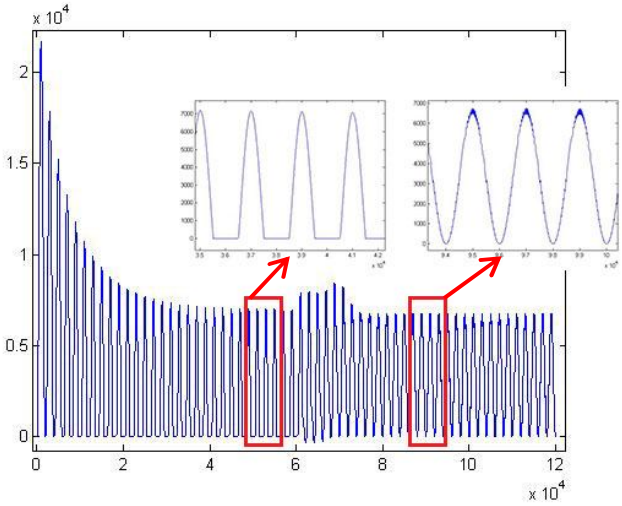
Şekil 6.6. PAGF' li doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akım

Şekil 6.7' de, MATLAB/SIMULINK programında modellemesi yapılan PAGF' si t=0.3s'de aktif hale gelmiş ve kaynak akımının t=0,4-0,6s zaman aralığında THB' si %1,36 değerinde çıkmıştır.



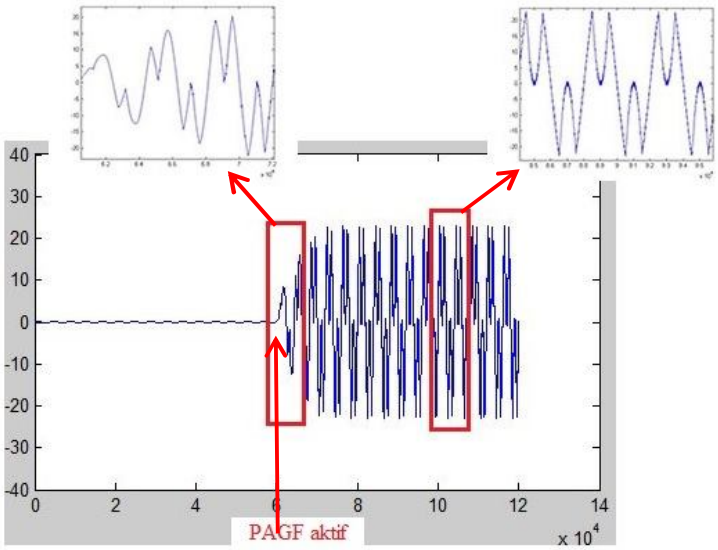
Şekil 6.7. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımdaki THB

Şekil 6.8' da doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu gücün kalitesi, modellenen PAGF' sinin devreye alınması ile daha da iyi olmuştur. İlk anda yük akımının referans akıma yaklaştırılmasına ve bu yaklaşıma paralel, harmonikli sinyalin sinüzoidale yaklaşması gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8. Doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu güç

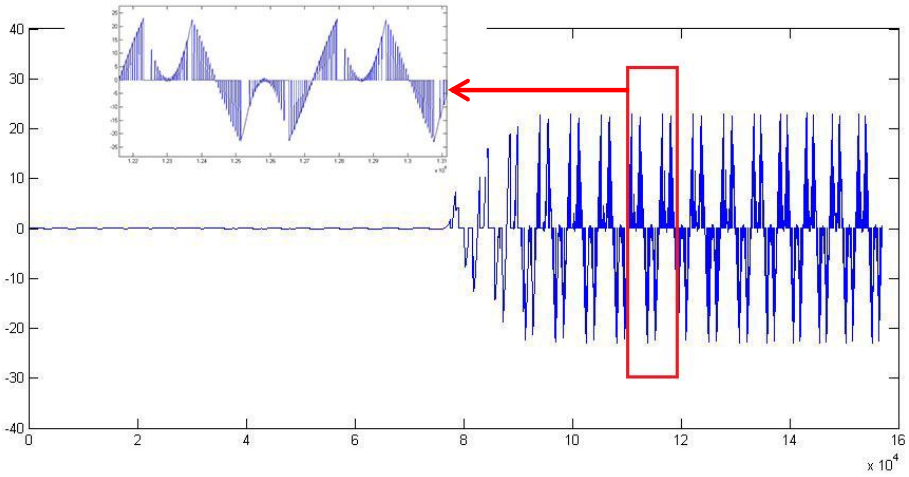
Şekil 6.9' da eviricinin görevi, referans sinyal akımı ile doğrusal olmayan yükün çekmiş olduğu akımın karşılaştırılması sonucu, sisteme simetri bir akım sinyali enjekte etmektir. Şekilde yükün çekmiş olduğu akım sinyaline simetri bir akım sinyalinin üretildiği görülmektedir.



Şekil 6.9. Tasarlanmış eviricinin çekmiş olduğu akım

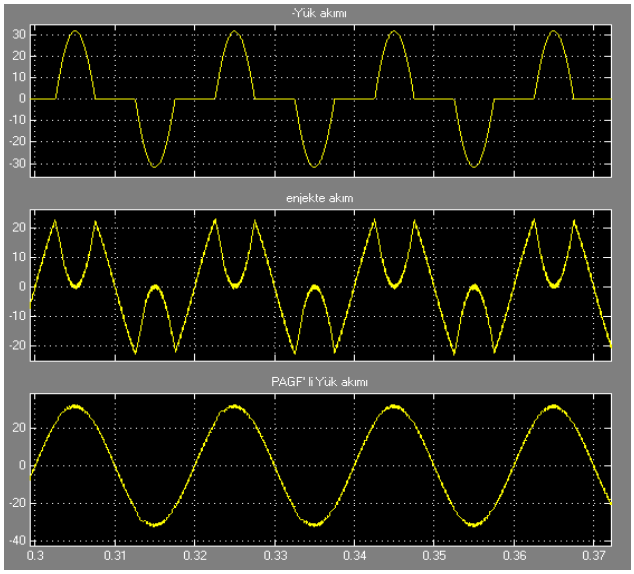
Eviricide anahtarlama hızına erken cevap verebilen IGBT anahtarları kullanılmış ve bir H-Köprü evirici devresi oluşturulmuştur. Şekil 6.10' de IGBT anahtarlarının iletime ve kesime geçme durumlarına paralel, her bir anahtarlar üzerinden geçen akım sinyali

görünmektedir. Evirici üzerinde bulunan kondansatör, DGM sinyallere hızlı cevap veren IGBT anahtarları yardımıyla üzerine düşen gerilimi şarj ve deşarj yapar



Şekil 6.10. Eviricide kullanılan IGBT üzerinden geçen akım

Doğrusal olmayan yükün şebeke akımında oluşturduğu harmonikli akıma, PAGF' sinin uyguladığı enjekte akımı ile sinüzoidal bir şebeke akımı oluşmuştur. Bu durum Şekil 6.11' de görülmektedir. Bu da bize güç faktörünün iyileştiği ve harmoniksiz bir yapıya yakın bir akım sinyali elde edildiğini göstermektedir.



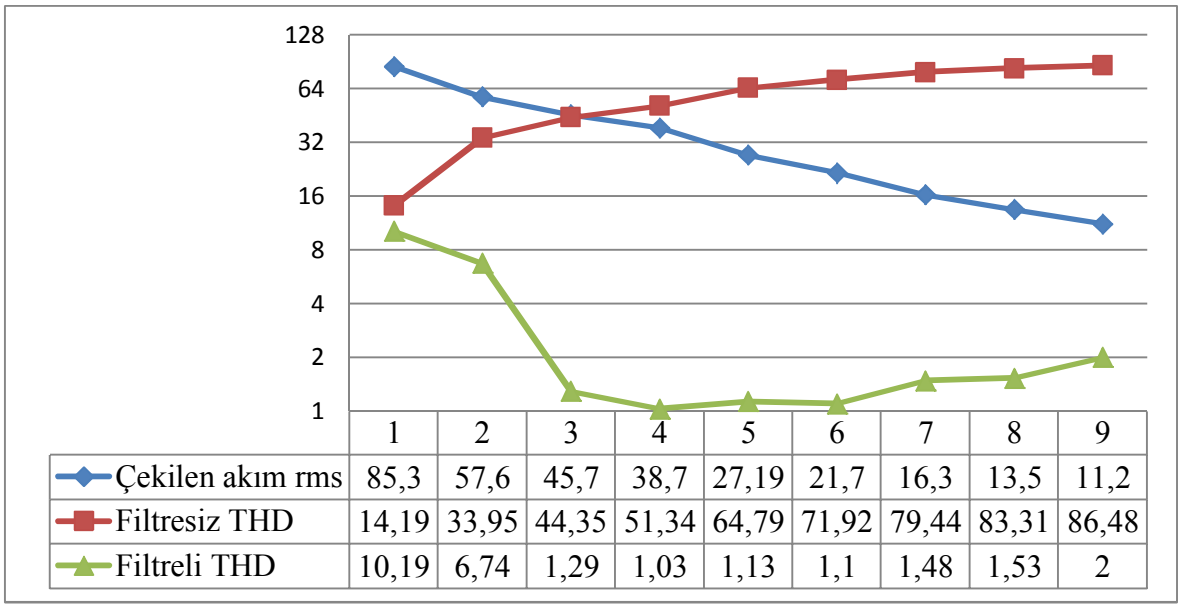
Şekil 6.11. Doğrusal olmayan yükün, çekmiş olduğu harmonikli akıma, enjekte akımın uygulanması

Tablo 6.1' de, farklı yüklerde oluşan harmonikler ve bu harmoniklere karşı oluşturulan PAGF' li yükün çekmiş olduğu akımda, oluşan harmonik değerleri gözükmektedir.

Tablo 6.1. Farklı yüklerde çekilen akım harmonikleri ve PAGF' li harmonikler

PAGF' si t=0.3s sonra devreye girmektedir		
Çekilen akım Rms	Filtresiz THD t=0.1s-0.3s	Filtreli THD t=0.4s-0.6s
85,3	14,19	10,19
57,6	33,95	6,74
45,7	44,35	1,29
38,7	51,34	1,03
27,19	64,79	1,13
21,7	71,92	1,1
16,3	79,44	1,48
13,5	83,31	1,53
11,2	86,48	2

Farklı yüklerde farklı harmonik değerleri oluşmuş ve PAGF' si ile bu değerler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Şekil 6.12'deki grafiğe bakıldığında, modellemesi yapılan PAGF' sinin, 15A ila 45A arası gibi düşük güçteki yüklerde etkin olduğu görülmüştür.



Şekil 6.12. Yükün çekmiş olduğu farklı akımlarda, oluşan harmonikler

7. SONUÇLAR

Yapılan yayınlar ve çalışmalara bakıldığında AGF genel olarak üç fazlı sistemlerde uygulandığı görülmüştür. Bu sonucun nedeni ise, sanayi siteleri gibi büyük güç gerektiren yerlerde, elektrik makinelerinin şebeke hattında oluşturduğu yüksek derecede, harmoniklerin ve güç kalitesi problemlerinin oluşmasıdır.

Bu çalışmada, PAGF' si kullanmış olup filtre, Türkiye standarttı olan 220V AC 50 Hz sinüzoidal tek faza bağlı yüke uygulanmıştır. Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesi, buna paralel olarak, düşük güç seviyesindeki sistemlerin hassasiyet kazanması, tek fazlı sistemlerin bağlı olduğu şebekede oluşan harmoniklerin giderilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Sistemin verimini ve enerji kalitesini artırmak için kaynaktan çekilen gücün reaktif bileşenini en aza indirmek ve harmonikleri bastırmak gereklidir. Harmoniklerin bastırılmasında kullanılan PAGF' leri ise sadece belirli aralıklardaki harmonikleri bastırdığı bundan dolayı da istenilen performansı vermediği anlaşılmış, PAGF' sinin ise sistem harmoniklerinin giderilmesinde iyi bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. PAGF' si modelimizin kontrol yönteminde, referans olarak kaynak gerilimi, yük akımı ve filtre akımı ele alınarak kontrol yöntemi belirlenmiştir.

IEEE-519 1992 standardı tarafından belirlenen akım harmonik sınırlamaları göz önüne alınaraktan, benzetimi yapılan PAGF' sinin etkin olduğu görülmüştür. Kontrol yöntemlerinin gelişmesi ve yarı iletken malzeme olan anahtarlamaların tepki hızlarının istenilen düzeye çıkması ile harmonik filtreleme sistemlerinin üst seviyeye ulaşacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Siğergök, B., 2009. uzay vektör darbe genişlik modülasyon denetimli aktif filtre devrelerinin modellenmesi ve benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[2] Çöteli, R. Uçar, F. Dandıl, B. ve Ata F., 2011. Paralel Aktif Güç Filtresinin Denetimi İçin Farklı Referans İşaret Çıkarma Yöntemlerinin İncelenmesi, The 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, Mayıs 16-18.

[3] Özdemir, E. Özdemir, Ş. ve Kale M., 2002. Aktif Güç Filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, Eleco'2002 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Kocaeli, Türkiye.

[4] Ertay, M.M. Alboyacı, B. Duru H.T, ve Yeğin E.M., 2011. Endüstriyel güç sistemlerinde oluşan harmoniklerin pasif filtrelerle yok edilmesi, EVK'2011 IV.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, Mayıs 12-13.

[5] Özdemir, Ş. ve Kuşdoğan, Ş., 2005. Doğrusal olmayan yüklerde aktif güç filtresi ile harmoniklerin filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 20, 225-232.

[6] Dursun, M., 2005. Doğrusal olmayan sistemler için bir seri aktif güç filtresi tasarımı ve analizi, Politeknik Dergisi 6, 523-530.

[7] Tanrıöven, M. ve İnce, R. Elektrik güç sisteminin kalitesini bozan faktörlerin incelenmesi. www.etmd.org.tr/teknikyazilar/no1558.doc, 26 Haziran 2013.

[8] Najafi, M. Hoseynpoor, M. Davoodi, M. and T. Karimi, 2011. Mitigation of Power Quality Problems with Series Active Filter, Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5(7), 622-628.

[9] Akgeyik, O., 2005. Kesintisiz güç kaynaklarında kullanılan doğrultucuların oluşturduğu akım harmoniklerinin analizi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[10] Akpınar, E., 2007. Kompanzasyon ve harmonik filtreleme, Elektrik Mühendisleri Odası İzmir, Aralık 21-23.

[11] Avcı, T., 2008. akım kaynaklı aktif güç filtresi için çeşitli kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[12] Habrouk, E.M. Darwish, M. K. and Mehta, P., 2000. Active power filters: a review. IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol.147(5), 403-413.

[13] Kesler, M. ve Özdemir, E. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC) Denetim Algoritmasının Geliştirilmesi ve PSIM Ortamında Simülasyonu. http://www.emo.org.tr/ekler/83d9c5215a6b7c5_ek.pdf , 27.06.2013.

[14] Yılmaz, E. Aktif harmonik filtreler. http:// www.haberortak.com/ Haber/ Elektrik/ 25122009/ Aktif-harmonik-filtreler.php#storyContinued, 27.06.2013

[15] H. Sasaki and T. Machida, "A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation", IEEE Trans. Pwr App. Sys., Vol. PAS- 90, No. 5, pp. 2009–19, 1971.

[16] Gyugyi, L. 1992. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. In IEE proceedings C (generation, transmission and distribution) (Vol. 139, No. 4, pp. 323-331). IET Digital Library.

[17] Akagi, H. and Fujita, H. 1995. "A new power line conditional for harmonic compensation in power systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 3, pp. 1570–1575, Jul.

[18] Fujita, H. and Akagi, H. 1998. "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 2, pp. 315–322.

[19] Aredes M., Heumann K., Watanabe E.H. 1998. 'An universal active power line conditioner', IEEE Trans. Power Deliv., vol.13,no.2, pp. 545–551.

[20] Mekhilef, S. Tarek, M. and Rahim, N. A. 2011. Single-phase Hybrid Active Power Filter with Adaptive Notch Filter for Harmonic Current Estimation, IETE Journal of research 57, 20-29.

[21] Kılınç, T. ve Terciyanlı, A. 2006. Akım Kaynaklı Paralel Aktif Güç Filtresi Tasarımı ve Benzetim Çalışmalar, Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, ELECO, syf. 186-190. 6-10 Aralık Bursa.

[22] Chen, D. ve Xie, S. 2004. Review of the Control Strategies Applied to Active Power Filters, IEEE Int. Conf. On Electc. Utility Deregation, pp. 666-670, Hong Kong.

[23] Çolak, İ. ve Kaplan O. 2011. Bir fazlı paralel aktif güç filtreleri için sensörsüz da gerilim kontrolü, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 26, 223-232.

[24] Kestane, K. 2005. Tek fazlı paralel aktif güç filtresi analizi ve tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[25] Rahman, N. F. A., Hamzah, M. K. Noor, S. Z. M. and Hasim, A.Ş.E., 2009. Single-Phase Hybrid Active Power Filter Using Single Switch Parallel Active Filter and Simple Passive Filter, The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems November 2-5, Taipei, Taiwan, R.O.C.

[26] Baharom, R. Hamzah, M. K. Hamzah, N.R. Nik Ismail, N.F. and Abu Hasim, A.S. 2010. Computer Implemented Model of Single Switched Single-Phase Parallel Active Power Filter, 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE 2010), August 1-3, Kyoto, Japan.

[27] Altıntaş, A. 2003. Paralel Aktif Güç Filtresinin Mikrodenetleyici ile PWM Kontrolü, Doktora Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

[28] Kocabaş, İ. 2009. 10 KVA Gerilim Kaynaklı Aktif Güç Filtresinin Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, H. Ü, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[29] Kale, M. 2004. Paralel Aktif Güç Filtresi ile Harmonik Akım ve Reaktif Güç Kompanzasyonu. Yüksek Lisans Tezi, K.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

[30] Cengiz, M.S. 2011. Enerji sistemlerinde harmoniklerin azaltılması ve simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Y.Y.Ü, Fen bilimleri Enstitüsü, Van.

[31] Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2007). Instantaneous power theory and applications to power conditioning (Vol. 31). John Wiley & Sons.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Kahramanmaraş/Elbistan'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elbistan'da tamamladı. 2002-2006 yılları arasında Fırat Üniversitesi Elektronik ve Bilgisayar eğitimi Bölümü, Elektronik Öğretmenliğinden mezun oldu. 2006-2010 yılları arasında Bilgisayar ve Elektronik öğretmeni olarak çalıştı. 2010 yılından itibaren Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.