

**PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ KULLANARAK HARMONİK
VE REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU YAPILMASI**

Ferhat UÇAR

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Beşir DANDIL
HAZİRAN-2012**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ KULLANARAK HARMONİK ve
REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU YAPILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat UÇAR
(092126102)

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.06.2012
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06.06.2012

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi
Programı: Aydınlatma ve Tesisat Eğitimi

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Beşir DANDIL (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Servet TUNCER (F.Ü)

Doç. Dr. Sami EKİCİ (F.Ü)



HAZİRAN-2012

ÖNSÖZ

Son yıllarda doğrusal olmayan yüklerin endüstride kullanım oranındaki artıştan dolayı iletim ve dağıtım şebekelerinde elektrik güç kalitesi sorunlarında da artan bir ivme mevcuttur. Güç sistemlerindeki rezonans, gerilim dengesizliği, aşırı ısınma ve regülasyon gibi sorunları ortadan kaldırmak için akım harmoniklerinin bastırılması gerekmektedir. Bunun yanında şebekeden çekilen reaktif güç kaynaklı kayıpların azaltılması için ise reaktif güç kompanzasyonu yapılması gerekmektedir. Geleneksel çözüm olarak pasif filtreler bu sorunların çözümünde kullanıla gelmektedir. Maliyetlerinin ucuz olması ve kolay kurulum özelliklerine rağmen bu yöntemlerin birçok dezavantajı vardır. Şebekeden beslenen yüke özgü ayarlanan pasif filtreler, her hangi bir yük değişiminde, bu ihtiyaca cevap verir hale gelmek için ek maliyet gerektirmektedirler. Geleneksel çözümlerin bu gibi olumsuzluklarını gidermek için aktif güç filtreleri kullanılmaya başlanmıştır. Aktif güç filtreleri, esnek yapıları, ileri düzeydeki harmonikleri bastırabilme yetenekleri, uygun denetim algoritması ile hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonunun birlikte yapabilme özellikleri ve dayanıklı denetim yöntemleri ile uygulama alanları gün geçtikçe artan çözümlerdir. Kurulum maliyetlerinin yüksek olma dezavantajını, uygulama sürecinde ek maliyet gerektirmeme özelliği ile kompanze etmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı önümüzdeki yıllarda, gerek ülke ekonomisine katkı sağlamak adına gerekse tesislerin güç kalitesini arttırmak adına aktif güç filtresi uygulamalarının artması beklenmektedir. Bu tez çalışmasında, paralel aktif güç filtresi benzetim modeli bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Aktif güç filtresinin referans işaret elde etmesinde, farklı denetim algoritmaları kullanılmış ve akım denetimi için ise histerisiz bant akım denetim yöntemi kullanılmıştır. Benzetim modelinden elde edilen grafiksel sonuçlar gösterilmiştir.

Çalışmam boyunca tecrübeleri ve katkıları ile yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Beşir DANDIL'a ve bilgi birikimini esirgmeden paylaşıp yol gösteren hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Resul ÇÖTELİ'ye, bilgi paylaşımında bulunan birlikte çalıştığım değerli hocalarıma, tez çalışması boyunca beni yalnız bırakmayan ve destekleriyle motivasyonumu yüksek tutan biricik eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ferhat UÇAR
ELAZIĞ-2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLOLAR LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
SİMGELER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	8
1.2. Tezin Yapısı	9
2. REAKTİF GÜÇ ve HARMONİK KOMPANZASYONU	11
2.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu	11
2.1.1 Reaktif Güç Kompanzasyonu Yöntemleri	14
2.2 Harmonikler	15
2.2.1 Harmonik Kompanzasyonu	17
2.3 Geleneksel Pasif Filtreler	18
2.4 Aktif Güç Filtreleri	19
2.4.1 Güç Devresi Yapısına Göre Aktif Güç Filtrelerinin Sınıflandırılması	20
2.4.1.1 Seri Aktif Güç Filtreleri	20
2.4.1.2 Paralel Aktif Güç Filtreleri	21
2.4.1.3 Karma Güç Filtreleri	24
2.4.1.4 Birleşik Güç Kalite Düzenleyicileri	25
2.4.2 Kullanılan Evirici Yapısına Göre Aktif Güç Filtrelerinin Sınıflandırılması	25
2.4.3 PAGF Temel Birimleri	26
3. REFERANS İŞARET ÇIKARMA YÖNTEMLERİ	29
3.1. Frekans Alanı Yöntemleri	29
3.2 Zaman Alanı Yöntemleri	30
3.2.1. Anlık Reaktif Güç Teorisi Denetim Yöntemi	30
3.2.2. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi	33
4. HİSTERİSİZ BANT AKIM DENETLEYİCİ	35
5. BENZETİM MODELİ ve ELDE EDİLEN SONUÇLAR	38
5.1. Hızlı Fourier Dönüşümü Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları	40
5.2. Anlık Reaktif Güç Teoremi Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları	47
5.3. Senkron Referans Çatı Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları	55
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	70

ÖZET

Günümüzde doğrusal olmayan yüklerin kullanımının yaygınlaşması, elektrik güç kalitesi problemlerinin de artmasına neden olmuştur. Bu problemlerin başında harmonik kirlilik ve reaktif güç çekilmesi gelmektedir. Geleneksel olarak, harmonik kompanzasyonu pasif filtreler ile gerçekleştirilmektedir ancak bu tür filtreler soruna tek boyutlu bir çözüm getirmektedir. Pasif filtreler sabit kompanzasyon karakteristikleri ve büyük güçlerde karşılaşılan boyut olumsuzlukları gibi dezavantajlara sahiptirler. Tüm bu bahsedilen nedenlerden dolayı pasif filtreler harmoniklerin bastırılmasında yetersiz kalmaktadır. Gelişen mikro işlemci ve güç elektroniği teknolojileri, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunu aynı anda gerçekleştirebilen aktif güç filtrelerinin kullanılmasına olanak tanımıştır.

Bu tez çalışmasında, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu işlemlerini aynı anda yapabilen iki seviyeli evirici tabanlı bir Paralel Aktif Güç Filtresinin (PAGF) benzetim modeli Matlab/Simulink paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan benzetim modeli; dengeli üç fazlı şebeke, iki seviyeli evirici, eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı, bir denetim birimi ve doğrusal olmayan yüklerden oluşmaktadır.

PAGF denetim birimi şebeke gerilim ve akım dalgalarını ölçerek, reaktif güç ve harmonik kompanzasyonu için gerekli olan referans işaretleri belirler. Bu çalışmada referans işaret çıkarma yöntemlerinden frekans alanında Fourier yöntemi ve zaman alanında ise anlık reaktif güç teoremi (ARGT) ve senkron referans çatı yöntemi (SRÇY) kullanılmıştır. Evirici çıkışında referans işaretlerin üretilebilmesi için evirici akım denetimi gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada akım denetim yöntemi olarak iki seviyeli histerisiz bant akım denetleyici (HBAD) kullanılmıştır. HBAD kolay uygulanması ve dayanıklı yapısı ile sık kullanılan bir denetim algoritmasıdır. Bunun yanında sabit ve bilinen bir anahtarlama frekansına sahip olmaması en önemli dezavantajıdır. Benzetim modeli üzerinde her üç referans işaret çıkarma yöntemine ait algoritmalar çalıştırılmış ve PAGF dinamik performansı farklı zamanlarda devreye giren iki doğrusal olmayan yük kullanılarak gösterilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi, Harmonikler, Reaktif Güç, Aktif Güç Filtresi, Histerisiz Bant Akım Denetleyici

SUMMARY

Compensation of Harmonics and Reactive Power Using Shunt Active Power Filter

Today, expansive using of non-linear loads increases existing of troubles in power quality. Harmonic pollution and drawing reactive power lead those troubles. Conventionally, harmonic compensation is carried out by using of passive filters. On the other hand those filters solve problems limitedly. Passive filters have some drawbacks like fixed compensation characteristic and large sizes. Because of whole reasons mentioned, passive filters are inadequate at suppressing harmonics. Advancement on power electronics and micro-processor technologies made active power filters which can simultaneously compensate reactive power and harmonics, used more popularly.

In this thesis, a simulation model of two-level inverter based shunt active power filter is built in Matlab/Simulink software to compensate harmonic and reactive power simultaneously. Designed simulation model consists of a balanced grid, two-level inverter, a coupling inductance between grid and inverter, control unit and non-linear loads.

Control unit of shunt active power filter extracts required reference signals for compensating reactive power and harmonics by sensing grid voltage and current waves. In this study, fast Fourier method in frequency domain and instantaneous reactive power theory and synchronous reference frame method in time domain are used for reference extracting process. Control of inverter output current is necessary to generate reference signals. In this study, two-level hysteresis band current controller is used as current modulator. Hysteresis band current controller is mostly preferred because of its easy implementation and robust structure. Besides, including undefined and floating switching frequency is the most known disadvantage of it. Each reference extracting method is executed through simulation model and dynamic performance of shunt active power filter is shown by cooperation of two non-linear loads operated at different times. Graphical results are obtained and presented.

Keywords: Power Quality, Harmonics, Reactive Power, Active Power Filter, Hysteresis Band Current Controller

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Endüktif karakterli yük ve fazör gösterimi	12
Şekil 2.2	AA şebeke güç vektörleri	12
Şekil 2.3	Şebekedeki reaktif güç dolaşımı	13
Şekil 2.4	Geleneksel kompanzasyon sistemi blok şeması	13
Şekil 2.5	Kondansatörlü şebekede güç faktörü iyileştirme.....	13
Şekil 2.6	Sinüzoidal gerilim ve harmonik içerikli akım dalga şekli örnekleri.....	16
Şekil 2.7	Pasif paralel filtrenin genel yapısı	18
Şekil 2.8	Güç devre yapılarına göre AGF sınıflandırması.....	20
Şekil 2.9	SAGF'nin genel devre yapısı.....	21
Şekil 2.10	PAGF'nin genel devre yapısı.....	22
Şekil 2.11	Güç devresinde kullanılan evirici yapılarına göre PAGF'ler (a) Gerilim beslemeli evirici tabanlı PAGF'nin genel devre yapısı..... (b) Akım beslemeli evirici tabanlı PAGF'nin genel devre yapısı.....	23 23
Şekil 2.12	KGF'nin genel devre yapısı.....	24
Şekil 2.13	BGKD'nin genel devre yapısı	25
Şekil 3.1	Fourier yöntemi ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi.....	30
Şekil 3.2	ARGT ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi.....	32
Şekil 3.3	SRÇY ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi	33

Şekil 4.1	HBAD ile kapı işaretlerinin üretilmesi	36
Şekil 4.2	İki seviyeli gerilim beslemeli evirici devre şeması.....	36
Şekil 4.3	HBAD yapısının mantıksal işletmenlerle gerçekleştirilmesi.....	37
Şekil 5.1	PAGF'nin benzetim modeli.....	38
Şekil 5.2	Evirici kapı işaretlerinin elde edilmesine ait benzetim blokları	39
Şekil 5.3	HFD genel blok şeması.....	40
Şekil 5.4	HFD - Üç faz şebeke gerilimleri.....	40
Şekil 5.5	HFD - Bir faz için yük akımının dalga şekli	41
Şekil 5.6	HFD - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki (a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım (b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım	41 42
Şekil 5.7	HFD kullanan PAGF'li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki (a) Benzetim süresi boyunca şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki (b) 1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim (c) 2 ve 3 nolu bölümler için detaylı gösterim	42 43 43
Şekil 5.8	HFD - Yük-1-2 akımlarının THB'leri (a) Birinci yükün akımının THB'si (b) Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB'si	44 44
Şekil 5.9	HFD kullanan PAGF'li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri (a) Birinci yükün devrede olduğu durum için HFD kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği (b) Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için HFD kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği	45 45
Şekil 5.10	HFD kullanan PAGF'nin referans izleme başarımı (a) Benzetim süresi boyunca (b) Detay gösterim.....	46 46
Şekil 5.11	Yük akımlarının ve kaynak gerilimin α - β ksen dönüşüm blok diyagramı	47
Şekil 5.12	Anlık güçlerin elde edilmesine ait benzetim blokları	47

Şekil 5.13	Referans akımların α - β eksen bileşenlerinin elde edilmesi.....	48
Şekil 5.14	Ters Clarke dönüşümü benzetim blokları.....	48
Şekil 5.15	ARGT - Üç faz şebeke gerilimleri.....	49
Şekil 5.16	ARGT - Bir faz için yük akımının dalga şekli.....	49
Şekil 5.17	ARGT - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki (a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım (b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım	50 50 50
Şekil 5.18	ARGT kullanan PAGF’li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki (a) Benzetim süresi boyunca şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki (b) 1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim (c) 2 ve 3 nolu bölümler için detaylı gösterim	51 51 52
Şekil 5.19	ARGT - Yük-1-2 akımlarının THB’leri (a) Birinci yükün akımının THB’si (b) Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB’si	52 53
Şekil 5.20	ARGT kullanan PAGF’li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri (a) Birinci yükün devrede olduğu durum için ARGT kullanan PAGF’nin şebeke akımının harmonik içeriği..... (b) Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için ARGT kullanan PAGF’nin şebeke akımının harmonik içeriği	53 54
Şekil 5.21	ARGT kullanan PAGF’nin referans izleme başarımı (a) Benzetim süresi boyunca (b) Detay gösterim.....	54 55
Şekil 5.22	Senkron referans çatı yöntemine ait benzetim blokları	55
Şekil 5.23	SRÇY - Üç faz şebeke gerilimleri	56
Şekil 5.24	SRÇY - Bir faz için yük akımının dalga şekli	56
Şekil 5.25	SRÇY - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki (a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım (b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım	57 57

Şekil 5.26	SRÇY kullanan PAGF’li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki	
(a)	Benzetim süresi boyunca şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki	58
(b)	1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim	58
(c)	2 ve 3 nolu bölümler için detaylı gösterim	58
Şekil 5.27	SRÇY - Yük-1-2 akımlarının THB’leri	
(c)	Birinci yükün akımının THB’si	59
(d)	Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB’si	59
Şekil 5.28	SRÇY kullanan PAGF’li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri	
(c)	Birinci yükün devrede olduğu durum için SRÇY kullanan PAGF’nin şebeke akımının harmonik içeriği.....	60
(d)	Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için SRÇY kullanan PAGF’nin şebeke akımının harmonik içeriği.....	60
Şekil 5.29	SRÇY kullanan PAGF’nin referans izleme başarımı	
(c)	Benzetim süresi boyunca	61
(d)	Detay gösterim.....	61

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Flip-flop doğruluk tablosu	37
Tablo 5.1. Benzetim modeline ait parametreler	39
Tablo 5.2. Referans işaret çıkarma yöntemlerine ait harmonik verileri.....	62

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif Akım
ADALINE	: Adaptif Doğrusal Bileşen
AGF	: Aktif Güç Filtresi
ARGT	: Anlık Reaktif Güç Teorisi
BGKD	: Birleştirilmiş Güç Kalitesi Düzeltici
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyon
DSP	: Sayısal İşaret İşlemci
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
FKD	: Faz Kilitleme Devresi
HBAD	: Histerisiz Bant Akım Denetleyici
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
KGF	: Karma Güç Filtreleri
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
PF	: Pasif Filtreler
PI	: Oransal+İntegral
SAGF	: Seri Aktif Güç Filtresi
SRÇY	: Senkron Referans Çatı Yöntemi
STATCOM	: Statik VAR üretici
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
%THB	:Yüzde Olarak Toplam Harmonik Bozulma
UVDGM	: Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyon
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre
YSA	: Yapay Sinir Ağları

SİMGELER LİSTESİ

$\cos \varphi$	: Şebeke güç faktörü
f	: Şebeke frekansı
H	: Histerisiz bant aralığı
i_d	: d-eksen akımı
i_{f-a}	: Filtre akımı a fazı
i_α	: Akımın α -eksen bileşeni
i_β	: Akımın β -eksen bileşeni
i_q	: q-eksen akımı
i_{ref-a}	: Referans akım a-fazı
I	: Şebeke akımının etkin değeri
P, p	: Aktif güç
P_{DC}	: Kayıp aktif güç
pu	: Birim değer
Q, q	: Reaktif güç
Q_C	: Kapasitif reaktif güç
S	: Görünür güç
S_{a1}	: Evirici a-fazı üst anahtar
S_{a2}	: Evirici a-fazı alt anahtar
S'	: Kompanzasyon sonrası görünür güç
V	: Şebeke gerilimi etkin değeri
V_{dc}	: Şebeke gerilimi etkin değeri
V_α	: Kaynak gerilimi α -eksen bileşeni
V_β	: Kaynak gerilimi β -eksen bileşeni
X_L	: Endüktif reaktans
ω	: Şebekenin açısal hızı
φ	: Şebeke gerilimi ve akımı arasındaki açı
φ'	: Kompanzasyon sonrası şebeke gerilimi ve akımı arasındaki açı
x_α	: Örnek fonksiyonun α -eksen bileşeni
x_β	: Örnek fonksiyonun β -eksen bileşeni

1. GİRİŞ

Endüstrinin ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Bununla birlikte yeryüzündeki sınırlı kaynaklardan dolayı, elektrik enerjisinin verimli kullanılması gerekliliği ön plana çıkmıştır. Elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketim noktasına kadar en az kayıpla taşınması verimlilik açısından son derece önemlidir. Bu nedenle elektrik güç kalitesi üzerine yapılan çalışmalar, daha çok elektrik enerjisinin etkin ve verimli kullanılması yönünde yoğunlaşmaktadır. Kullanılan elektrik enerjisinin kalitesi, şebekenin belirli bir noktasında gerilimin genlik ve frekansının sabit olması, yani değişen işletme koşullarında dahi sabit genlik ve frekanslı, bozulmamış bir sinüs olması ile belirlenir. Sistemin değişken genliğe sahip olması, ani tepe ve çukurlar içermesi, anlık darbeler oluşturan sinüzoidal yapıdan uzaklaşmış bir gerilimle beslenmesi; enerji kesintisi, frekanstaki değişimler ve 3-faz dengesizlikleri güç kalitesindeki bozulmaları ifade etmektedir. Güç kalitesi bozulmaları üretim ve iletim sistemlerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin yanında, endüstride seri üretim yapan sistemlerin davranışlarında oluşturduğu değişimlerle üretim bandında zaman kayıplarına yol açarak ülke ekonomisini de olumsuz etkilemektedir [1].

Son yıllarda, teknolojiye gelişmelerle beraber endüstriyel uygulamalarda; motor sürücüler, anahtarlamalı güç kaynakları, alternatif akım (AA) / doğru akım (DA) dönüştürücü ve çeviricileri gibi güç elektroniği tabanlı aygıtlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda süreç denetimlerinin daha hassas yapılması, otomotiv, beyaz eşya, demir-çelik imalatı ve ev elektroniği gibi dinamik sektörlerde daha karmaşık üretim sistemlerine başlanması gibi nedenlerden dolayı, yukarıda sıralanan güç elektroniği tabanlı cihazların kullanımları da yaygınlaşmıştır. Bu cihazlar, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yüklerdir. İş yapabilmeleri için gerekli olan denetimli ya da denetimsiz anahtarlama işlemleri bu yüklere doğrusal olmayan bir çalışma karakteristiği sunar. Bu yükler, beslendikleri baranın gerilim ve akım dalga şekillerini olumsuz yönde etkilemekte ve enerji kalitesini bozmaktadırlar. Şebekeden çekilen akımın dalga şekli sinüzoidal yapıdan uzaklaştıkça, yukarıda sayılan güç kalitesi problemlerine ek olarak şebekeden reaktif güç çekilmesi ve harmoniklerin varlığı da ortaya çıkmaktadır [2, 3].

Reaktif güç ve harmonikler, şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkileyen temel güç kalitesi problemleridir. Bu güç kalitesi problemleri giderilmediği takdirde; sistemin güç katsayısının düşmesi, nötr akımı fazlalığı, trafo, bara ve kablolar gibi sistem elemanlarının aşırı ısınmaları, rezonans olayları, koruma elemanlarının arıza olmaksızın devreye girip sistemi enerjisiz bırakmaları, elektromanyetik cihazların titreşimli şekilde çalışmaları ve hatta bu titreşimlerden dolayı oluşan mekanik arızalarla elektriksel kayıpların yanı sıra maddi kayıpların ortaya çıkması gibi birçok olumsuzluğa da neden olmaktadır [1].

Reaktif gücün meydana getirdiği olumsuzlukların giderilmesi amacıyla, reaktif güç ihtiyacı olan yük ya da yük grubunun bağlandığı baraya reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin tasarlanması gerekmektedir. Böylece yükün ihtiyacı olan reaktif güç, tesis edilen bu sistem tarafından karşılanır. Bu durum sonucunda, reaktif gücün iletim ve dağıtım hatlarını gereksiz yüklemesi engellenir ve yüke daha fazla aktif güç verilir. Ayrıca kompanzasyon sistemleri ile yük akımı ve şebeke gerilimi yaklaşık aynı faza getirilerek, iletim ve dağıtım sisteminin daha etkin ve verimli kullanılması sağlanır.[4].

Ülkemizde reaktif güç kompanzasyonu, bir takım yasal sınırlamalar ve düzenlemeler doğrultusunda ekonomik bir zorunluluk haline getirilmiştir. Sistem tasarımları bu sınırlamalar ve düzenlemeler gözetilmeden yapıldığı takdirde, tüketicilere bir takım cezai yaptırımlar uygulanmaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) 25639 sayı ve 10.11.2004 tarihli “Elektrik İletimi Arz Güvenirliliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nde bulunan 11. maddedeki sınırlar 23 Ekim 2010 tarihinden itibaren değiştirilmiş ve buna bağlı olarak da kompanzasyon ihtiyacı artmıştır. Bu yönetmeliğe göre [3, 5]:

“İletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda, sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde yirmiyi, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onbeşi geçemez.”

Elektrik şebekelerindeki, gerilim ve akım harmoniklerinin kabul edilebilir oranını belirleyen uluslararası standartlar IEE-519-1992 standartlarıdır. Buna göre yüzde olarak Toplam Harmonik Bozulma (%THB) değeri akım için %5 ve gerilim için %3 olarak belirlenmiştir [6]. Elektrik şebekesinin ve tesislerinin güvenliği açısından, sistemler tasarlanırken bu değerler göz önünde bulundurularak, harmonik kompanzasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde henüz tüketiciler açısından harmonik sınırlamalarla ilgili herhangi bir cezai yaptırım bulunmamaktadır. Ancak TEİAŞ, TÜBİTAK Uzay ve katılımcı üniversiteler bu konu hakkında son yıllardaki en önemli projelerden birisi olan “Güç Kalitesi Milli Projesi”ni hayata geçirerek güç kalitesi iyileştirme konusuna önemli bir katkı sağlamışlardır [7]. Ülkemizdeki harmonik standart değerlerine bakıldığında, sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş olan TS9882 numaralı “Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar” adlı standardın varlığı görülmektedir. Bu standart kapsamına giren elektrikli cihazlar arasında; pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir aletler, ışık kısıcılar ile radyo ve televizyon alıcıları bulunmaktadır. TS9882 standardı, genellikle ev tipi olan bu elektrikli cihazların, beslendikleri şebekede yol açtıkları bozulmalara karşı olası şartların belirlenmesi ve bu şartların pratik olarak uygulanmasına ait kurallara ve bozulmalarla ilgili deneylerin uygulanma yöntemlerine ışık tutmaktadır [8, 9].

Geleneksel olarak, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu Pasif Filtreler (PF) yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Pasif filtrelerin basit yapıları, düşük kurulum maliyetleri ve yüksek verimleri gibi üstünlüklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda bu tür filtreler yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Ancak reaktif güç talebinin çok hızlı değişmesi ve doğrusal olmayan yüklerin yüksek oranı karşısında pasif filtrelerin performansı yetersiz kalmaktadır. Ayrıca pasif filtrelerin besledikleri yüklerle rezonansa girebilme olasılıkları, sadece belirlenmiş frekanslardaki harmonikleri kompanze edebilmeleri, bu nedenle bastırılmak istenilen harmonik sayısı kadar filtreye ihtiyaç duyulması ve büyük boyutları bu filtrelerin en büyük olumsuzlukları olarak söylenebilir.

Mikroişlemci ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler, tam denetimli harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilen filtrelerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Aktif Güç Filtresi (AGF) olarak bilinen bu aygıtlar tam denetimli endüktif / kapasitif bir çıkış reaktif gücü vermesinin yanında, harmonik bileşenlerin filtreleme işlemini de

gerçekleştirmektedirler. Bu filtreler güç elektroniği elemanları ile oluşturuldukları için pasif filtrelere göre pahalıdırlar. Bununla birlikte, aynı anda birden fazla harmonik frekansı için ayarlanabilir olmaları ve reaktif güç kompanzasyonu gibi enerji kalitesini etkileyen diğer problemleri de ortadan kaldıracabilmeleri gibi özellikleri ile uzun vadede yatırım maliyetlerini de karşılayabilmektedirler. Ayrıca, işletme şartlarında değişiklik olması durumunda dahi, artı bir maliyet gerektirmeksizin harmonik bastırma işlemine devam edebilmektedirler. Bu durum AGF'nin en önemli üstünlüklerinden biridir [9].

AGF'ler güç devresi yapısına göre çeşitli alt başlıklarda incelenirler, ancak seri, paralel ve karma AGF olmak üzere temelde üçe ayrılırlar. Seri AGF yardımıyla gerilimdeki harmonikler ve gerilim düzenleme işlemleri gerçekleştirilebilir; paralel AGF (PAGF) yardımıyla ise akım bozulmalarının düzeltilmesi, çeşitli frekanslardaki harmoniklerin ve reaktif gücün kompanzasyonu işlemleri yapılabilir [1]. Seri AGF yapısının sisteme bağlanmak için gerek duyduğu seri transformatör bu yapının önemli sorunudur. Öte yandan PAGF yapısı şebekeye bir bağlantı endüktansı yardımıyla kolayca bağlanabilir. Bu AGF'ler arasında PAGF yapısı, seri AGF'ye göre daha kararlı yapıda olması, birçok filtrenin paralel bağlanabilme özelliğiyle daha yüksek akım ihtiyacına cevap verebilmesi ve aynı anda reaktif güç ve harmonik kompanzasyonu yapabilmesi gibi üstünlükleri ile en çok tercih edilendir [11]. Çeşitli birleşimlerle oluşturulan karma AGF'ler ise paralel ve seri yapıların performanslarını iyileştirmek adına kullanılmaktadırlar.

Bir PAGF dört kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar, bir evirici (akım beslemeli veya gerilim beslemeli), eviriciyi besleyen bir kaynak (akım veya gerilim kaynağı), eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı transformatörü veya endüktansı ve eviricinin uygun kompanzasyon akımını üretmesi için tasarlanmış bir denetim biriminden oluşur. Denetim birimi PAGF'nin dinamik performansını belirleyen en önemli kısımlardan biridir. Bu birimde eviricinin şebekeye enjekte edeceği referans akımlar elde edilir ve bu akımların evirici tarafından üretilebilmesi için anahtarlarının uygun şekilde tetikleme işlemi gerçekleştirilir. Referans işaretlerin hızlı ve doğru bir şekilde üretilmesi, PAGF'nin kompanzasyon performansını iyileştirecektir [12]. Geleneksel olarak referans işaretleri elde etme yöntemleri zaman alanı ve frekans alanı yöntemleri olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Bunların yanı sıra diğer modern yöntemler de mevcuttur [13].

Elde edilen referans akıma göre eviricide bulunan anahtarların uygun şekilde anahtarlanması ile PAGF tarafından kompanzasyon akımı üretilir. Akım denetimi veya akım modülasyonu olarak bilinen bu işlem denetim algoritmasının önemli bir parçasıdır. Akım denetimi ile evirici anahtarları için gerekli olan kapı darbeleri üretilmektedir [14]. Akım denetim yöntemleri genel olarak; doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğrusal yöntemlerde akım doğrudan denetlenemez ancak gerilim, darbe genişlik modülasyon (DGM) yöntemleri ile anahtarlanır ve bu yöntemlerde akım hatası işleme ve gerilim modülasyonu kısımları net olarak ayrılmıştır. Bu durum sabit anahtarlama frekanslı açık çevrim modülatörlerin (Sinüzoidal DGM, uzay-vektör DGM ve optimal DGM) üstünlüklerini de beraberinde getirir. Doğrusal yöntemler, doğrusal olmayan yöntemlere göre çıkış geriliminde daha az harmonik içeriği oluşturur. Histerisiz bant ve modern yöntemlerden olan yapar sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık denetleyici (BMD) tabanlı akım modülasyon yöntemleri ise doğrusal olmayan yöntemler arasına girmektedir. Histerisiz bant akım denetleyici (HBAD) kolay uygulanabilir ve mikro denetleyici yapılarına daha basit bütünleştirilebilir. Bu yöntemin en önemli olumsuzluğu, üretilen DGM için sabit ve tanımlı bir anahtarlama frekansı olmamasıdır. [15, 16].

Literatürde yapılan çalışmalarda, PAGF'nin güç devresi için farklı evirici yapıları önerilmiştir. Bunlar içerisinde iki seviyeli evirici yapısı en yaygın olarak kullanılan yapıdır. Son yıllarda, çok seviyeli eviricilerin bağlantı transformatörü kullanılmaksızın doğrudan şebekeye bağlanabilmeleri, harmonik açısından daha iyi bir çıkış gerilimi üretebilmeleri gibi üstünlüklerinden dolayı bu evirici yapıları AGF uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır [17].

[18]'de, üç-faz üç-tel ve dört-tel şebekeler için üç seviyeli gerilim beslemeli evirici tabanlı PAGF harmonik kompanzasyonu uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada akım denetim sistemi için uzay vektör darbe genişlik modülasyon (UVDGM) yöntemi ile birleştirilmiş bir histerisiz bant akım denetimi uygulanmıştır. Referans işaretler frekans alanı yöntemlerinden olan hızlı Fourier dönüşümü (HFD) yardımıyla oluşturulmuştur. Benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

[19]'da, bir AGF akım modülasyonu için yumuşak hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada; bulanık mantık, sinirsel-bulanık mantık, bulanık genetik algoritma yöntemleri ve geleneksel oransal integral (PI) yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarından AGF performansı incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

[20]'de, üç faz paralel-karma bir AGF için doğrusal olmayan bir denetim yöntemi sunulmuştur. d-q dönüşümü ile oluşturulan yöntem, akım denetimi ve DA tarafı gerilim denetimi olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Geleneksel PI denetleyici filtre giriş akımları ve DA bağ gerilimini denetlemek için kullanılmıştır. Denetim yönteminin verimliliği benzetim ve deneysel çalışmalar üzerinden gösterilmiştir.

[21]'de yüksek güçlü sürücü sistemleri için yedi-seviyeli PAGF benzetimi yapılmıştır. Çalışmada referans işaret çıkarma yöntemi olarak zaman alanı yöntemlerinden d-q yöntemi kullanılmıştır. Ayarlanabilir hız denetleyicilerinin oluşturdukları harmonik kirliliği bastırmak için önerilen bu AGF yapısının performansı benzetim sonuçları ve gerçek zamanlı sayısal benzetim sonuçları kullanılarak incelenmiştir.

Üç-faz dört telli bir AGF denetimi için p-q ve p-q-r teorilerinin uygulama sonuçlarının incelemesi [22]'de verilmiştir. p-q tabanlı yeni bir denetim algoritması sunulmuştur. Her iki yöntemin performanslarını gösteren benzetim çalışması sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

[23]'te AGF harmonik kompanzasyonu işlemi için referans işaret elde etmede YSA tabanlı denetleyici kullanan ve akım modülasyonu yöntemi olarak sayısal ve bantsız bir histerisiz denetleyici yapısı sunan çalışma verilmiştir. Bu çalışmada deneysel kurulum oluşturulmuş ve denetim sistemleri bir sayısal işaret işlemci (DSP) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin etkinliğini belirtmek için benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

[24]'te, üç fazlı bir PAGF için adaptif bir denetim algoritmasının gerçekleştirilmesi sunulmuştur. PAGF referans işaret elde etme yöntemi olarak adaptif-doğrusal-bileşen (Adaline) yöntemi kullanılmış ve akım modülasyonu histerisiz denetleyici yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, denetim sistemleri bir DSP içerisinde oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar ve MATLAB yazılımında elde edilen benzetim sonuçları önerilen yöntemin performansını göstermek için sunulmuştur.

[25]'te uçak elektrik sistemlerindeki yüksek ve değişken frekans aralığındaki işaretlerin harmonik kompanzasyonunu gerçekleştiren deneysel bir çalışma sunulmuştur. Temel frekans bileşeni saptanıp harmonik içerikli referans işaretleri ayırık zaman Fourier dönüşümü yardımıyla elde edilmiştir. Benzetim sonuçları MATLAB/SIMULINK ortamından elde edilmiştir ve zaman alanı yöntemlerinden olan d-q referans çatı yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem, deneysel kurulumda test edilmiştir ve sonuçlar sunulmuştur.

[26]'da, paralel kompanzasyon sistemlerine genel bir bakış sunulmuş ve mevcut zaman alanı ve frekans alanı yöntemlerine ek olarak referans işaretleri elde etmede hızlı cevap süresiyle ön plana çıkan karma genetik algoritma yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem YSA tabanlı bir oransal integral denetleyici içermektedir. Önerilen yöntemin etkinliği benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar gösterilerek açıklanmıştır.

[27]'de, üç-faz PAGF için gecikmesiz bir doğrusal olmayan denetim yöntemi deneysel olarak sunulmuştur. Önerilen sistemde zaman alanındaki yöntemin gerektirdiği filtre işleminden kaynaklanan gecikmenin de kompanzasyonu yapılmış ve dengesiz besleme gerilimi ve ağır yük şartlarında sistemin birim güç faktörüyle çalışması sağlanmıştır. Deneysel kurulumdan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

[28]'de, akım beslemeli PAGF yapılarındaki eviriciler için yeni bir yaklaşım olarak seçici harmonik yükseltme yöntemi sunulmuştur. Bu yöntem kullanılarak denetlenen akım beslemeli eviricili PAGF yapısı, orta gerilim yer altı kablo şebekesinden beslenen on iki darbeli doğrultucu yüklerinin oluşturduğu 11. ve 13. harmoniklerin yok edilmesi için kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar sistemin etkinliğini göstermek için sunulmuştur. Bu yöntem, endüstride maliyet olumsuzluğu nedeniyle kullanılmayan akım beslemeli PAGF yapılarındaki eviricilerin kVA oranlarının düşmesini sağlayarak uygulanabilirliklerinin artmasını sağlamak hedefine yönelik önerilmiştir.

[29]'da, seri ve paralel AGF birleşiminden oluşan birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyici performansı ile geleneksel seri ve paralel AGF performansları karşılaştırılmıştır. Benzetim modelleri MATLAB/SIMULINK ortamında hazırlanmıştır. Doğrusal olmayan yükler olarak, bir doğrultucu ve beslediği değişken momentli doğru akım makinesi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, IEEE-519 standartları çerçevesinde karşılaştırılmıştır.

[30]'da, kırsal bölgelerdeki şebekeler için önerilmiş tek faz beslemeli üç-fazlı PAGF tasarımı önerilmiştir. Üç faz şebekenin sağlanamadığı kırsal kesimde, üç fazlı yüklerin harmonik ve reaktif güç kompanzasyonlarını gerçekleştirilmek için önerilen AGF yapısının performansı benzetim modelinden ve deneysel kurulumdan elde edilen sonuçlar ışığında verilmiştir.

[31]'de, birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicisi için yeni bir denetim yaklaşımı sunulmuştur. Referans işaretleri elde eden denetim yöntemi, geliştirilmiş faz kilitleme devresi ve bir doğrusal olmayan adaptif filtreden oluşmaktadır. Bu yöntemin üstünlüğü matematiksel işlemleri en aza indirmesi ve faz kilitlemeyi, genlik ve hata sinyallerini aynı anda açığa çıkarmasıdır. DA bağ geriliminin denetlenmesi için BMD kullanılmıştır ve ilgili denetleyici harici bir ara yüz kullanılmadan Fortran kodları kullanılarak yapılandırılmıştır. Yöntemin etkinliğini gösteren benzetim sonuçları sunulmuştur.

[32]'de bir orta gerilim motor sürücüsü önünde kullanılan 12 darbeli diyot doğrultucu için tasarlanan yeni bir karma AGF yapısı önerilmiştir. Pasif bir filtre yapısı ile seri bağlı AGF yapısının oluşturduğu bu karma AGF, düşük maliyet, küçük boyut ve daha az ağırlık özellikleri ile öne çıkarılmıştır. 400 V ve 15 kW değerlerinde oluşturulan sistem, orta gerilim motor sürücü sistemi için küçük ölçekli bir modeli örneklemektedir. Oluşturulan deneysel kurulumdan elde edilen sonuçlar önerilen yapının performansını vurgulamak için sunulmuştur.

[33]'de, çıkışında bir L-C-L filtre kullanılan yüksek performanslı bir PAGF yapısı oluşturulmuştur. Çıkışta kullanılan L-C-L filtre sayesinde PAGF üstün performans özellikleri sergilemiş ve daha az kullanılan pasif filtre elemanları sayesinde harmoniklerin bastırılmasında referans işaretleri daha hızlı takip etmiştir. PAGF performansı hem benzetim modelinden elde edilen sonuçlar hem de deneysel sonuçlar elde edilerek sunulmuştur.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, harmonik filtreme ve reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili kavramların verilmesi, PAGF yapısının genel olarak tanıtılması ve PAGF'nin harmonik ve reaktif güç kompanzasyonundaki etkin performansının vurgulanması hedeflenmiştir. Modellenen sistemin içerdiği harmonik bozulma değerinin IEE-519-1992 standartlarının

önerdiği sınırlar içerisine düşürmek ve reaktif güç kompanzasyonu da yapılarak sistemin birim güç faktörü ile çalışmasını sağlamak amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, 3 fazlı bir PAGF'ye ait benzetim modeli MATLAB/SIMULINK ortamı kullanılarak oluşturulacaktır. Benzetim modeli, üç-fazlı bir şebeke, iki adet doğrusal olmayan yük ve PAGF'yi kapsayacak şekilde tasarlanacaktır. Eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı kullanılacaktır. PAGF'nin denetimi için gerekli olan referans akımlar, frekans alanında Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) yöntemi ve zaman alanında anlık reaktif güç teorisi (ARGT) ve senkron referans çatı yöntemi (SRÇY) kullanılarak elde edilecektir. Eviricinin akım denetiminin dayanıklı yapısından dolayı histerezis bant akım denetleyici ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Farklı referans akım çıkarma yöntemleri kullanan PAGF'nin dinamik performansını sergilemek için, farklı zamanlarda devreye alınan iki adet doğrusal olmayan yük kullanılacaktır. Bu durumlara ait benzetim sonuçları her bir referans akım çıkarma yöntemi için ayrı ayrı verilecektir. Ayrıca, bu yöntemlerin performanslarını vurgulamak için %THB açısından karşılaştırılmaları amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, elektrik enerjisinde güç kalitesi kavramı ve reaktif güç ve harmonikler gibi güç kalitesi problemlerinin tüketici ve üretici taraflarına yansıyan olumsuz etkileri ve bu problemlerin çözümü için kullanılmakta olan geleneksel yöntemler kısaca anlatılmıştır. Ayrıca günümüzde kullanımı yaygınlaşan AGF sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve literatürde AGF ile yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

İkinci bölümde reaktif güç, harmonikler ve bunların oluşturduğu problemleri gidermek için yapılan kompanzasyon işlemlerine değinilmiştir. Harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için geleneksel çözüm olan pasif filtre yapıları ve bağlantı topolojileri anlatılmıştır. Modern yöntemlere göre üstünlük ve olumsuzlukları kısaca verilmiştir. Ayrıca harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu, gerilim çukurları, gerilim dengesizlikleri ve dalgalanmaları gibi güç kalitesi problemlerine çözüm getiren, modern AGF yapıları sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, PAGF'nin denetimi için gerekli olan referans işaret çıkarma yöntemleri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, akım denetim yöntemine değinilmiştir ve modellenen sistemde kullanılan HBAD yapısı genel özellikleriyle sunulmuştur.

Beşinci bölümde, PAGF'nin benzetim modeline ait MATLAB/SIMULINK [34] blokları detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca PAGF benzetim modelinden elde edilen sonuçlar her bir referans akım çıkarma yöntemi için ayrı ayrı sunulmuştur.

Altıncı bölümde ise bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca bu alanda yapılabilecek çalışmalar ve öneriler sunulmuştur.

2. REAKTİF GÜÇ VE HARMONİK KOMPANZASYONU

2.1 Reaktif Güç

Reaktif güç, fiziksel anlamda iş yapamayan güç olarak tarif edilmektedir. Transformatörler, asenkron motorlar, doğrultucular, indüksiyon ve ark ocakları, kaynak makineleri, floresan lambalar, sodyum ve cıva buharlı lamba balastları gibi elektrikli cihazlar, çalışabilmeleri için şebekeden aktif gücün yanında reaktif güç de çekmektedir. Bu yükler, fiziksel olarak iş yapmayan reaktif gücü, periyodun bir yarısında şebekeden çekmekte, diğer yarısında ise şebekeye vermektedirler [35]. Şebeke ile yük arasında dolaşan bu gücün akım bileşeni, hattın empedansına bağlı olarak ısı kayıplarına, iletim hatlarının verimlerinin düşmesine, elektriksel üretim kapasitesinin verimli kullanılmamasına ve oluşacak ek yatırımlardan dolayı maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar, hem tüketici tarafını hem de üretici tarafını olumsuz yönde etkilemektedir [4].

Bir AA şebekesinde reaktif güç kavramı; şebeke gerilimi ve akımının reaktif bileşenlerinin çarpımları olarak bilinmektedir ve denk.(2.1)'deki gibi ifade edilir.

$$Q = VI\sin\varphi \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de:

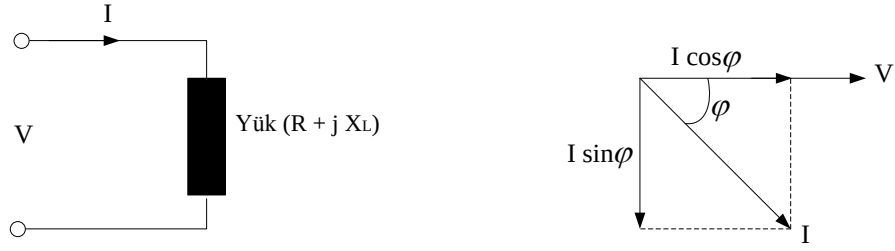
Q : Reaktif gücü simgeler ve birimi Volt-Amper Reaktif (VAR),

V : Şebeke geriliminin etkin değeridir ve birimi “volt”tur.

I : Şebeke akımının etkin değeridir ve birimi “amper”dir.

φ : Şebeke akımı ve gerilim arasındaki açıdır. Radyan veya derece olarak ifade edilir.

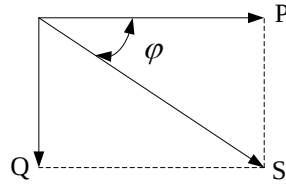
Şebekeye bağlı yükler endüktif veya kapasitif karakterlerde bulunabilirler. Şekil 2.1'de endüktif karakterli yüke ait devre ve bu devreye ilişkin akım-gerilim fazör diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1 Endüktif karakterli yük ve fazör gösterimi

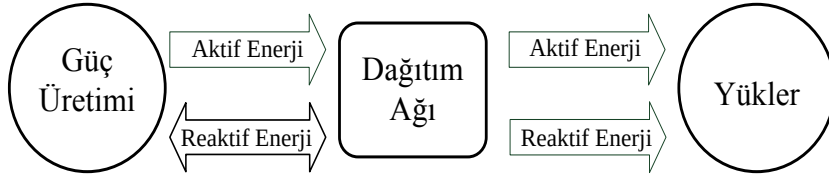
Şekil 2.1'deki örnek yük; direnç değeri R ve endüktif reaktans değeri X_L 'den oluşmaktadır. Böyle bir devrede, fazör diyagramından da görüleceği gibi akım gerilimden φ açısı kadar geridedir. Yani bu devrede, reaktif güç endüktif karakterdedir. Endüktif bir yükün kaynaktan çektiği reaktif güç pozitif, kapasitif bir yükün çektiği reaktif güç ise negatiftir.

Tüm AA elektrik şebekelerinde tüketilen aktif güç ve reaktif güç arasında Şekil 2.2'deki vektörel ilişki mevcuttur. Şekil 2.2'de P aktif güç ve Q endüktif karakterli reaktif güçtür. S ise aktif ve reaktif gücün vektörel bileşkesi olan görünür gücü belirtmektedir. φ açısının cosinus değeri şebekeye ait güç faktörünü (P/S) verir [36].



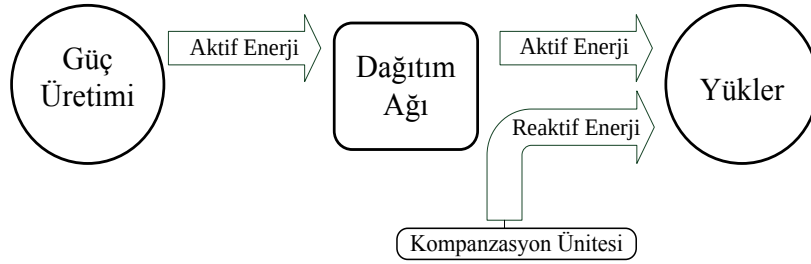
Şekil 2.2 AA şebeke güç vektörleri

Reaktif gücün elektrik şebekesinde dolaşmasının önemli ekonomik ve teknik sonuçları bulunmaktadır. Sabit güç P değeri için artan reaktif güç, daha yüksek görünen güç dolayısıyla daha yüksek bir akımın şebekeden çekilmesi anlamlarına gelmektedir. Şekil 2.3'te, reaktif güç kompanzasyonu yapılmayan bir sistemde reaktif gücün şebekedeki dolaşımı gösterilmiştir.



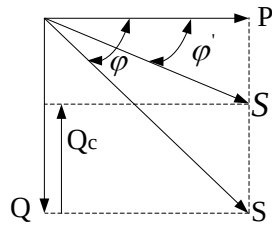
Şekil 2.3 Şebekedeki reaktif güç dolaşımı

Reaktif güç ihtiyacı nedeniyle şebekedeki gereksiz akım dolaşımını önlemek amacıyla, yüke yakın bir noktada reaktif gücün üretilip şebekeye verilmesinin büyük üstünlükleri vardır. Geleneksel reaktif güç kompanzasyon yöntemi olarak bilinen bu uygulamaya “güç faktörü düzeltilmesi” de denilmektedir. Şekil 2.4’te, kompanzasyon yapıldıktan sonra şebekedeki reaktif güç dolaşımı gösterilmiştir [37].



Şekil 2.4 Geleneksel kompanzasyon sistemi blok şeması

Yüke yakın bir noktaya bağlanan kompanzator şebekenin ihtiyaç duyduğu reaktif gücü sağlayacak ve bunun sonucunda daha düşük bir görünür güç bileşeni oluşacaktır. Şekil 2.5’te kompanzasyon sonrası güç üçgeni gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ϕ' açısı ilk haldeki ϕ değerinden daha küçük olduğu için sistemin güç faktörü olan $\cos \phi$ değeri “1”e yaklaşmıştır. Bu durumda aynı aktif güç değeri için şebekeden çekilen akım değeri azalmıştır. Buna bağlı olarak dağıtım ve iletim sistemlerinin daha verimli kullanılması sağlanır.



Şekil 2.5 Kondansatörlü şebekede güç faktörü iyileştirme

Tüm bu nedenlerden dolayı, ülkelerin iletim ve dağıtım sistemlerini denetleyen kurumlar, iletim ve dağıtım hatlarının verimliliği için, müşterilerin gereksinim duydukları reaktif güçleri ana şebekeden çekmelerine çözüm olarak, kendilerinin reaktif güç üretmesini istemektedir. Bu işlem bir yaptırım haline getirilmiştir ve reaktif güç sayaçları yardımıyla değerler ölçülerek müşterinin reaktif güç tüketimi faturalandırılmaktadır [6].

Reaktif güç kompanzasyonunun faydaları aşağıda sıralanmıştır:

- Şebekenin güç kapasitesinin artmasıyla birlikte ülke ekonomisi için önemli bir kazanç sağlaması,
- Akımın azalmasıyla ısı kayıplarının da beraberinde azalması,
- Tesisattaki gerilim düşümlerinin azalması,
- Harmoniklerin azalması,
- Tüketicinin elektrik faturasından tasarruf etmesi,
- İletken kesitlerinin azalması ile birlikte montaj boyutlarının azalması,
- Yüksek güç faktörü yardımıyla, bileşenlerin daha iyi kullanılması ve dolayısıyla elektrik tesisatının optimum hale getirilmesi,
- Elektrik enerjisinin kalitesizliği sebebiyle doğabilecek olan arıza risklerinin en aza indirgenmesi [6, 37].

2.1.1 Reaktif Güç Kompanzasyonu Yöntemleri

Yukarıda anılan üstünlükleri ve sistemler için gerekliliği nedenleriyle, reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili 20. yüzyılın başlarından beri çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk kompanzasyon işlemi 1914 yılında sabit kondansatörlerle gerçekleştirilmiştir. Teknolojideki gelişmelerle birlikte, şebekeye bağlanan yüklerin de karakteristik yapıları çeşitlenmiş ve endüktif yüklerin karmaşık bir şekilde devreye girip çıkmalarıyla sabit kompanzasyon uygulamaları yetersiz kalmaya başlamıştır. Bir reaktif güç denetim rölesi yardımıyla, kondansatör gruplarının kademeli olarak devreye alındığı geleneksel sistemlerde de ek harmonikler oluşmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek için, kondansatör gruplarının devreye alınma ya da çıkarılma denetimlerinin yarı iletken anahtarlar ile yapıldığı statik kompanzasyon sistemleri 1970’li yıllarda kullanılmaya

başlanmıştır. Endüstriyel alanlarda, reaktif güç ihtiyacının çok hızlı değişim gösterdiği ve harmoniklere duyarlı cihazların kullanımının yaygın olduğu durumlarda daha hızlı ve tam kompanzasyon yapabilecek gelişmiş kompanzatörlerin gerekliliği ortaya çıkmıştır [4-6].

2.2 Harmonikler

Elektrik güç sistemlerinde bulunan doğrusal olmayan yükler, iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli harmonik kirliliklere neden olmakta ve tüketiciye sunulan enerji kalitesini olumsuz etkilemektedir [38].

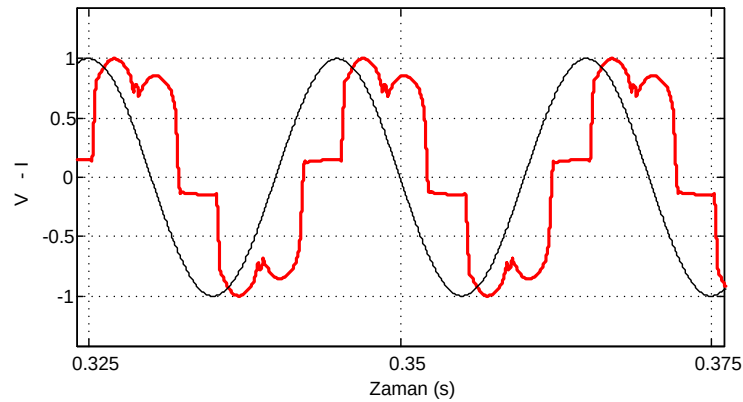
1893 yılında Hartford'da bir motordaki ısınma sorununa yoğunlaşan mühendisler, sorunun asıl kaynağının motoru besleyen güç sistemindeki rezonans olduğunu gözlemlediler. Sistemdeki bu rezonansa harmoniklerin neden olduğunu tespit ettiler. Bu tarihten önce Portland'da elektrikçiler, hat frekans harmoniklerinin oluşturduğu farklı bir iletim hattı sorunu ile uğraşmışlardı. Bu olaylar, kayıtlı ilk güç sistemi harmonik analizleridir. Avrupa'da bulunan elektrik üreticileri o dönemlerde yüksek frekans kullanmadıklarından dolayı bu sorunlardan etkilenmediler. Gelişen teknoloji ile birlikte harmonik problemi dünya çapında bir sorun haline gelmeye başlamıştır. Sonraki dönemlerde, harmonikli dalgaların tespit edilmesi ve engellenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [39, 40].

Elektrik tesislerinde, akım ve gerilimin dalga şekilleri sinüzoidal ve temel frekanslı bir değişime sahip olmalıdır. Bunun sağlanması için şebekeye bağlı yüklerin sinüzoidal bir kaynaktan beslenmesi ve doğrusal yapıda olması gerekmektedir. Doğrusal yüklerde akım ve gerilimin dalga şekli birbirleriyle uyumlu olmasına rağmen doğrusal olmayan yüklerde şebekeden çekilen akım ve gerilimin dalga şekli sinüzoidal yapıdan uzaklaşır.[39, 41]. Endüstride yaygın olarak kullanılan harmonik oluşturan doğrusal olmayan yükler ve diğer harmonik kaynakları aşağıda listelenmiştir.

- Doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, pota ocakları, gerilim regülâtörleri ve frekans çeviriciler,
- Motor hız denetim cihazları,
- Doğru akım ile enerji iletimi,

- Kesintisiz güç kaynakları,
- Elektrikli taşıtların yaygınlaşma olasılığıyla, bu cihazların akü şarj devrelerinin etkileri,
- Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan çeşitli yöntemler,
- Özel uygulamalarda kullanılan ve doğrudan frekans çeviricilerle beslenen momenti büyük, düşük hızlı motorlar,
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Statik VAR generatörleri,
- Elektronik balastlar,
- Fotovoltaik sistemler [6, 42, 43]

AA şebekesindeki sinüzoidal akım ve gerilim dalgaları periyodik dalga şekillerine birer örnek teşkil etmektedir. Tüm periyodik dalgalar kendi frekanslarının katlarındaki sinüs dalgalarının toplamına eşittir. Periyodik dalgayı oluşturan bu parçaların her birine harmonik denilmektedir. Temel bileşen olarak adlandırılan birinci harmonik, ana dalgayla aynı frekanstadır. İkinci harmonik ana dalga frekansının iki katı değerinde bir frekansa sahiptir. Özet olarak n. harmoniğin frekans değeri ana frekansın n katı değere sahiptir [39]. Ülkemizde temel frekans 50 Hz değerinde olduğu için bu frekans değerinde harmonikler 50 Hz değerinin tam katlarında oluşmaktadır. Şekil 2.6’da sinüzoidal yapı bir gerilim dalgası ve doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği harmonik içerikli yük akımı örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Sinüzoidal gerilim ve harmonik içerikli akım dalga şekli örnekleri

2.2.1 Harmonik Kompanzasyonu

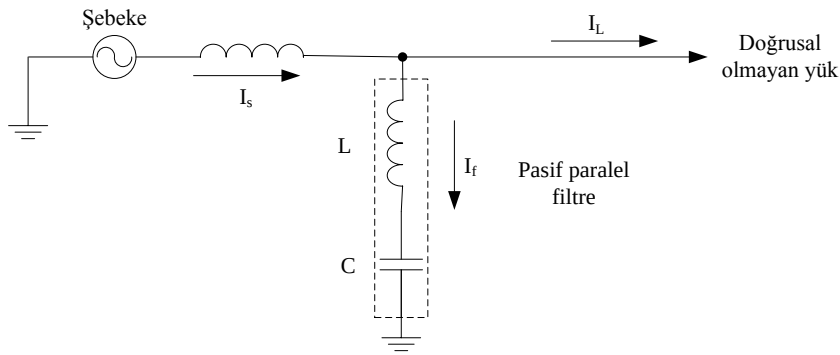
Yukarıda kısaca kaynakları ve temel özellikleri verilen harmonikler, elektriksel kirliliğin bir ifadesidir. Bir dalga şeklinin harmonik içeriğini gösteren %THB değerinin belirli sınırların üzerinde olmasıyla birlikte harmoniklerin verebileceği zararlar da doğru orantılı olarak artmaktadır. Harmoniklerin neden olduğu sorunlar genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Şebeke empedanslarıyla doğru orantılı olarak gerilim düşümlerinin artması,
- Kompanzasyon tesislerinde aşırı ısınma ve yüklenmelerden oluşan kondansatör arızaları (dielektrik yapılarında meydana gelen bozulmalar),
- Ölçü aletlerin yanlış ölçüm yapmaları,
- Şebekede meydana gelen rezonans olayları ve bunların neden olduğu aşırı gerilim ve akımlar,
- Yalıtım malzemelerinde delinme olaylarının meydana gelmesi,
- Elektrik cihazlarının ömürlerinin kısalması,
- Güvenlik kamera ve sesle uyarı sistemlerinin gürültülü ve parazitli çalışması [6, 38, 39, 42].

Anılan bu olumsuz etkiler ülke ekonomisi, elektrik üreticileri ve tüketiciler açısından son derece önemli maddi kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca harmonikler hemen hemen tüm elektriksel alıcılar üzerindeki kayıpları arttırmak ve verimi düşürmek gibi olumsuz etkiler gösterirler. Tüm bu olumsuzluklardan korunmak için harmoniklerin şebekede bastırılması yani harmonik kompanzasyonu yapılması gerekmektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan yüklerin yaygın olarak kullanıldığı endüstriyel alanlarda, harmonik kaynaklı sorunları çözmek için geleneksel olarak pasif filtreler kullanılmaktadır.

2.3 Geleneksel Pasif Filtreler

Yapılarının basit, yatırım maliyetlerinin düşük olması ve kullanım kolaylıklarından dolayı pasif filtreler uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Şekil 2.7’de pasif paralel filtrenin genel yapısı gösterilmiştir. PF bir kondansatör ve filtrelenecek harmonik frekansına göre ayarlanmış bir endüktanstan meydana gelir. İstenmeyen harmonik bileşenler düşük ayarlı bir empedans üzerinden toprağa aktarılır [3].



Şekil 2.7 Pasif paralel filtrenin genel yapısı

Pasif filtrelerin uygulamadaki en büyük sakıncası rezonans problemidir. Ayrıca filtrelenecek harmonik bileşene özel filtre tasarlandığından bu filtreler sabit kompanzasyon karakteristiğine sahiptirler. Bu durum sürekli değişen yük uygulamalarında filtre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Pasif filtreler sisteme özel seçilirler ve yükün değişmesi durumunda yeni yatırım maliyetleri gerektirmektedirler. Bu durum pasif filtreleme yöntemi kullanılacak çözümlerde, hat yapılandırması ile ilgili bilgilerin net olarak ölçülmesi ve tam olarak bilinmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yüksek güçlerde yapılacak güç faktörü iyileştirme işlemlerinde PF yapılarında kullanılan reaktör ve kondansatör elemanlarının da boyutları büyümekte ve sonuç olarak boyut problemi oluşturmaktadır [1, 10]. Bu sorunlara çözüm olarak son yıllarda güç elektroniği elemanları ve mikro işlemcilerdeki gelişmelere paralel olarak pasif filtrelerin sakıncalarını gidermek için AGF yapıları kullanılmaya başlanmıştır [11].

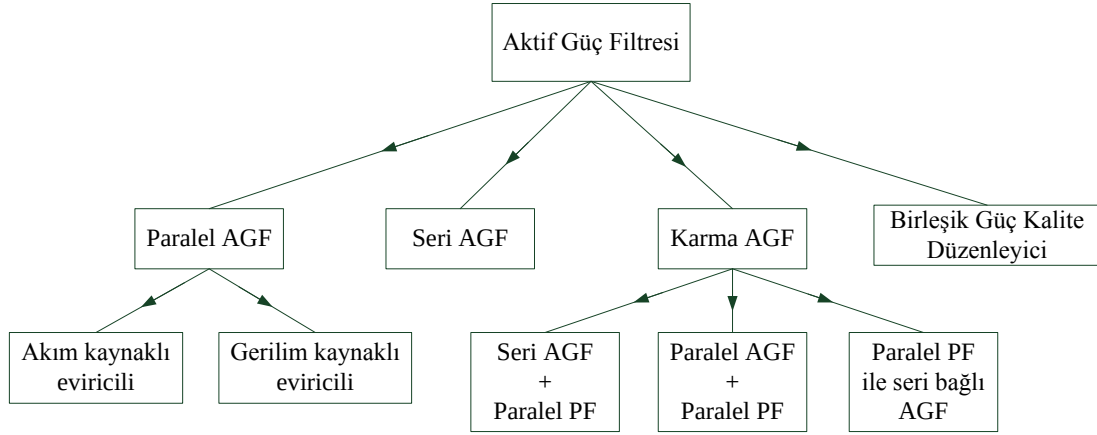
2.4. Aktif Güç Filtreleri

Pasif filtrelerin yukarıda bahsedilen sakıncaları AGF'lerin kullanılması ile tamamen giderilebilir. AGF'ler; yükün şebekeden çektiği harmonik bileşenlerin tamamına yakını bastırabilir ve buna ek olarak reaktif güç desteği de sağlayabilirler. AGF'lerin yatırım maliyetinin pasif filtrelere göre fazla olmasına karşılık, değişen yük şartlarına cevap verebilmesi, sisteme bağlantı kolaylığı ve güç kalitesi problemlerine çeşitli açılardan çözüm getirebilmesi gibi önemli özellikleri bu yapıları ön plana çıkarmaktadır [3].

AGF'nin harmonikleri bastırması ve reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında kullanılması 1980'li yılların başlarında önerilmiştir [44]. Bu tarihlerden sonra, AGF uygulamaları ve teorileri daha popüler ve ilgi çekici hale gelmeye başlamıştır. [45].

AGF yapıları, içeriğindeki eviriciyle, DA bağdaki kondansatör veya reaktör üzerinde oluşturulan gerilim veya akımı güç elektroniği anahtarları ile anahtarlayan ve bunun sonucunda oluşturduğu gerilim veya akımı şebekeye ileten güç elektroniği tabanlı aygıtlardır. AGF'nin yatırım maliyeti pasif filtrelere kıyasla yüksek olmasına karşın, şebeke empedansı ile rezonans riski taşımamaları ve pasif filtrelerde olduğu gibi sabit bir kompanzasyon karakteristiği sunmamaları, ileri seviye frekanslardaki harmonikleri kapsayan kompanzasyon özellikleri ile bu maliyet fazlalığını geri kazandırabilirler [10].

Şekil 2.8'den de görüleceği gibi AGF'ler güç devresi yapılarına göre seri, karma, paralel ve birleşik güç kalite düzenleyici olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca paralel AGF, güç katındaki evirici yapısına göre gerilim beslemeli evirici ve akım beslemeli evirici tabanlı olarak alt gruplara ayrılabilir. Ek olarak AGF yapıları, kullanılan eviricinin yapısına göre de çok darbeli eviricili, iki seviyeli eviricili ve çok seviyeli eviricili olarak alt sınıflara ayrılabilir. [10].



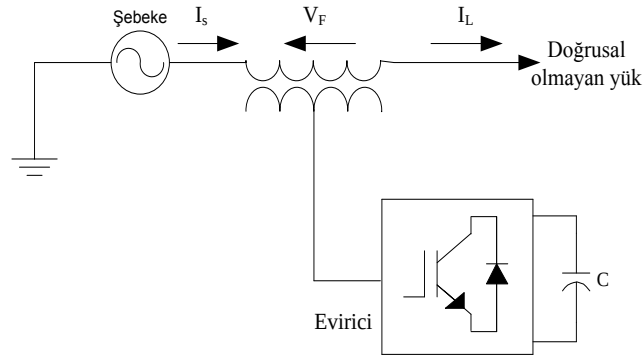
Şekil 2.8 Güç devre yapılarına göre AGF sınıflandırması

2.4.1. Güç Devresi Yapısına Göre Aktif Güç Filtrelerinin Sınıflandırılması

Güç devresi yapısına göre AGF'ler seri, paralel, karma ve birleşik güç kalite düzenleyicisi olmak üzere dört gruba ayrılırlar.

2.4.1.1. Seri Aktif Güç Filtreleri

Seri Aktif Güç Filtreleri (SAGF), şebekeye bir transformatör aracılığıyla yükten önce seri olarak bağlanırlar. Bu AGF'ler güç sistemindeki gerilim harmoniklerini filtrelemek için şebekeye harmonikli gerilimler enjekte ederler ve güç sistemlerinde gerilim regülasyonu, gerilim dengeleme, gerilim kırışmasının azaltılması ve gerilim tepe/çukurlarının yok edilmesi amaçları için kullanılırlar [2]. SAGF'ler harmonik gerilim kaynağı özelliği gösteren doğrusal olmayan yüklerin kompanzasyonunda etkili sonuçlar üretir [3]. Şekil 2.9'da SAGF'nin genel devre yapısı gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi SAGF'nin güç katında bulunan evirici şebekeye bir bağlantı transformatörü yardımı ile seri bağlanmıştır. SAGF'nin özel tasarlanmış bir transformatör kullanılarak güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Bu durum SAGF'nin en önemli olumsuzluğudur. SAGF şebeke gerilimine seri bağlı bir gerilim bileşeni oluşturduğundan denetlenebilir bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir [10].

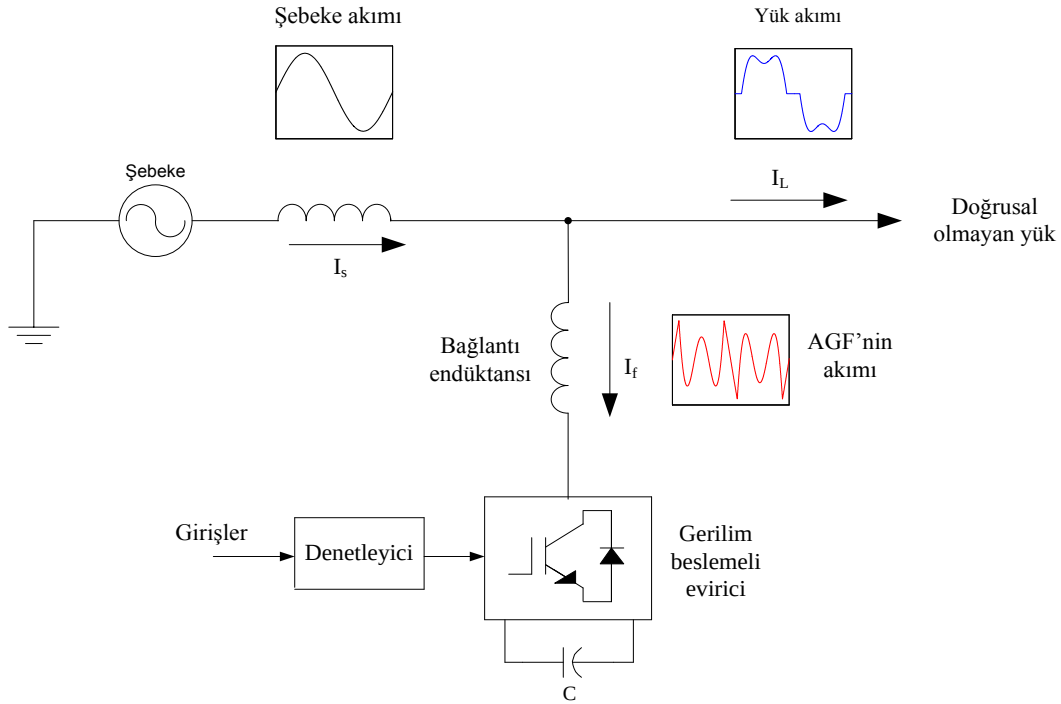


Şekil 2.9 SAGF'nin genel devre yapısı

SAGF yapısının, değişik güç kalitesi problemlerine çözüm getirebilmesi ve üstün filtreleme karakteristiği gibi özelliklerine rağmen güç sistemlerindeki değişmelere karşı duyarlı olması da bir başka olumsuzluktur [46].

2.4.1.2. Paralel Aktif Güç Filtreleri

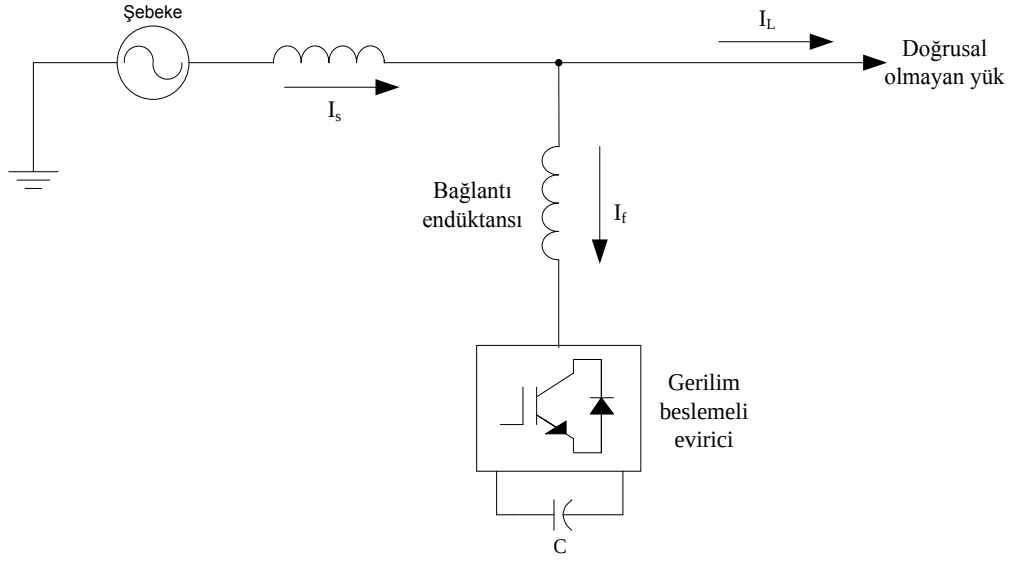
PAGF yapıları, şebekeye bağlantı endüktansı/transformatörü aracılığı ile yüke paralel olarak bağlanırlar. Denetim algoritmaları yardımıyla şebekeden çekilen akımdaki harmonik bileşenleri tespit ederek, bu bileşenlerle aynı genlikte fakat zıt fazda akımları üretmesi sağlanır. Böylece yük akımındaki bozulmalar yok edilerek, şebekeden çekilen akımın yaklaşık olarak sinüzoidal bir formda olması sağlanmış olur. Şekil 2.10'da PAGF'nin genel devre yapısı gösterilmiştir. Bu filtreler ayrıca statik VAR üretici (STATCOM) yapısında da kullanılarak, şebekenin gerilim regülasyonu ve iyileştirilmesi işlemlerini de yerine getirmektedir [47]. Ayrıca PAGF yapıları reaktif güç ve harmonik kompanzasyonunun birlikte yapılmasına olanak sağlamaktadırlar. Bu üstünlüklerinden dolayı PAGF'ler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [10].



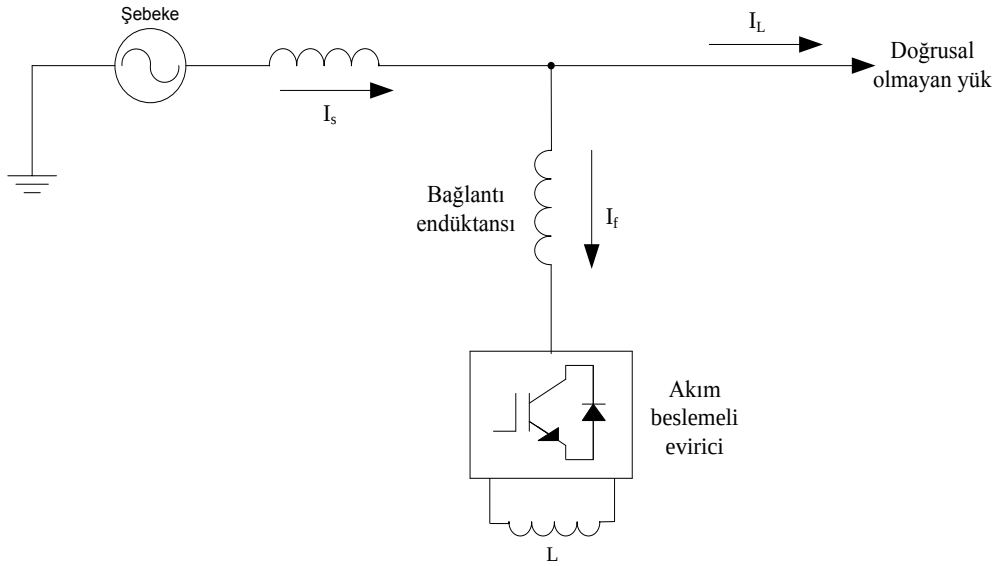
Şekil 2.10 PAGF'nin genel devre yapısı

PAGF'ler yapılarındaki eviricinin DA bağında kullandığı kaynağa göre akım beslemeli ve gerilim beslemeli eviricili olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gerilim beslemeli eviricide depolama elemanı olarak, DA bağda bir kondansatör bulunurken, akım beslemeli eviricide reaktör (bobin) bulunmaktadır. Şekil 2.11 (a) ve (b)'de sırası ile gerilim beslemeli ve akım beslemeli AGF'ye ait genel devre yapıları gösterilmiştir. Verimlilik ve yatırım maliyeti açısından gerilim beslemeli evirici tabanlı AGF, akım beslemeli evirici tabanlı AGF'ye göre daha üstündür [3]. Gerilim beslemeli eviricilerin üstünlükleri; DA bağlarındaki kondansatör gerilimini anahtarlamaları ve bağlantı endüktansı aracılığı ile şebekeye akım olarak aktarmaları ve ayrıca girişte kullanılan bu bağlantı indüktansının (reaktör) eviricinin kendi ürettiği harmonik bileşenleri bastırmada etkili olması olarak sıralanabilir.

Akım beslemeli eviriciler ise DA bağlarında reaktör içerirler ve direk olarak akımı anahtarlayıp bağlantı endüktansı üzerinden şebekeye iletirler.



a) Gerilim beslemeli evirici tabanlı PAGF'nin genel devre yapısı



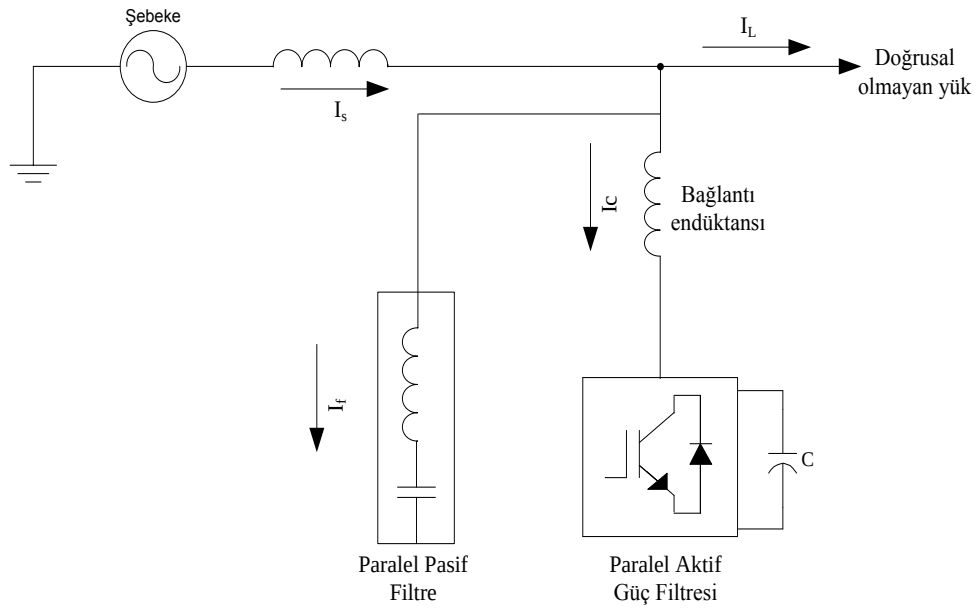
b) Akım beslemeli evirici tabanlı PAGF'nin genel devre yapısı

Şekil 2.11 Güç devresinde kullanılan evirici yapılarına göre PAGF'ler

Her iki AGF yapısı incelendiği zaman gerilim kaynaklı AGF'lerin daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Bunun nedeni, akım kaynaklı AGF'lerde yarı iletken anahtarların iletim sırasındaki kayıplarının ve DA bağındaki reaktördeki kayıpların gerilim kaynaklı AGF'lerle karşılaştırıldığı zaman daha fazla olmasıdır [10].

2.4.1.3. Karma Güç Filtreleri

Karma Güç Filtreleri (KGF), aktif güç filtreleri ve paralel pasif filtrelerin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan filtre yapılarıdır. Düşük dereceli harmoniklerin (5. ve 7.) kompanze edilmesinde kullanılan bu ek filtre yapısı ile AGF'nin maliyeti düşürülmekte ve verimi yükseltilmektedir [48]. Bu filtre yapısında harmonik filtrelemenin iki filtre arasında paylaşılması amaçlanır. Böylece maliyeti daha yüksek olan PAGF'nin anahtarlama kayıplarının azaltılması ve daha verimli çalışması sağlanmış olur. Şekil 2.12'de PAGF ve paralel pasif filtreden oluşan KGF'nin genel devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.12 KGF'nin genel devre yapısı

iletken anahtarın seri/paralel bağlanmasıyla biçimlendirilir. Bu tarz bir düzenlemede, seri ve/veya paralel bağlı yarı iletken anahtarların elektriksel ve termal karakteristiklerinin eşleşme zorunlulukları vardır [49].

Yüksek güçlü eviricilerin artan taleplerine cevap vermek için, endüstride ve araştırma alanında, çok darbeli eviricilere olan ilgi de artış göstermiştir [50]. Çok darbeli bir evirici sinüzoidal yapıya çok benzeyen bir merdiven dalga şeklini, özdeş evirici köprülerinin şebekeye faz kaymalı bir transformatör üzerinden bağlanmasıyla üretir. Çok darbeli eviricideki temel problem, karmaşık yapılı zig-zag faz kaymalı transformatör yapılarının sistem fiyatını büyük ölçüde arttırmasıdır [51].

Çok-darbeli eviricilere bir alternatif çok-seviyeli evirici yapılarıdır [52]. Çok seviyeli evirici yapıları genel olarak diyot kenetlemeli, kondansatör kenetlemeli ve kaskat çok seviyeli evirici olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bu üç evirici yapısı arasında bağımsız bir DA kapasitesine sahip kaskat çok seviyeli evirici, modüler devre yapısı ve yüksek işletme gerilimlerindeki yeterli performansı nedeniyle yüksek güçlü sürücülerde ve diğer sistemlerde geniş uygulama alanları bulmuştur [48, 49, 53, 54].

Çok seviyeli eviriciler içeren AGF yapıları, geleneksel iki seviye eviricili yapılara göre çıkışlarında daha çok gerilim seviyesi oluşturarak sisteme filtre tarafından aktarılacak öz harmonik değerinde bir düşüş meydana getirmektedir, böyle bir kullanımda maliyet bileşeni göz önünde tutulmalıdır [55, 56].

2.4.3. PAGF Temel Birimleri:

Bir PAGF; evirici, DA bağ kondansatörü, şebekeye bağlantıyı sağlayan bağlantı endüktansı ve bir denetim biriminden oluşur. Bu birimlere ait temel esaslar aşağıda sunulmuştur:

Evirici:

PAGF güç devresinin en önemli bileşeni eviricidir. İki seviyeli gerilim kaynaklı eviriciler; kolay uygulanması, maliyet azlığı ve denetim kolaylığı gibi üstünlüklerinden dolayı PAGF güç devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu eviriciler DA bağında

bir kapasitör içerirler. Bunun yanında DA bağında reaktör içeren akım kaynaklı eviriciler de doğrudan doğruya akımı anahtarladıkları için tepki sürelerinin hızlılığı ve reaktörün akımı sınırlayıp kısa devre koruması sağlama gibi özellikleriyle, AGF yapılarında kullanılmaktadır [10].

DA-Bağ Kondansatörü:

PAGF'nin kararlı hal performansını belirleyen en önemli şartlardan biri de DA bağ kondansatör uçlarındaki gerilimin, şebeke geriliminin maksimum (tepe) değerinden büyük olduğu bir referans gerilimde sabit tutulmasıdır. Bu nedenle DA bağ kondansatör geriliminin değeri PAGF için son derece önemlidir [1]. Sistemde meydana gelen aktif güç kayıpları şebekeden karşılanarak, DA bağ kondansatör gerilimi referans değerinde tutulur. DA bağ kondansatörünün değeri, eviricinin DA gerilimindeki dalgalanmaya göre belirlenmektedir. PAGF uygulamalarında maksimum dalgalanma %10 ile sınırlandırılmıştır. Dalgalanma düşük seçilerek kondansatör değeri belirlenirse kondansatörün değeri ve boyutu artacaktır. Bu durum hem sistemin boyutunun hem de maliyetinin artmasına neden olacaktır. Ters durumda ise dalgalanmanın az olduğu duruma göre AGF'nin kompanzasyon performansı düşecektir. Bu nedenle DA kondansatör değeri; AGF'nin maliyeti, boyutu ve kompanzasyon performansına bağlı olarak belirlenmelidir.

Bağlantı Endüktansı:

PAGF yapısındaki bağlantı endüktansı, evirici ile şebeke arasına bağlanmaktadır. Evirici çıkışında oluşan gerilim dalga şeklini, akım işaretlerine çevirme görevini yerine getirmektedir. Diğer bir deyişle gerilim kaynaklı eviriciyi adeta bir akım kaynağına dönüştürmektedir. Bağlantı endüktansı büyük seçildiğinde, filtreme performansını arttırmakla beraber PAGF'nin referans işaretleri izleyebilme performansını olumsuz etkiler. Ayrıca büyük değerli bağlantı endüktansı PAGF'nin çalışma bölgesini de sınırlamaktadır. Gereğinden küçük seçildiğinde ise kaynak akımına ek harmonikler ilave edilmektedir [1,3]. Bu durumlar göz önünde bulundurularak bağlantı endüktansının değeri belirlenmelidir.

Denetim Birimi:

PAGF yapısında denetim birimi iki alt sistemden oluşmaktadır. Evirici çıkışında, sisteme enjekte edilecek olan kompanzasyon akımını üretebilmek için referans işaretleri elde eden denetim sistemi ve evirici anahtarlarına DGM sinyallerini üreten akım modülasyonu sistemidir. Referans işaretleri elde etmek için kullanılan yöntemler frekans alanı ve zaman alanı yöntemleri olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir.

Frekans alanı yöntemleri hem tek faz hem de üç faz sistemler için uygundur. Temel olarak geleneksel Fourier analizinden elde edilmişlerdir ve sayısal işaret işlemcilerde (DSP) donanımsal uygulamalar geliştirmeye daha uyumlu olduklarından dolayı cevap hızları yüksektir. Fourier yöntemleri, geleneksel Fourier yöntemi, hızlı Fourier dönüşümü yöntemi (HFD) ve kısa zamanlı Fourier dönüşümü olmak üzere üçe ayrılırlar [57]. Bu tez çalışmasında frekans alanında HFD yöntemi kullanılacaktır.

Zaman alanındaki yöntemler, frekans alanındaki yöntemlere göre daha hızlı ve daha az hesaplama yükü gerektirirler [13]. Bu tez çalışmasında, genel olarak üç fazlı sistemler için kullanılan zaman alanındaki yöntemlerden anlık reaktif güç teorisi (ARGT) ve senkron referans çatı yöntemi (SRÇY), PAGF referans işaretlerini elde etmede kullanılacaktır.

3. REFERANS İŞARET ÇIKARMA YÖNTEMLERİ

AGF'lerin dinamik performanslarını belirleyen en önemli bileşenlerden biri de referans işaretlerin çıkarılması bileşenidir. Referans işaretler ne kadar doğru ve gecikmesiz bir şekilde çıkarılırsa AGF de buna paralel olarak sistemdeki harmonikleri tam ve hızlı bir şekilde kompanze edebilir. Literatürde referans işaret çıkarma yöntemleri, frekans ve zaman alanı yöntemleri olarak ikiye ayrılırlar [58]. Tez çalışmasındaki benzetim modelinde referans işaret elde etme denetim yapısında kullanılan yöntemler aşağıda detaylandırılmıştır.

3.1. Frekans Alanı Yöntemleri

Frekans bölgesinde gerçekleştirilen denetim yöntemlerinde, harmonik akım ya da gerilimin hızlı Fourier analizi yapılır ve AGF için gerekli olan referans işaretler bu analiz yardımı ile elde edilir. Ancak bir işaretin hızlı Fourier analizinin yapılabilmesi için tekrarlı bir fonksiyon olması gerekmektedir [3]. Hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak akımın temel bileşeni elde edilir. Daha sonra yükün çektiği toplam akımdan bu temel bileşen (ana harmonik) çıkarılır ve geriye kalan harmonik akımlar elde edilir. AGF'nin denetimi için gerekli olan referans işaretler ise elde edilen bu harmonik akımların tersi alınarak üretilir. Bu tez çalışmasında frekans alanında HFD yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem tek faz ve üç fazlı sistemlere uygulanabilir. Ancak bu yöntemde hesaplama yükünün fazla olması ve hesaplamaların bir periyot ve tam katları kullanılarak yapılması bir olumsuzluğudur. Bundan dolayı yöntem yavaş değişimli yükler için daha uygundur [3]. Herhangi bir işaretin ana harmoniği denk.(3.1) yardımı ile hesaplanabilir.

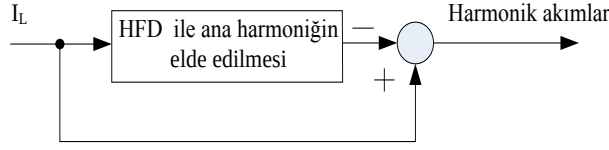
$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(i\omega t) + B_i \sin(i\omega t) \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de;

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(i\omega t) dt \quad (3.2)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(i\omega t) dt \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Şekil 3.1’de Fourier yöntemine ait genel blok şema gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Fourier yöntemi ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi

Frekans alanında yapılan referans çıkarma yöntemlerinin en önemli olumsuzluğu, hesaplama yoğunluğunun çok fazla olmasıdır. Harmonik içeriği arttıkça yöntemlerin cevap süresi de uzamaktadır. Ayrıca frekans alanı yöntemleri kullanılarak sadece harmonik kompanzasyon işlemi yapılabilmektedir. Kaynak akımı içerdiği harmoniklerden arındırılmakla birlikte, sistemin birim güç faktörü çekecek şekilde çalıştırılması gerçekleştirilemez.

3.2. Zaman Alanı Yöntemleri

Tez çalışmasında, benzetim modeline ait referans işaretleri elde etmek için zaman alanında ARGY ve SRÇY yöntemleri kullanılmıştır. Aşağıda bu yöntemlere ait matematiksel temeller sunulmuştur.

3.2.1. Anlık Reaktif Güç Teorisi Denetim Yöntemi

Akagi tarafından önerilen ARGY yönteminde [59], üç fazlı akım ve gerilimler denk.(3.4)’te verilen dönüşüm matrisi (Clarke Dönüşümü) kullanılarak iki bileşenli α - β durağan çatıya dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Bu bileşenler kullanılarak aktif ve reaktif güçler anlık olarak hesaplanır. Denk.(3.5) ve (3.6)’da güç hesabına ait eşitlikler gösterilmiştir. Eğer şebekeye bağlı yükler harmonikli bir akım çekiyorsa α - β eksenine göre hesaplanan aktif ve reaktif güçler, denk.(3.7)’de gösterildiği gibi hem DA hem de AA bileşenlere sahip olacaktır.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.6)$$

$$q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.7)$$

Denk.(3.6)'da verilen p aktif güç ifadesinde; $\bar{p}$ şebekeden yüke aktarılan anlık aktif gücün DA bileşenini, $\tilde{p}$ yük ile şebeke arasında değiştirilen anlık aktif gücün AA bileşenini gösterir. Denk.(3.7)'de verilen q reaktif güç ifadesinde; $\bar{q}$ çekilen reaktif gücün DA bileşenini, $\tilde{q}$ ise AA bileşenini gösterir. Denklemlerdeki V_α ve V_β ifadeleri, üç faz sinüzoidal dengeli kaynak geriliminin Clarke dönüşümü sonrası elde edilen α - β bileşenlerini i_α ve i_β kaynaktan çekilen üç-faz akımların Clarke dönüşümü sonrası elde edilen α - β bileşenlerini göstermektedir.

Denk.(3.6)'da gösterilen p aktif gücündeki AA bileşen harmonikleri içeren bileşendir. Referans akımların bastırılacak harmoniklerle eşit özellikli harmonikleri içermesi, p gücünün AA bileşeninin yüksek geçiren filtre (YGF) kullanılarak süzülmesiyle gerçekleşir ve eşitliklerde YGF'nin çıkışındaki filtrelenmiş işaret kullanılır. Bununla birlikte q gücü herhangi bir filtreleme işlemi uygulanmaksızın hesaba katılır ve AGF yapısının aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu da gerçekleştirebilmesi için q gücünün her iki bileşeninin de eşitliklere girmesi gerekir [58]. Denklem 3.8 yardımıyla aktif ve reaktif güçlerden referans akımlar α - β ekseninde elde edilirler:

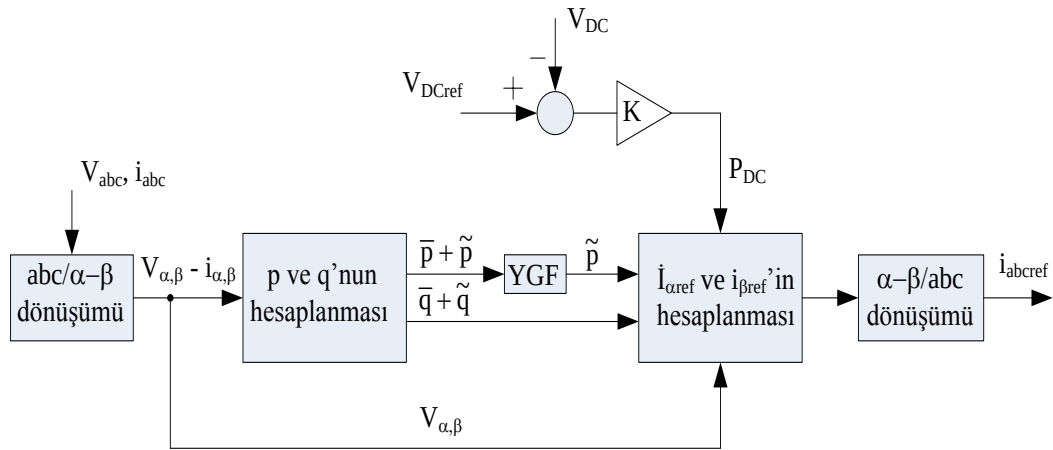
$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_{DC} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

α - β ekseninde elde edilen referans akımlar, denk.(3.9)'da gösterilen ters Clarke dönüşümü uygulamasıyla olağan üç-faz formlarına dönüşürler. Denk.(3.9) da gösterilen P_{DC} gücü, AGF yapısındaki anahtarlama kayıplarını ve DA bağdaki kondansatörden kaynaklanan kayıpları karşılamak için kullanılmaktadır. Yani AGF, DA-bağ yapısına

herhangi bir kaynak gerektirmeksizin bu kayıpları bağlı olduğu şebekeden karşılayabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Bu teorem sadece üç-fazlı gerilimlerin simetrik ve sinüzoidal olması durumunda geçerlidir. ARGT kullanılarak referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram Şekil3.2’de gösterilmiştir.

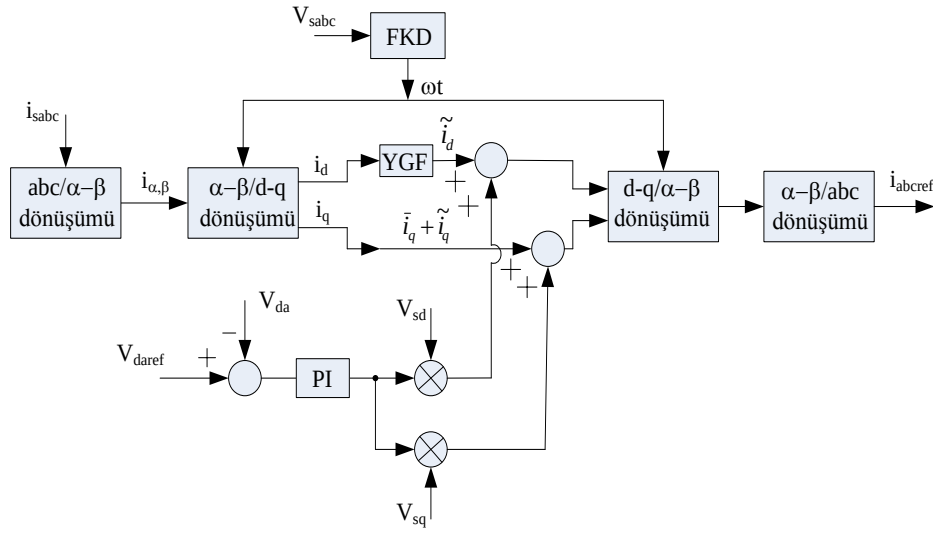


Şekil 3.2 ARGT ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi

Şekil 3.2’den görüldüğü gibi, P_{DC} kayıp gücünün karşılanması amacıyla DA-bağ gerilimi denetimi gerçekleştirilmektedir. Bu algorithmada sistemi besleyen üç faz kaynak gerilimleri dengeli ve saf sinüs şeklinde olmalıdır [60]. Algoritma sistemdeki değişimleri zamanın her anında alıp işlediği için cevap hızı ve performansı çok iyidir. Uygulaması kolay ve işlem yükü az olan bir yöntemdir. Bu nedenle uygulamada standart mikro denetleyiciler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. İçerdiği filtreler algoritmanın sahip olduğu olumsuzluklar arasındadır.

3.2.2. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi

SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, üç fazlı-şebeke gerilimleri Faz Kilitleme Devresine (FKD) girilerek şebekenin gerekli açısız frekans bilgisi elde edilir. Üç-faza ait akımlar Park dönüşümü yardımı ile DA değerlere (d-q eksen bileşenlerine) dönüştürülür. Böylece elde edilen d ve q bileşenlerinden referans işaretlerin oluşturulması için yüksek geçiren filtre kullanılarak temel harmoniğin çıkarılması kolaylaşır. Filtre çıkışlarından elde edilen d-q-eksen bileşenleri üç-fazlı büyüklüklere dönüştürülerek referans akımlar elde edilir [2].



Şekil 3.3 SRÇY ile yükün çektiği harmonik akımların elde edilmesi

Ölçülen üç-fazlı yük akımı (i_{Labc}) denk.(3.4)'te gösterilen Clarke dönüşümü ile α - β bileşenlerine dönüştürülür. α - β bileşenleri; denk.(3.10)'da verilen Park dönüşüm matrisi ile şebeke hızına kilitlenmiş ve ω hızı ile dönen d-q-eksen bileşenlerine dönüştürülür. Böylece yük akımının temel bileşeni DA işaretlere dönüşürken, harmonik bileşenlerin dönme hızları (frekansları) senkron hıza ve dönme yönüne göre kaymaktadır [2]. d-q-eksen bileşenlerine dönüştürülen akımlar (i_d ve i_q) denk.(3.11)'de gösterildiği gibi temel ve harmonik bileşen olmak üzere iki terimden oluşur.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Denklem 3.10’da, ω şebekenin açısal frekansı, denklem 3.11’de verilen, $\tilde{i}_d$; aktif akımın AA bileşeni, $\bar{i}_d$; aktif akımın DA bileşeni; $\tilde{i}_q$ reaktif akımın AA bileşeni ve $\bar{i}_q$ ise reaktif akımın DA bileşenidir. Bu yöntemde de aktif akımdaki harmonik içeriği temsil eden AA bileşen, YGF kullanılarak elde edilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonunun da birlikte yapılması amaçlandığı için reaktif akım filtrelenmeden işleme katılmıştır. Bu işlemler sonucunda filtrelenmek istenilen akım harmoniklerini ve ihtiyaç duyulan reaktif güç bilgisini içeren referans akımların d-q-eksen bileşenleri elde edilmektedir. Bu vektörlere denk.(3.12)’de gösterilen ters Park ve denk.(3.9)’de gösterilen ters Clarke dönüşümleri uygulanarak üç faza ait referans akımlar üretilmektedir. Ayrıca, DA-bağ kondansatör geriliminin sabit tutulması için bir PI denetleyici kullanılır. Denetleyicinin çıkışından elde edilen işaretler d-q-eksenindeki referans akımlara eklenmektedir [2]. Bu işlem yukarıda da anılan, PAGF’deki kayıp güçlerin karşılanması için yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

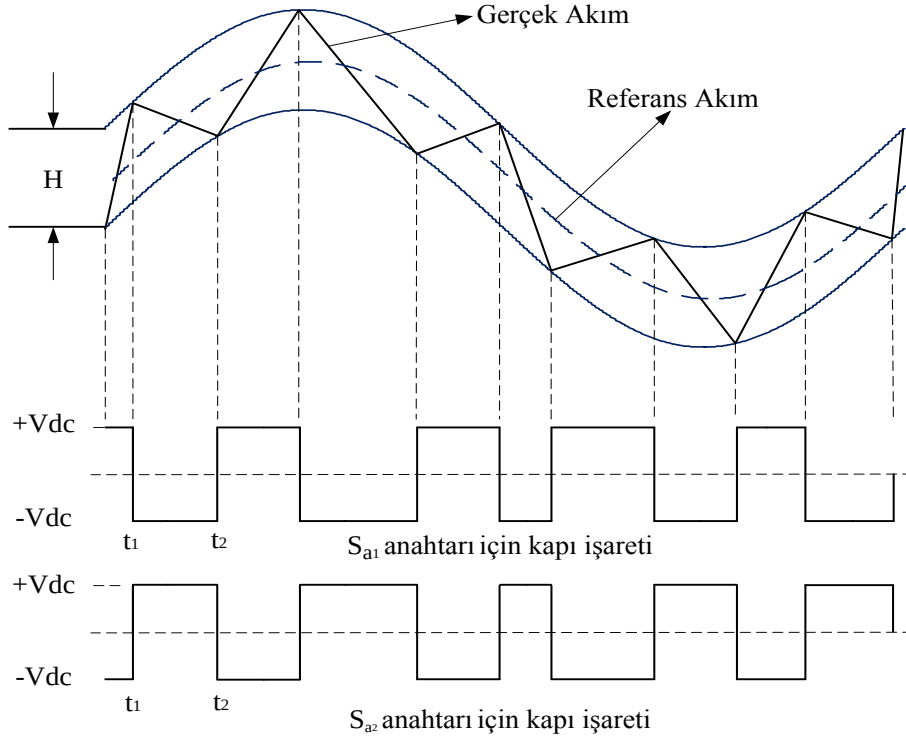
4. HİSTERİSİZ BANT AKIM DENETLEYİCİ

PAGF yapısındaki eviricinin anahtarlarının sürülmesi için gereken kapı işaretleri, akım denetleme yöntemleri yardımıyla elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında eviricinin anahtarları için kapı işaretleri, Histerisiz Bant Akım Denetleyici (HBAD) kullanılarak elde edilmiştir. Doğrusal olmayan bir akım denetim yöntemi olan HBAD, eviricinin çıkış akımının belirli bir bant aralığında kalmasını sağlar ve böylece doğrudan akım denetimini gerçekleştirir.

Bu yöntemde, referans akım ile gerçek akım karşılaştırılır ve elde edilen akım hatasına göre evirici için kapı işaretleri üretilir. Bu hata değerine göre bir karşılaştırmacı yardımıyla akımın belirli bir bant aralığında kalması sağlanmaktadır. Şöyle ki; akım hatasının değeri, belirlenen bant genişliği H olmak üzere, $+H/2$ ve $-H/2$ alt ve üst sınırları ile karşılaştırılır. Evirici anahtarlarına ait kapı işaretleri, bu karşılaştırma verilerinden yararlanarak üretilir [1,2]. Aşağıda eviricinin bir faz bacağı için kapı darbelerinin üretilmesi için gerekli işlem basamakları anlatılmıştır. Ayrıca şekil 4.1'den görüldüğü gibi, akımın üst sınıra ulaştığı t_1 anında akımın düşürülmesi için evirici çıkışının $-V_{dc}$ üretecek şekilde sürülmesi sağlanır ve S_{a2} anahtarı tetiklenir. Akımın alt sınıra ulaştığı t_2 anında ise akımın yükseltilmesi için evirici çıkışının $+V_{dc}$ üretecek şekilde sürülmesi sağlanır. Bu durumda S_{a1} anahtarı tetiklenir. Pratikte bu durum, üst anahtar için elde edilen kapı işaretinin mantıksal “değil” işleminden geçirilip alt anahtara uygulanması ile elde edilmektedir. Böylece referans akımın belirlenen histerisiz bant aralığında tutulması sağlanmış olur. Diğer fazların kapı işaretleri de benzer olarak elde edilir. İlgili fazlara ait akım hataları HBAD girişine uygulanır ve çıkışta kapı işaretleri üretilmiş olur. Her faz için sadece üst anahtara ait işaret elde edilir alt anahtar için mantıksal “değil” işlemi uygulanır.

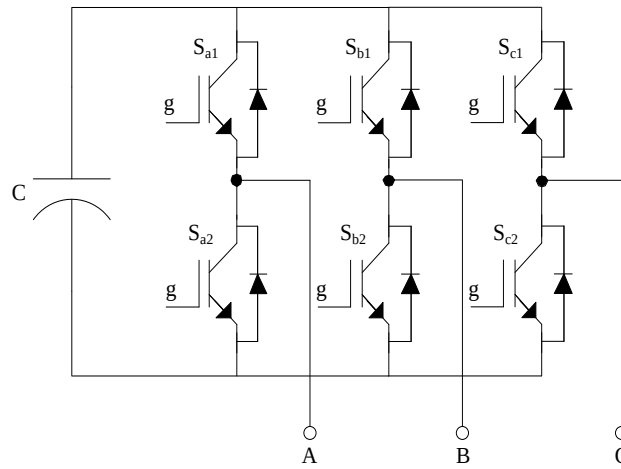
- $i_{f-a} > i_{ref-a} + H/2$ ise üst anahtar (S_{a1}) tetiklenmez, alt anahtar (S_{a2}) tetiklenir.
(Şekil 4.1 t_1 anı)
- $i_{f-a} < i_{ref-a} - H/2$ ise üst anahtar (S_{a1}) tetiklenir, alt anahtar (S_{a2}) tetiklenmez.
(Şekil 4.1 t_2 anı)

Şekil 4.1’de anahtarlama işaretlerinin üretilmesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



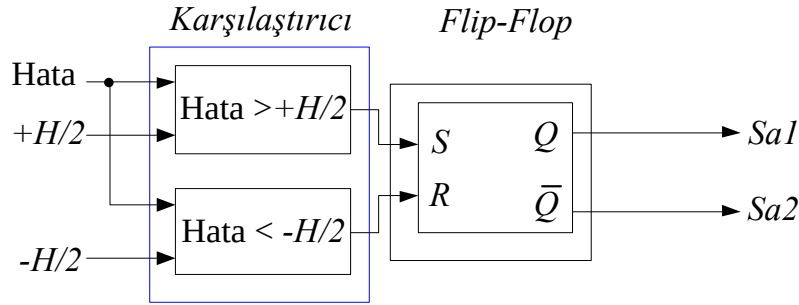
Şekil 4.1 HBAD ile kapı işaretlerinin üretilmesi

Bu tez çalışmasında modellenen PAGF yapısındaki eviriciye ait devre şeması şekil 4.2’de gösterilmiştir. Oluşturulan kapı işaretleri anahtarların kapı (g) uçlarına uygulanır.



Şekil 4.2 İki seviyeli gerilim beslemeli evirici devre şeması

HBAD yapısı uygulamada, mantıksal karşılaştırma işletmenleri ve flip-flop mantık işletmeni yardımıyla da oluşturulabilir. Şekil 4.3'te HBAD yapısının mantıksal işletmenlerle elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 HBAD yapısının mantıksal işletmenlerle gerçekleştirilmesi

Tablo 4.1 Flip-flop doğruluk tablosu

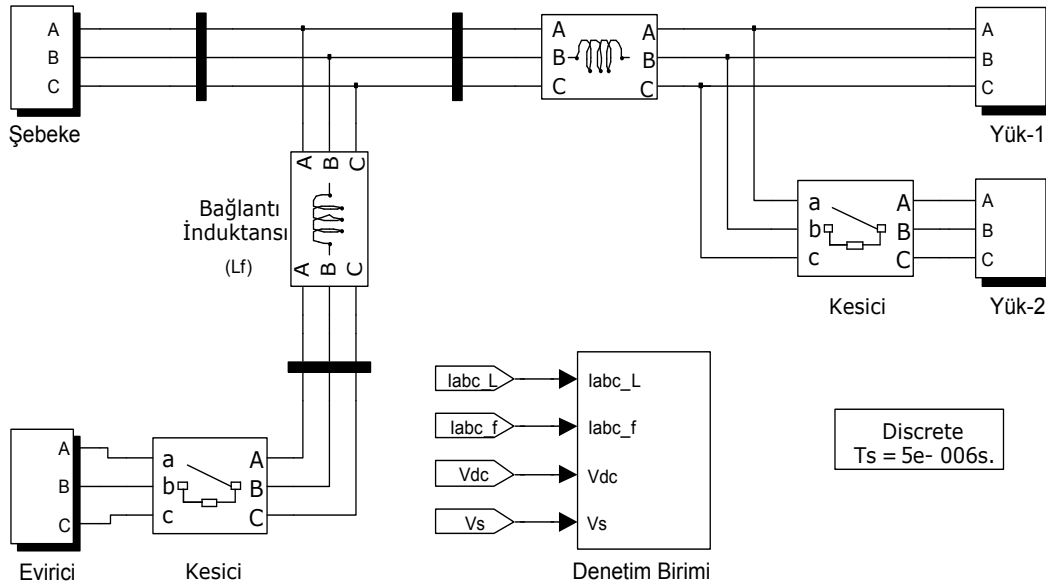
S	R	Çıkış
0	0	Mevcut durumun korunması
1	0	$Q = 1$ $\bar{Q} = 0$
0	1	$Q = 0$ $\bar{Q} = 1$
1	1	Mümkün olmayan durum

Flip-flop mantıksal işletmeni, bir “VE” ve “VEYA DEĞİL” mantık kapılarının birleşiminden meydana gelmiştir ve doğruluk tablosu, tablo 4.1’de gösterilmiştir. Yukarıda anlatılan karşılaştırma işlemleri ve kapı işaretlerinin elde edilmesi flip –flop işletmeninin S (Set) ve R (Reset) çıkışları kullanılarak elde edilir [61].

HBAD yapısında, seçilen bant aralığına göre anahtarlama frekansı değişkenlik göstermektedir. Bandın dar seçilmesi durumunda anahtarlama işaretlerinin sıklığı artmakta böylece eviricinin referans akımları daha iyi takip edebilmesi sağlanmaktadır. Bununla beraber yarı iletken anahtarlarda meydana gelen anahtarlama kayıpları da artmaktadır. Bant aralığının geniş seçilmesi durumunda ise evirici çıkışındaki akımların harmonik kirliliği artmakta ve AGF’nin dinamik performansı kötüleşmektedir.

5. BENZETİM MODELİ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

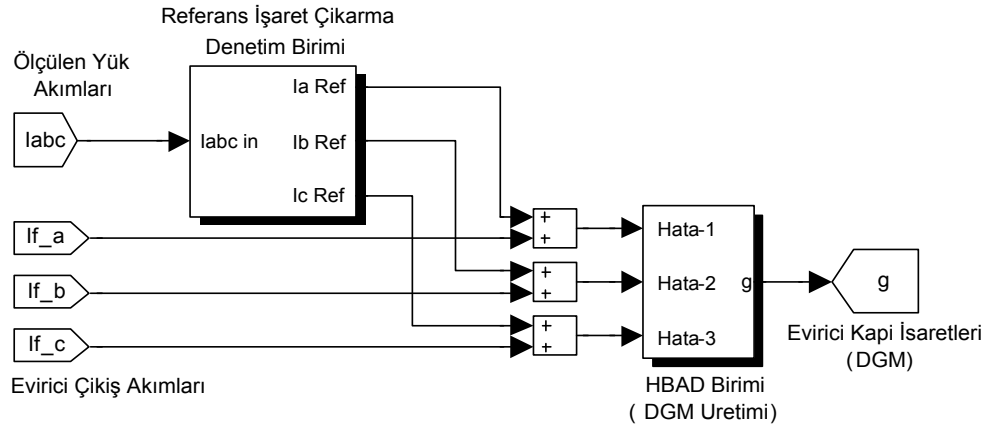
Bu bölümde, MATLAB yazılımında oluşturulan 3-fazlı, 3-telli iki seviyeli gerilim beslemeli evirici tabanlı PAGF'nin benzetim modelinden elde edilen sonuçlar, farklı yük ve farklı referans işaret çıkarma yöntemleri kullanılarak sunulacaktır. MATLAB/SIMULINK blokları ile oluşturulan benzetim modeli Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi benzetim modeli; üç-fazlı bir şebeke, evirici, bu eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı, doğrusal olmayan yükler ve evirici akımının denetimi için bir denetim biriminden oluşmaktadır.



Şekil 5.1 PAGF'nin benzetim modeli

Bu benzetim modeli yardımı ile PAGF'nin harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu performansı, farklı referans işaret çıkarma yöntemleri ve farklı yük karakteristikleri kullanılarak ayrı ayrı incelenmiştir. Bu amaçla, referans işaretleri çıkarmak için HFD, ARGF ve SRÇY kullanılmıştır. Yük olarak ise R-L yükünü besleyen iki adet 6 darbeli köprü diyot doğrultucu kullanılmıştır. PAGF'nin benzetim sonuçları, $t=0s$ anından itibaren doğrusal olmayan yük-1, $t=0.15s$ anından itibaren PAGF ve $t=0.30s$ anından itibaren ise doğrusal olmayan yük-2 devreye alınarak elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında eviricinin akımları HABD yöntemi ile denetlenmiştir. Referans işaretleri elde etme ve HABD ile kapı işaretleri ile kapı işaretlerinin üretilmesine ilişkin benzetim bloğu Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu amaçla referans akımlar ile eviricinin akımları karşılaştırılır ve elde

edilen hata işaretleri HBAD'ye giriş işareti olarak uygulanır. HABD ile eviricinin akımlarının referans değerlerini izlemesi için gerekli kapı işaretleri üretilir. Benzetim çalışmasında iki seviyeli evirici kullanıldığı için toplam 6 adet kapı işaretine ihtiyaç vardır. Bu nedenle iki seviyeli HABD kullanılarak toplam 6 adet kapı işareti üretilir. Şekil 5.2'den görüldüğü gibi evirici çıkış akımlarının yönü şebekeden eviriciye doğru seçildiğinden hata akımları referans ve gerçek akımların toplamı şeklinde elde edilmiştir. Bu çalışmada sunulan bütün benzetim sonuçlarında, şebeke geriliminin dengeli olduğu kabul edilmiştir. Benzetim modeline ait parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.



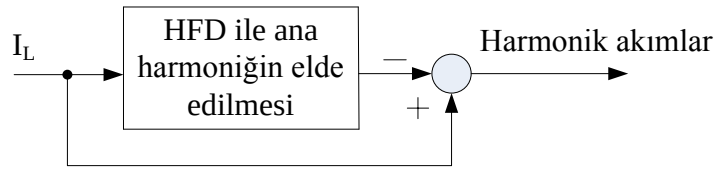
Şekil 5.2 Evirici kapı işaretlerinin elde edilmesine ait benzetim blokları

Tablo 5.1 Benzetim modeline ait parametreler

PAGE	
DA-bağ kondansatörü	: 3.3 mF
Bağlantı endüktansı	: 3 mH
Histerisiz bant aralığı	: 0.1
Şebeke	
Şebeke gerilimi	: 380 V
Şebeke frekansı	: 50Hz
Yük Özellikleri	
Yük-1: 6-darbeli diyot doğrultucu	
Yük direnci (R_1)	: 10 Ω
Yük endüktansı (L_1)	: 15 mH
Yük-2: 6-darbeli diyot doğrultucu	
Yük direnci (R_2)	: 15 Ω
Yük endüktansı (L_2)	: 25 mH

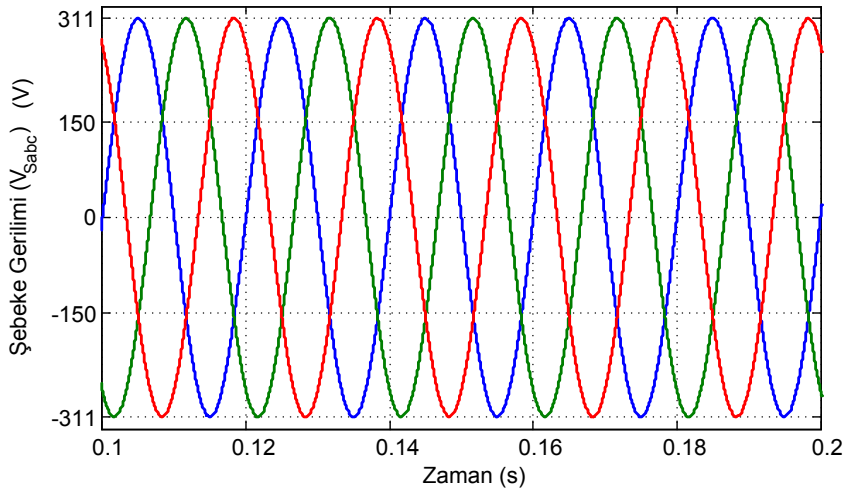
5.1. Hızlı Fourier Dönüşümü Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Bu bölümde HFD yöntemi kullanılarak PAGF'nin denetiminin gerçekleştirildiği benzetim sonuçları verilecektir. Şekil 5.3'ten de görüldüğü gibi bu yöntemde, yük akımının şebekeden çektiği ana harmonik bileşeni tespit edilerek geriye kalan harmonik akımlar elde edilir. Bu amaçla, ölçülen yük akımının temel bileşeni HFD ile elde edilir. Hesaplama yükünü azaltmak için, HFD ile her bir harmonik akımını ayrı ayrı hesaplamak yerine, sadece yük akımının temel bileşeni HFD ile elde edilmiş ve toplam akımdan çıkarılarak yük akımının geriye kalan harmonik bileşenleri elde edilmiştir [48].



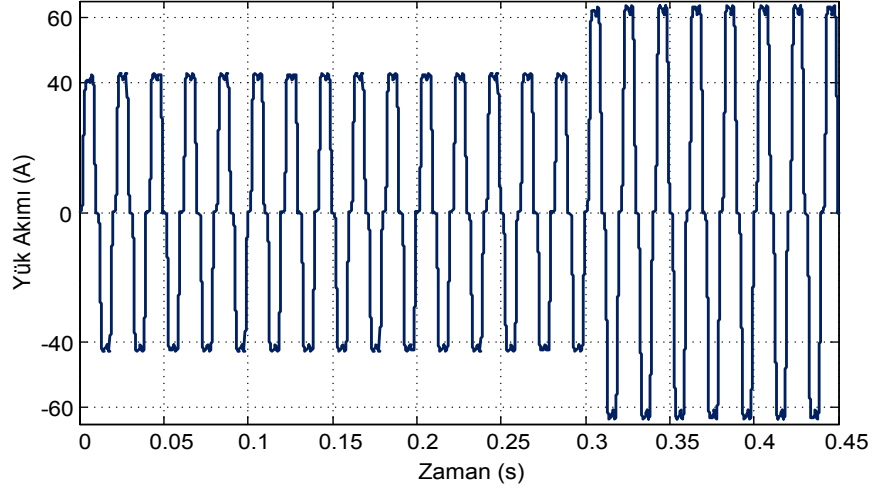
Şekil 5.3 HFD genel blok şeması

PAGF'nin dinamik performansı şebeke gerilimi dengeli varsayılarak incelenmiştir. Şekil 5.4'te üç fazlı şebeke gerilimi gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, gerilimler dengeli ve yaklaşık olarak 311V'luk tepe değere sahiptirler.



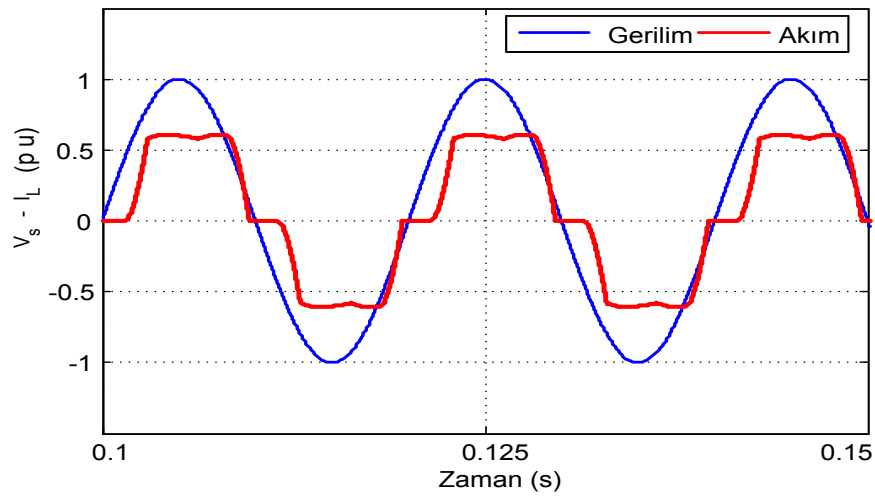
Şekil 5.4 HFD - Üç faz şebeke gerilimleri

Şekil 5.5'te, bir faza ait doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın dalga şekli gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi $t=0.3s$ anında birinci doğrusal olmayan yüke ek olarak ikinci yük devreye alındığı için akımda artış meydana gelmiştir. Ayrıca yüklerin şebekeden çektiği akımın dalga şeklinin sinüzoidal olmadığı da grafikten görülmektedir.

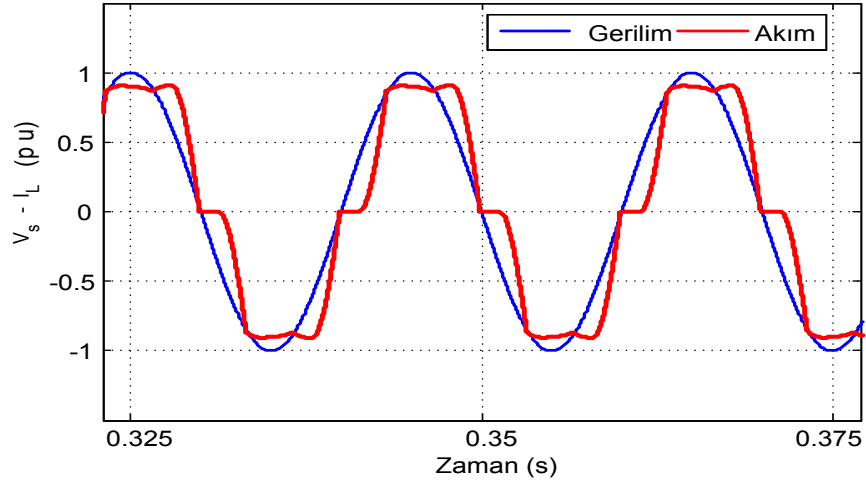


Şekil 5.5 HFD - Bir faz için yük akımının dalga şekli

Şekil 5.6 (a)'da ilk yük devredeyken ve Şekil 5.6 (b)'de ikinci yükün de devreye alındığı durumlara ait, yük akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz ilişkisi birim değer cinsinden gösterilmiştir. Her iki şekilde görüldüğü gibi, yükler şebekeden harmonikli akım çekmelerinin yanında reaktif güç de çekmektedirler.



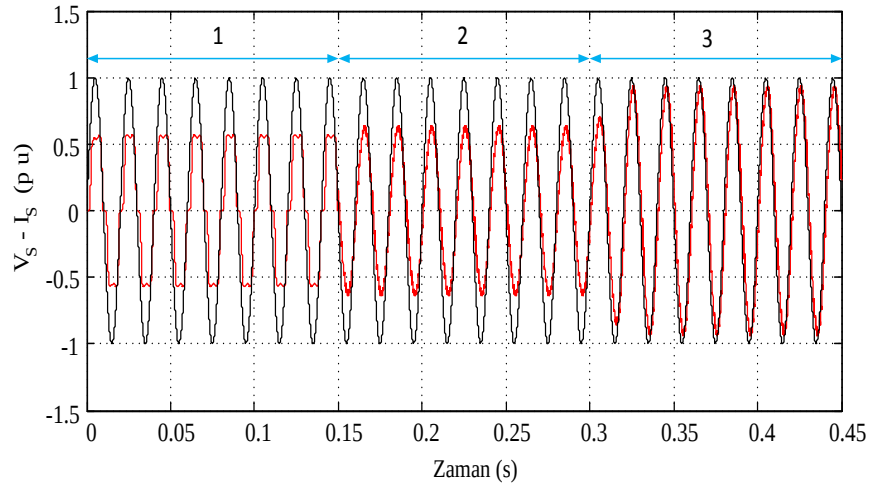
(a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım



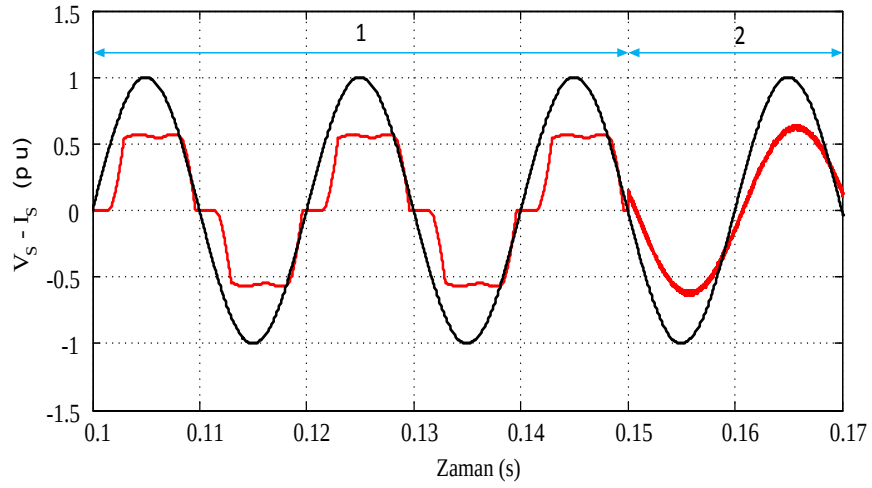
(b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım

Şekil 5.6 HFD - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki

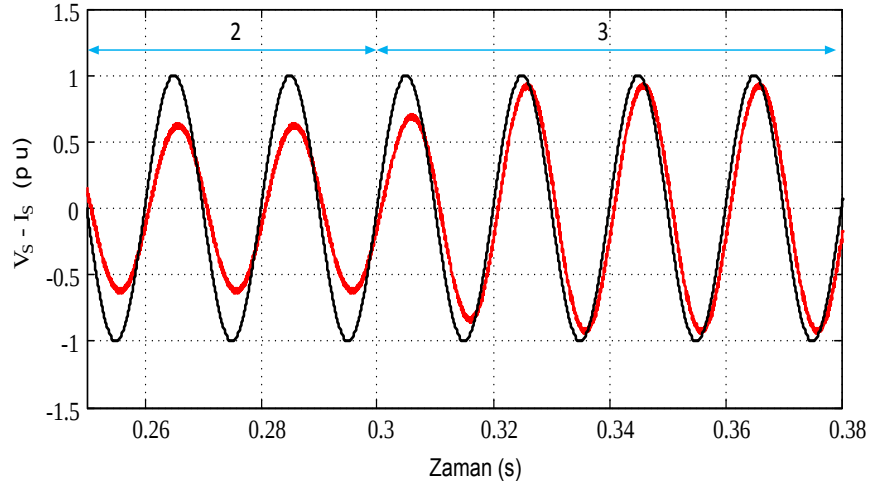
Şekil 5.7’de kaynak akımının birim değer cinsinden dalga şekli, PAGF devreye alınmadan önce ve alındıktan sonrası için gösterilmiştir. Şekilde, 1 nolu kısım sadece birinci yükün devrede olduğu; 2 nolu kısım birinci yük ve PAGF’nin aynı anda devrede olduğu ve 3 nolu kısım ise birinci yük ve PAGF’ye ilaveten ikinci yükün de devreye alındığı durumları göstermektedir. Bu durumların daha ayrıntılı görülebilmesi için Şekil 5.7 (a), Şekil 5.7 (b) ve Şekil 5.7 (c)’de zaman ölçeği küçültülerek şekiller ayrıca verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, 2 no’lu bölümün başında PAGF devreye alınarak kaynak akımının yaklaşık olarak sinüzoidal olması sağlanmıştır. 3 no’lu bölümün başlangıç anında ikinci yük devreye alınmış ve PAGF aynı şekilde kaynak akımını sinüzoidal formda tutmayı başarmıştır. Bunun yanında birim güç faktörlü çalışma elde edilememiştir.



(a) Benzetim süresi boyunca şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki



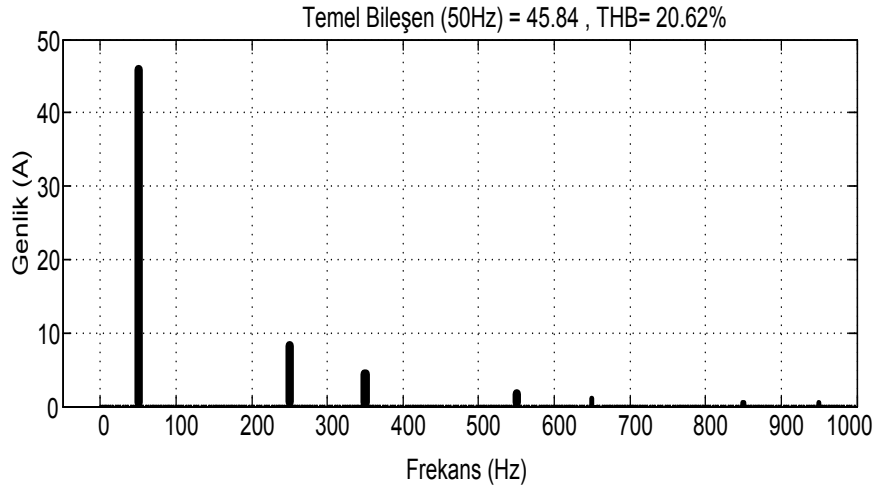
(b) 1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim



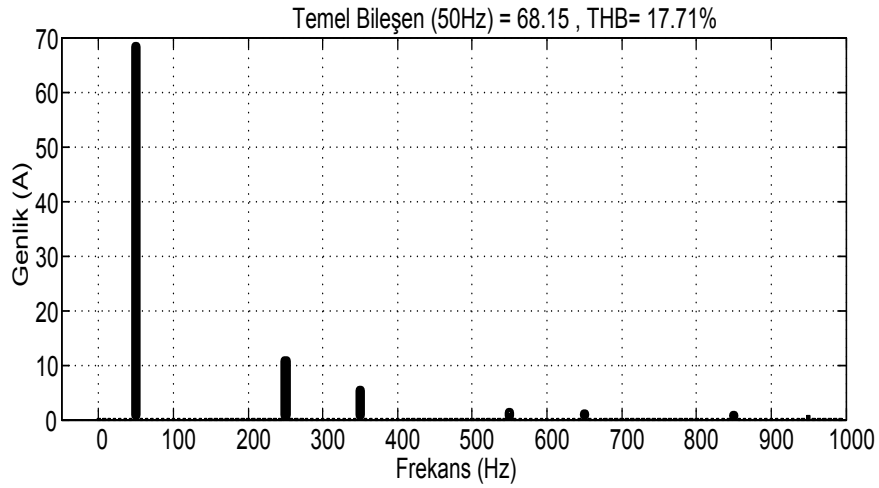
(c) 2 ve 3 nolu bölümler için detaylı gösterim

Şekil 5.7 HFD kullanan PAGF'li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.8 (a) ve (b) gösterimlerinde sırasıyla, sadece birinci indüktif yükün devrede olduğu durum için ve birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için yük akımının THB'si yüzde olarak verilmiştir. THB'nin, birinci yük devredeyken %20.62 ve iki yük devredeyken ise %17.71 olduğu görülmektedir.



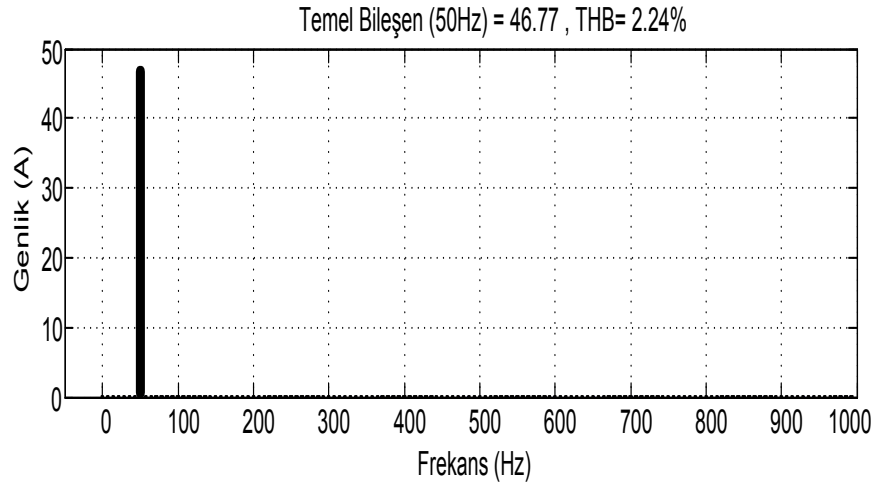
(a) Birinci yükün akımının THB'si



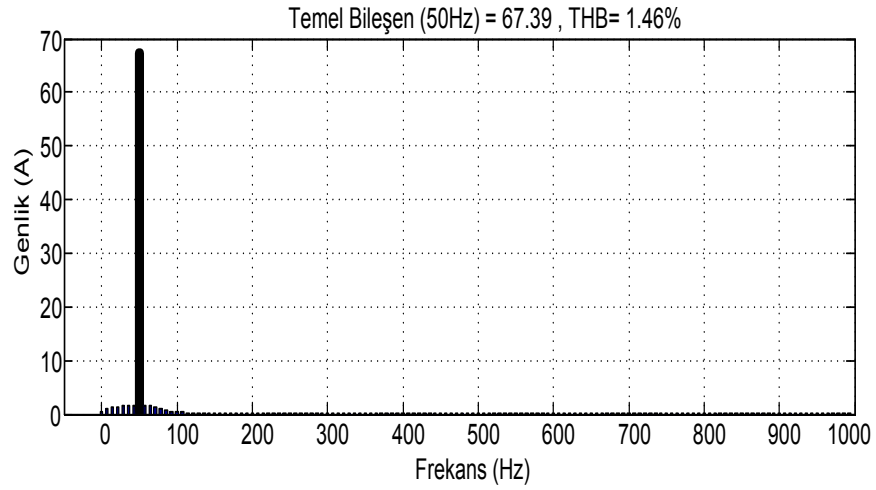
(b) Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB'si

Şekil 5.8 HFD - Yük-1-2 akımlarının THB'leri

Şekil 5.9 (a) ve (b)'de PAGF devredeyken sırasıyla, sadece yük-1 ve her iki yükün devrede olduğu durumda şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, birinci durum için şebeke akımının harmonik içeriği %2.24'e, ikinci durum için ise % 1.46'ya düşülmüştür. HFD yöntemi ile şebeke akımının %THB değeri, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin altında tutulmuştur.



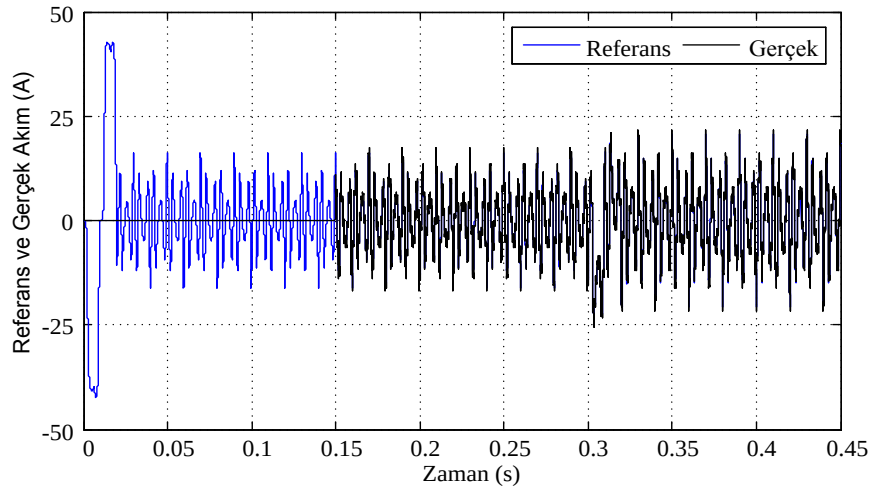
(a) Birinci yükün devrede olduğu durum için HFD kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği



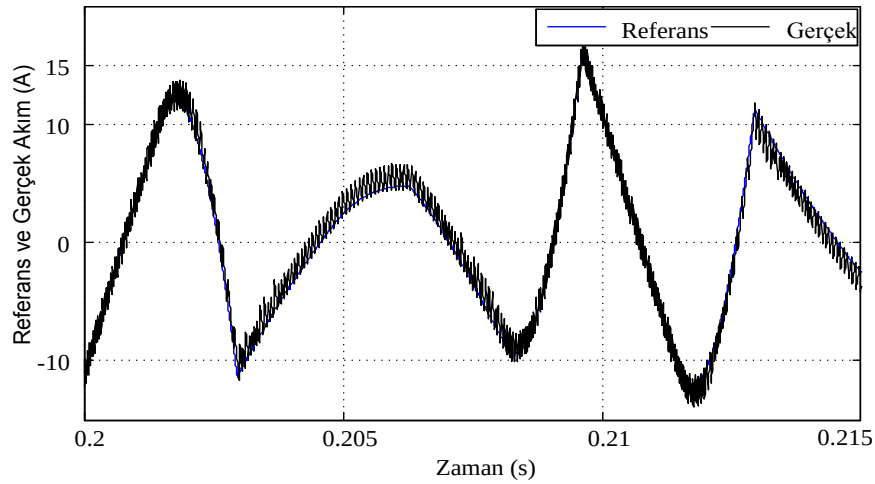
(b) Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için HFD kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği

Şekil 5.9 HFD kullanan PAGF'li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri

Şekil 5.10 (a)'da, PAGF tarafından üretilen akımların HFD yöntemi kullanılarak elde edilen referans işaretleri izleme başarımına ait benzetim sonucu gösterilmiştir. Şekil 5.10 (a)'da görüldüğü gibi, bu yöntemde bir periyotluk bir gecikme oluşmaktadır. Bunun nedeni HFD'nin hesaplama doğasından ileri gelmektedir. PAGF'nin referans akımları izleme başarımını daha iyi görebilmek için Şekil 5.10 (a) zaman ölçeği daraltılarak Şekil 5.10 (b)'de gösterilmiştir.



(a) Benzetim süresi boyunca



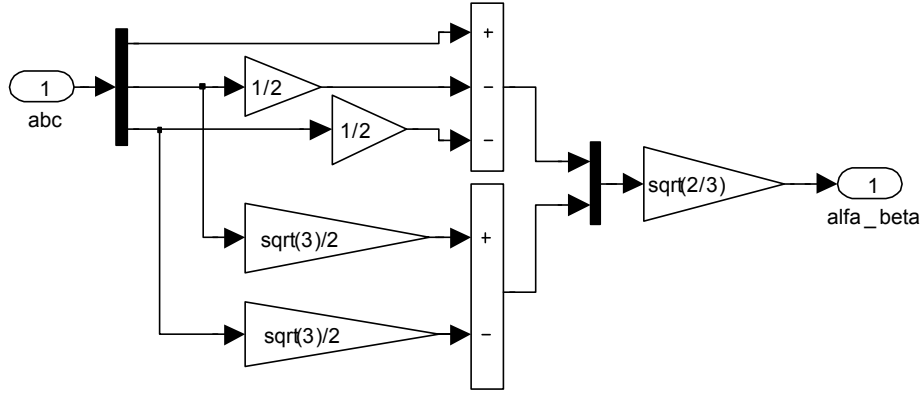
(b) Detay gösterim

Şekil 5.10 HFD kullanan PAGF'nin referans izleme başarımı

5.2. Anlık Reaktif Güç Teoremi Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları

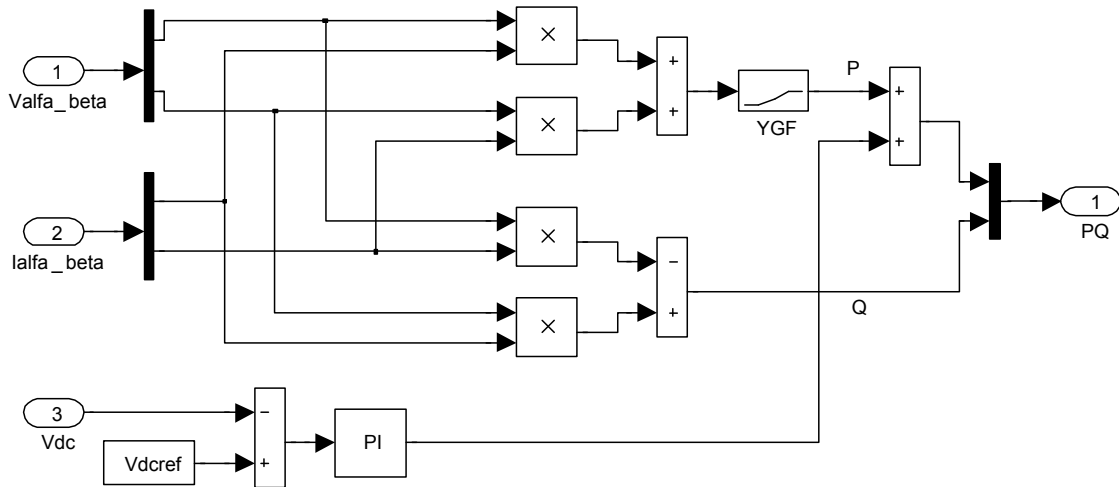
Tez çalışmasında kullanılan zaman alanındaki referans işaret çıkarma yöntemlerinden ilki ARGY yöntemiştir. Güçlerin anlık olarak hesaplanarak, harmonik ve reaktif güç bileşenlerini temsil eden referans akımların elde edilme işlemi için gerekli benzetim blokları, bu bölümde sunulacaktır.

Denk.(3.4)'te verilen Clarke dönüşümü yardımıyla yük akımı ve gerilimine ait α - β eksen bileşenlerini elde etmede kullanılan benzetim blokları Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



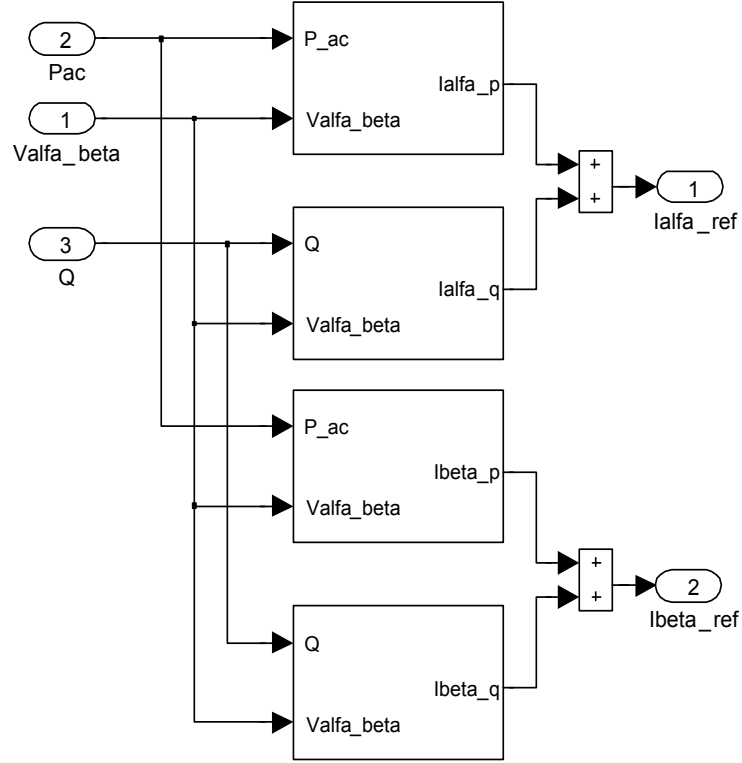
Şekil 5.11 Yük akımlarının ve kaynak gerilimin α - β eksen dönüşüm blok diyagramı

Denk.(3.6) ve (3.7)'de gösterilen anlık aktif ve reaktif güç hesaplamalarının yük akımı ve şebeke geriliminin α - β eksen bileşenleri kullanılarak elde edilmesine ait benzetim blokları şekil 5.12'de gösterilmiştir. Kayıp gücün sağlanması için gerekli V_{dc} gerilim denetim bloğu da gösterilmiştir. Referans gerilim değeri ile karşılaştırılan DA-bağ gerilimi PI denetleyiciden geçirilerek $P_{kayıp}$ elde edilmektedir.



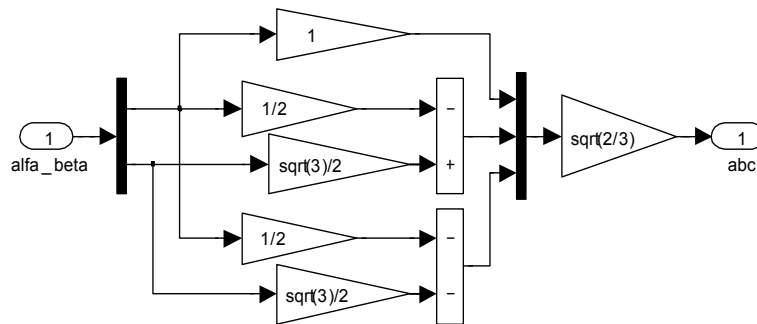
Şekil 5.12 Anlık güçlerin elde edilmesine ait benzetim blokları

Denk.(3.8)'de gösterilen, anlık güçlerden referans akımların α - β eksen bileşenlerinin elde edilmesine ait benzetim blokları şekil 5.13'de gösterilmiştir.

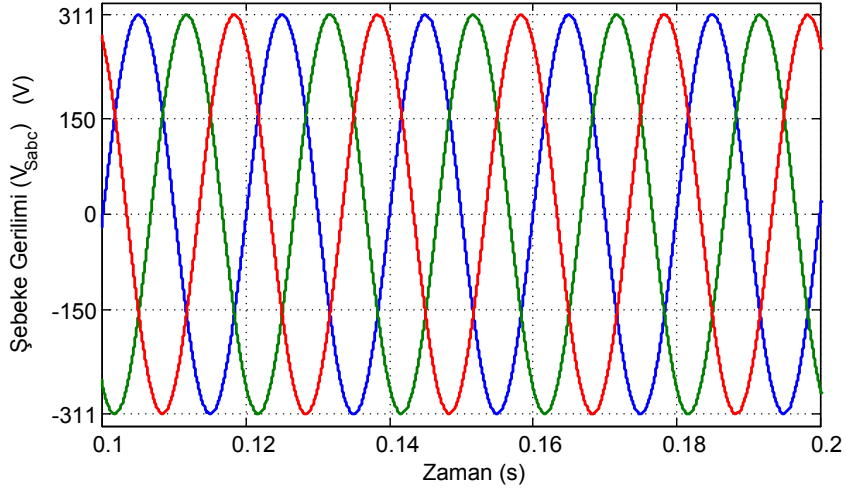


Şekil 5.13 Referans akımların α - β eksen bileşenlerinin elde edilmesi

Referans akımların α - β eksen bileşenlerine, denk.(3.9)'da verilen Ters Clarke dönüşümü uygulanır ve üç faza ait referans akım işaretleri elde edilmiş olur. Bu süreci gerçekleştiren benzetim modeli blok diyagramı şekil 5.14'te gösterilmiştir.

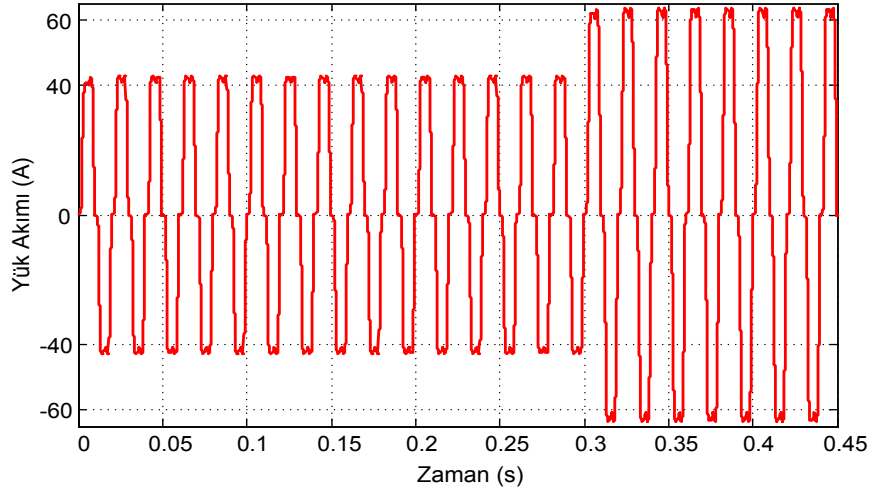


Şekil 5.14 Ters Clarke dönüşümü benzetim blokları



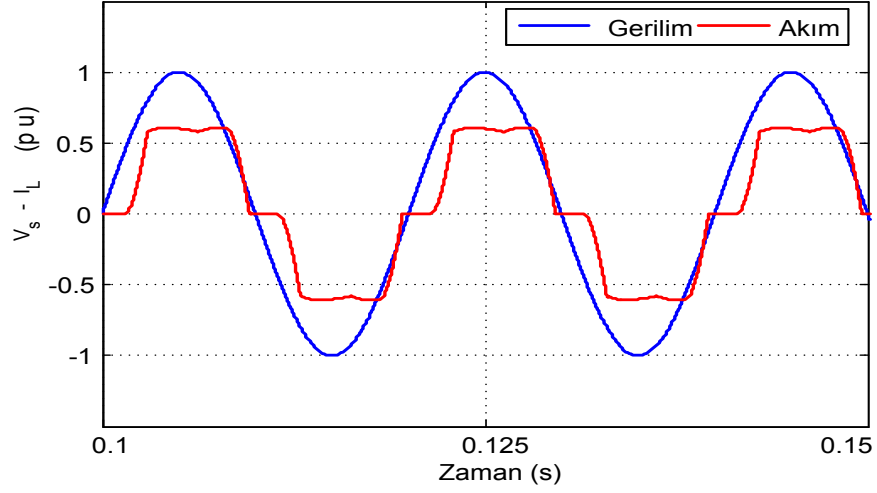
Şekil 5.15 ARG-T- Üç faz şebeke gerilimleri

Şekil 5.15'te bu yöntemde kullanılan şebeke gerilimine ait üç faz dalga şekilleri gösterilmiştir. Bu yöntem şebekenin saf sinüzoidal ve dengeli bir yapıda olduğu durumlarda sonuç üretebilmektedir. Gerilim dalga şekillerine ait tepe değeri 311V'tur.

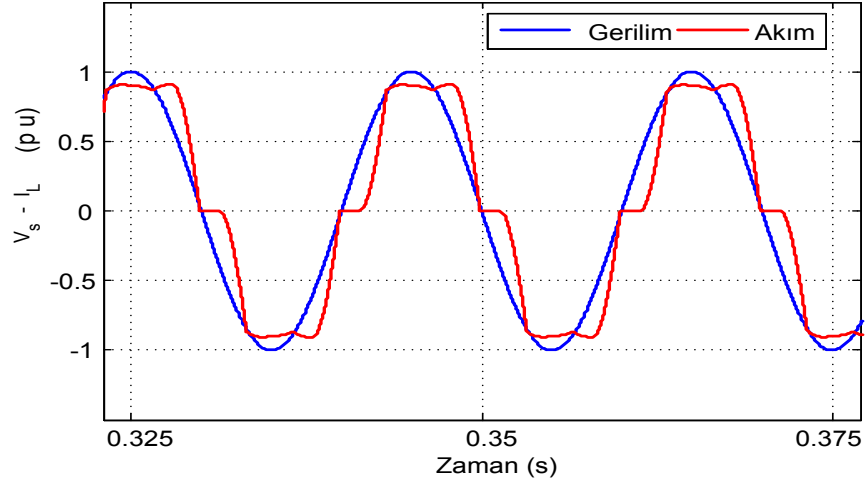


Şekil 5.16 ARG-T - Bir faz için yük akımı dalga şekli

Şekil 5.16'da, bir faza ait doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın dalga şekli gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 0 – 0.3s aralığında sadece Yük-1 devrededir, t=0.3s anından sonra bu yüke ek olarak Yük-2 devreye alındığı için akım artmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan yüklerin şebekeden çektiği akımın dalga şeklinin sinüzoidal yapıdan uzak olduğu da şekilden görülmektedir.



(a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım

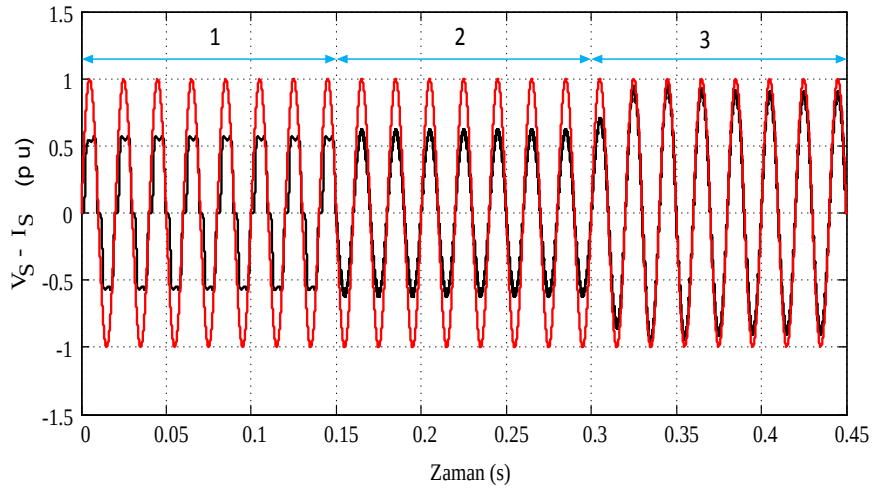


(b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım

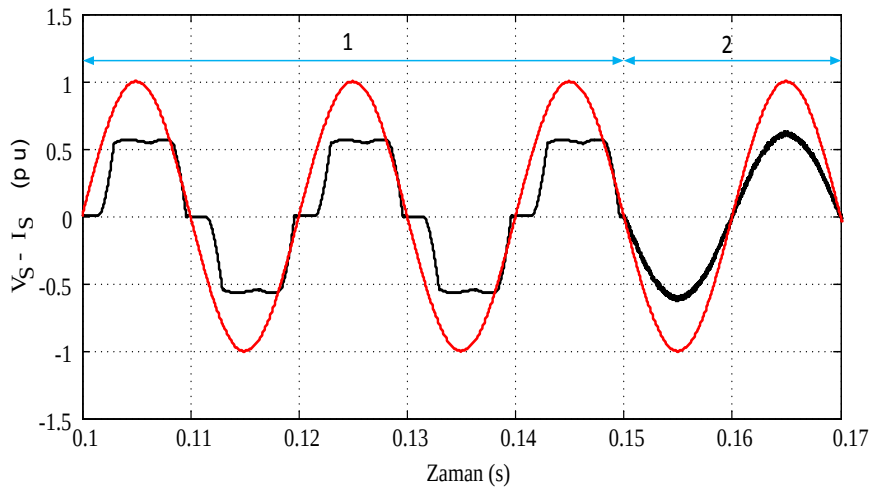
Şekil 5.17 ARG T - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki

Doğrusal olmayan yüklerin indüktif karakterli olduğu, Şekil 5.17 (a)'da ilk yük devredeyken ve şekil 5.17 (b)'de ikinci yükün de devreye alındığı durumlar için gösterilen, birim değer cinsinden yük akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz ilişkileri incelenerek görülebilir. Her iki şekilden net olarak görülebilen faz kayması, yüklerin şebekeden harmonikli akım çekmelerinin yanı sıra reaktif güç de çektiklerini ortaya koymaktadır.

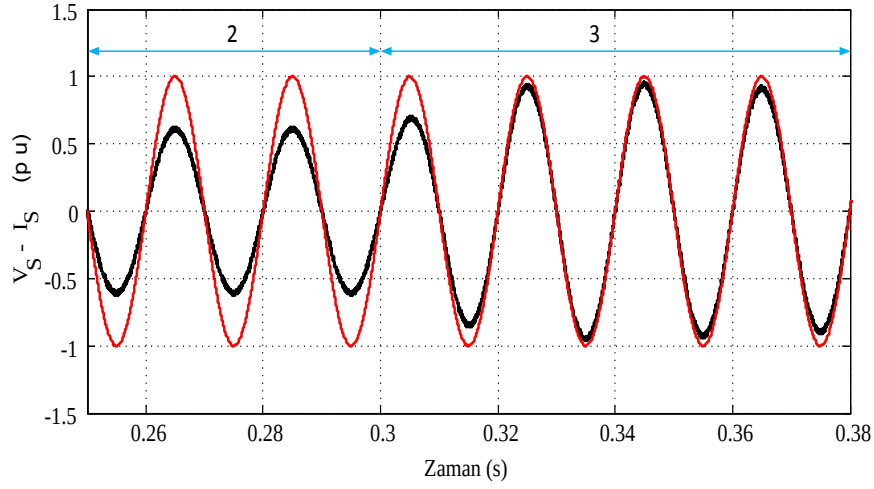
Şekil 5.18’de kaynak akımının birim değer cinsinden dalga şekli, PAGF devreye alınmadan önce ve alındıktan sonrası için gösterilmiştir. Bu çalışma durumunda da, 1 nolu bölüm sadece Yük-1 devrede iken; 2 nolu bölüm Yük-1 ve PAGF aynı anda devrede iken ve 3 nolu bölüm ise Yük-1 ve PAGF’ye ilaveten Yük-2 de devrede iken alınan kaynak akımı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.18 (a), Şekil 5.18 (b) ve (c)’de ise, 1, 2 ve 3 nolu kısımların ayrıntılı gösterimleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, 1 no’lu bölümün sonunda PAGF devreye alınarak kaynak akımının yaklaşık olarak sinüzoidal yapıya kavuşması sağlanmıştır. 3 no’lu bölümün başında ikinci yük devreye alınmış ve PAGF aynı şekilde kaynak akımını sinüzoidal yapıda tutmayı başarmıştır. Bu yöntemde harmonik kompanzasyonuna ek olarak birim güç faktörlü çalışma da elde edilmiştir.



(a) Benzetim süresi boyunca şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki



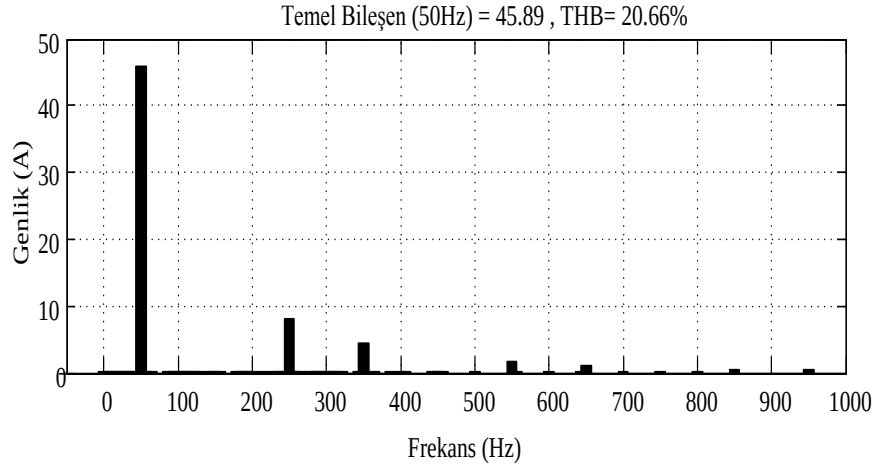
(b) 1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim



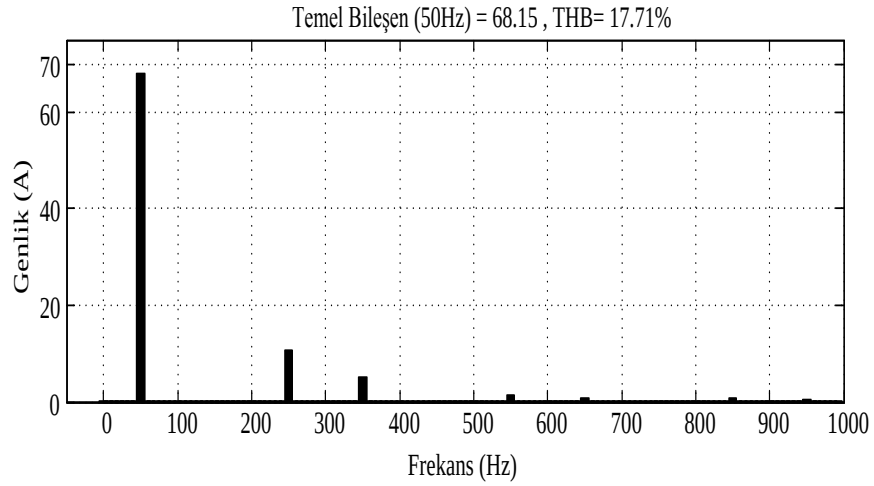
(c) 2 ve 3 nolu bölümler için detay gösterim

Şekil 5.18 ARGT kullanan PAGF’li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.19 (a) ve (b)’de sırasıyla, Yük-1’in devrede olduğu $t=0.3s$ anına kadar ve Yük-2’nin de devrede olduğu $t=0.3s$ ’den sonrası için yük akımının THB’si yüzde olarak verilmiştir. THB’nin, birinci yük devredeyken %20.66 ve iki yük devredeyken ise %17.71 olduğu görülmektedir.



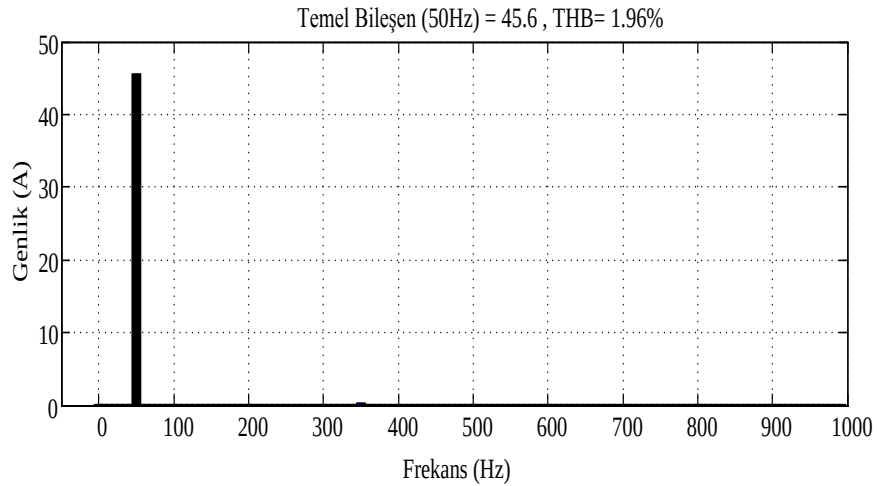
(a) Birinci yükün akımının THB’si



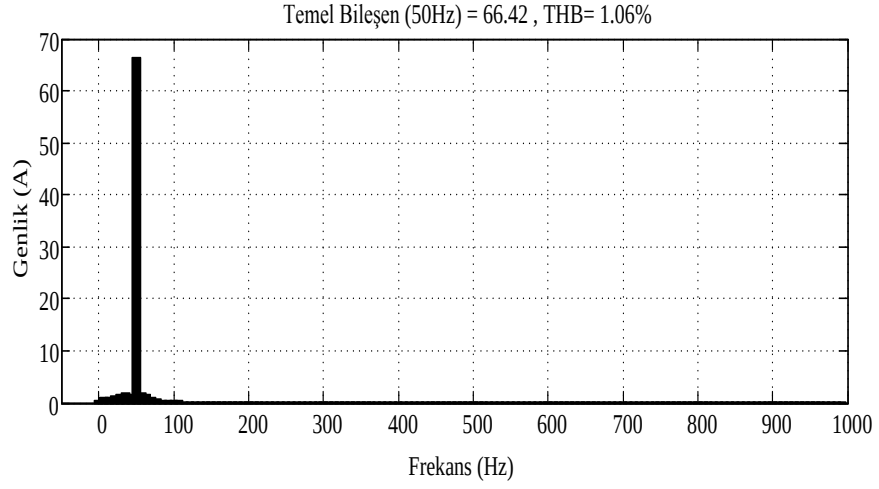
(b) Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB'si

Şekil 5.19 ARG T - Yük-1-2 akımlarının THB'leri

Şekil 5.20 (a) ve (b)'de PAGF devredeyken sırasıyla, 2 ve 3 no'lu bölümler için şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, Yük-1 için şebeke akımının harmonik içeriği %1.96'ya, Yük-1 ve Yük-2'nin birlikte olduğu durum için ise % 1.06'ya düşülmüştür. ARG T yöntemi ile şebeke akımının %THB değeri, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin altına düşülmüştür.



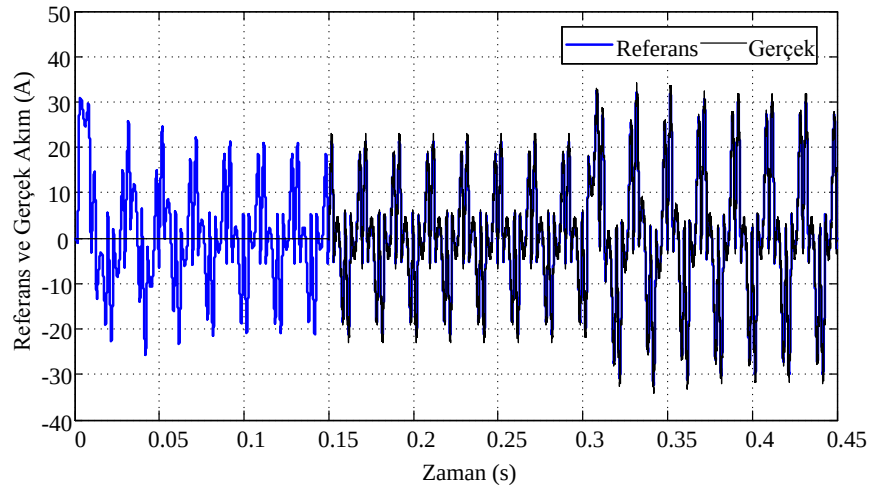
(a) Birinci yükün devrede olduğu durum için ARG T kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği



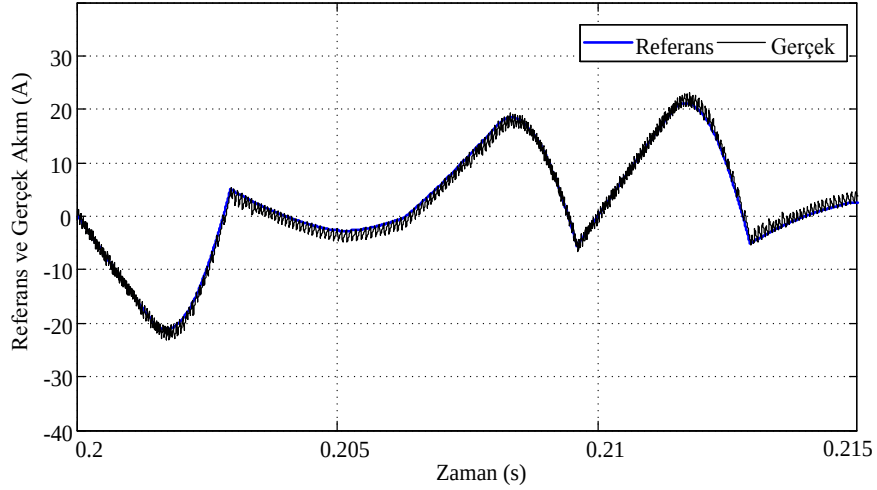
(b) Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için ARG T kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği

Şekil 5.20 ARG T kullanan PAGF'li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri

Şekil 5.21 (a)'da, PAGF tarafından üretilen akımların ARG T yöntemi kullanılarak elde edilen referans işaretleri izleme başarımına ait grafiksel sonuç gösterilmiştir. PAGF'nin referans akımları izleme başarımını daha iyi görebilmek için Şekil 5.21 (a), zaman ölçeği daraltılarak Şekil 5.21 (b)'de sunulmuştur.



(a) Benzetim süresi boyunca



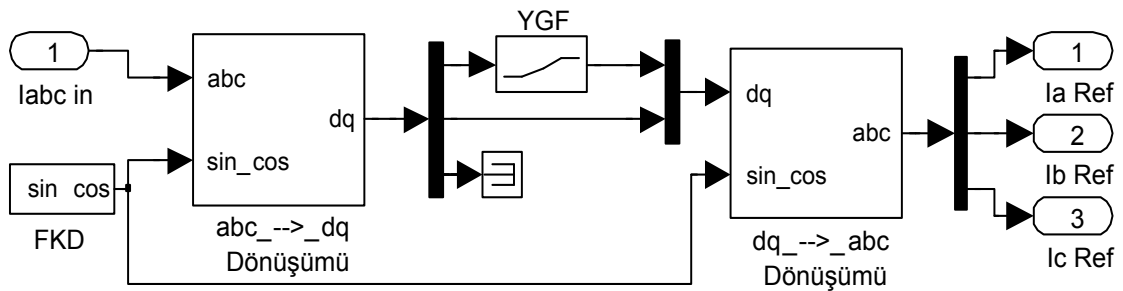
(b) Detay gösterim

Şekil 5.21 ARG T kullanan PAGF'nin referans izleme başarımı

5.3 Senkron Referans Çatı Yönteminden Elde Edilen Benzetim Sonuçları

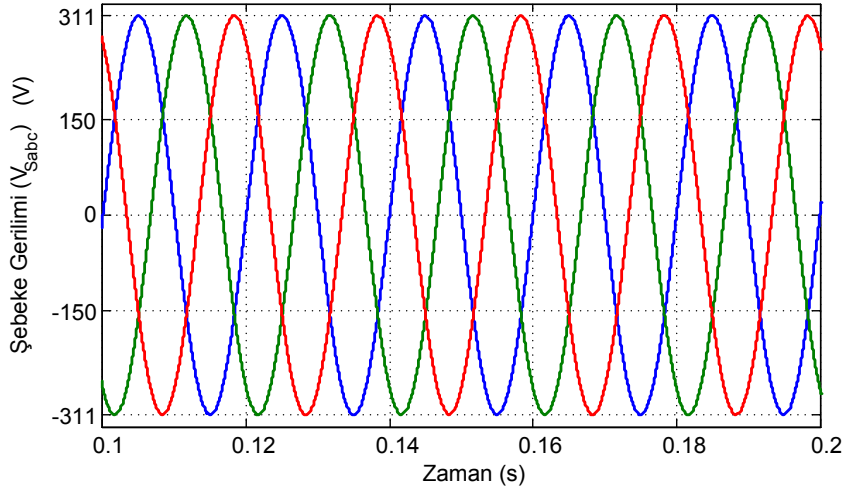
SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin temel ifadeler Bölüm 3.'de ayrıntılı olarak verilmişti. Bu bölümde, SRÇY yöntemine ait benzetim blokları ve bu yöntemden elde edilen grafiksel sonuçlar sunulmuştur.

Denk.(3.4) ve (3.10) eşitliklerinde ifade edilen dönüşümler yardımıyla, ölçülen yük akımına ait d-q-eksen bileşenleri elde edilmiştir. Akımın d-q-eksen bileşenleri denk.(3.11) ifadesinde gösterildiği gibi AA ve DA bileşenlere sahiptir. PAGF yapısının harmonik referanslarını elde etmek için kullanacağı bileşen, akımın d-eksen bileşenine ait AA bileşendir ve YGF yardımıyla elde edilmektedir. Şekil 5.22'de verilen SRÇY benzetim bloklarından görülebileceği gibi q-eksen bileşeni herhangi bir işleme tabi tutulmadan çıkışa aktarılmıştır, bu durum reaktif güç kompanzasyonu uygulamasına ait gerekliliktir. Dönüşüm formüllerinde kullanılan şebeke açısal hız ve bilgileri FK D yardımıyla elde edilmiştir.



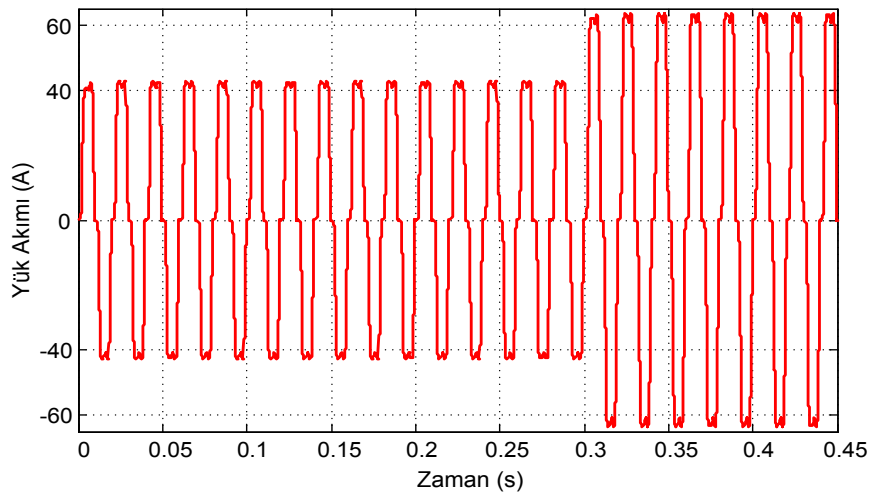
Şekil 5.22 Senkron referans çatı yöntemine ait benzetim blokları

Şekil 5.22’den görülebileceği gibi referans akımları oluşturacak olan d-q-eksen bileşenleri ters dönüşümler yardımıyla a-b-c üç faz bileşenlerine dönüştürülerek referans işaretler elde edilmiştir.



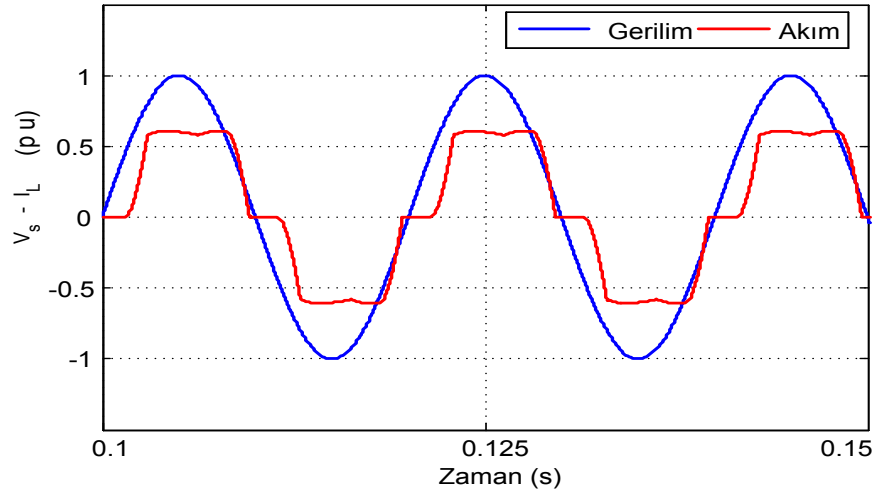
Şekil 5.23 SRÇY- Üç faz şebeke gerilimleri

Şekil 5.23’te şebeke gerilimine ait dalga şekilleri üç faz için gösterilmiştir. Şebekenin saf sinüzoidal ve dengeli bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu çalışma için de gerilimin tepe değeri 311V olarak belirlenmiştir.

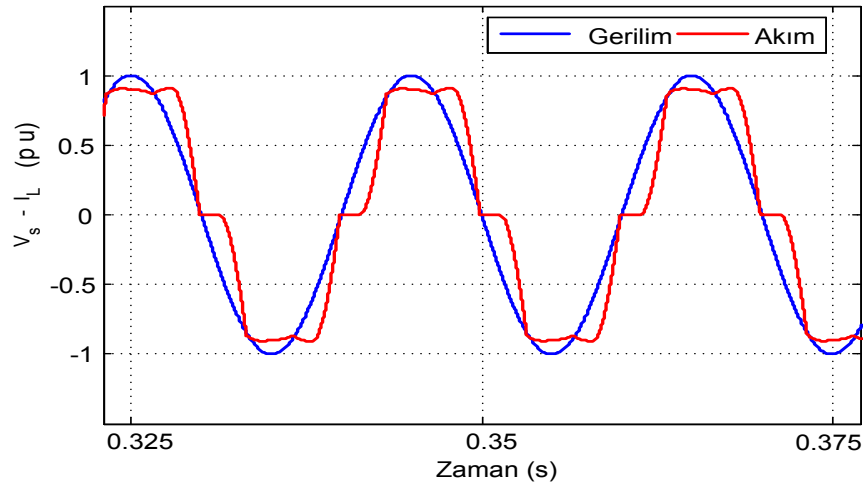


Şekil 5.24 SRÇY - Bir faz için yük akımı dalga şekli

Şekil 5.24'te, doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın bir fazına ait dalga şekli gösterilmiştir. Bu çalışma şartlarında da, $t=0.3s$ anında akımda meydana gelen artış, birinci doğrusal olmayan yüke ek olarak ikinci yük de devreye alındığı için ortaya çıkmıştır. Ayrıca yüklerin doğrusal olmayan karakteristiklerinin sonucu olarak şebekeden çektikleri akımın dalga şeklinin de sinüzoidal yapıda olmadığı şekilden görülmektedir.



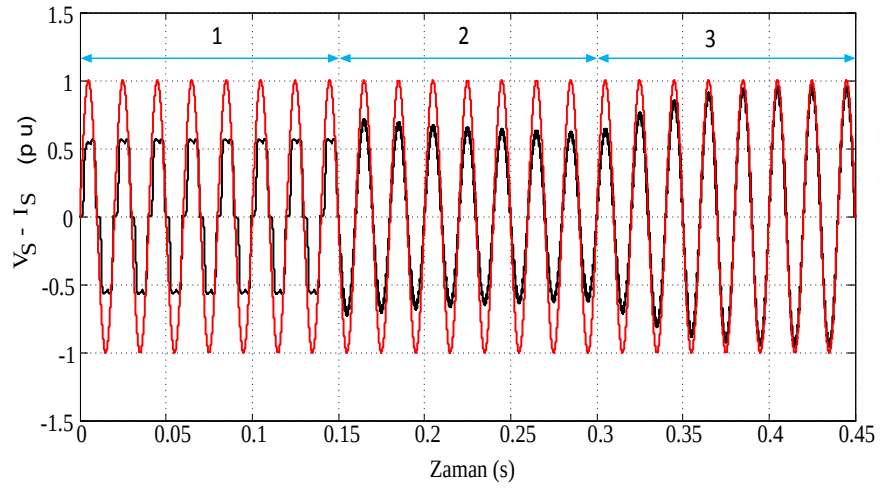
(a) Birinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım



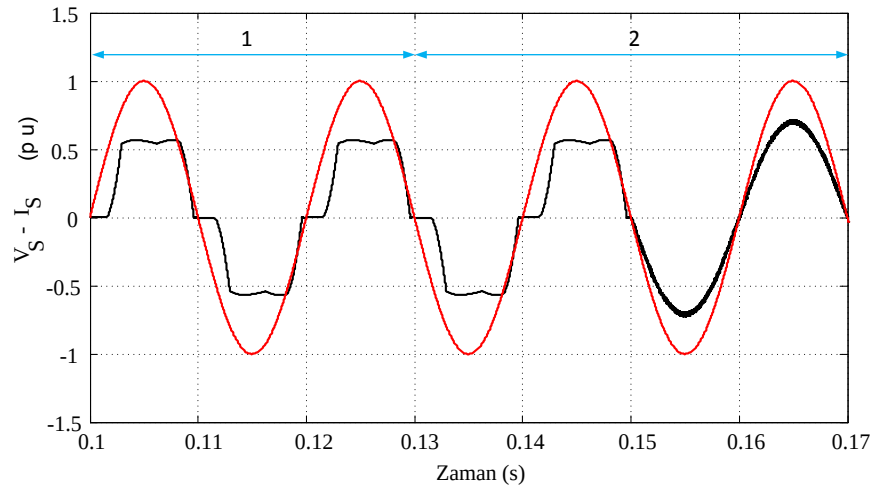
(b) Birinci ve ikinci yük devredeyken şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım

Şekil 5.25 SRÇY - Şebeke gerilimi ve indüktif yük akımı arasındaki ilişki

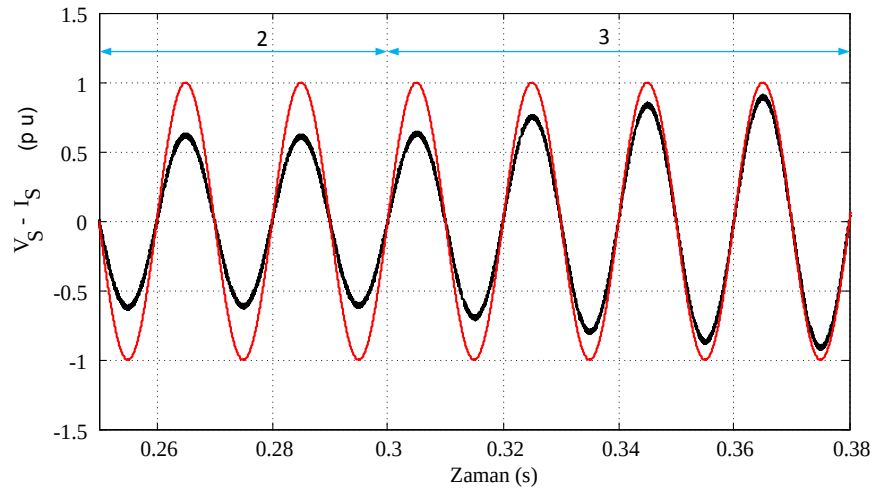
Şekil 5.25 (a)'da ilk yük devredeyken ve şekil 5.25 (b)'de ise ikinci yükün de devreye alındığı durumlara ait, yük akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz ilişkisi, birim değer cinsinden gösterilmiştir. Her iki şekilden görülebilen faz kayması, yüklerin şebekeden harmonikli akım çekmelerinin yanında reaktif güç de çektiklerini vurgulamaktadır.



(a) Benzetim süresi boyunca kaynak akımı ve gerilimi arasındaki ilişki



(b) 1 ve 2 nolu bölümler için detaylı gösterim

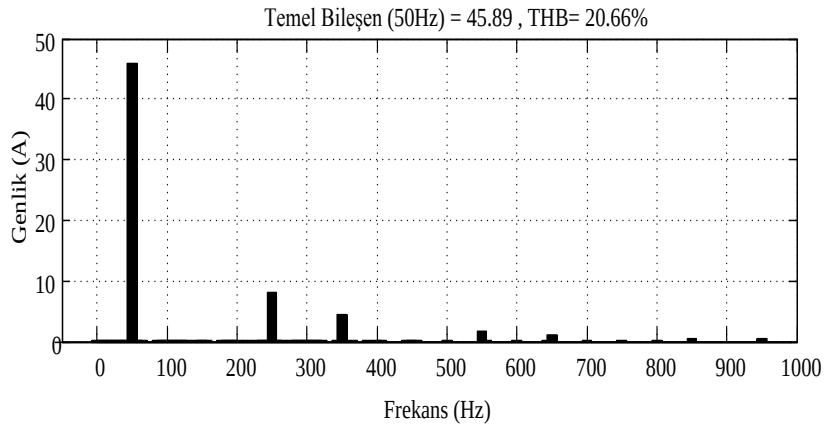


(c) 2 ve 3 nolu bölümler için detay gösterim

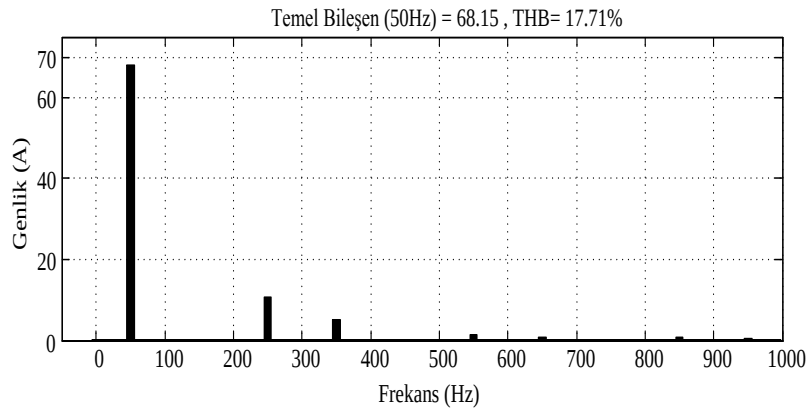
Şekil 5.26 SRÇY kullanan PAGF'li durum için şebeke gerilimi ve akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.26’da birim değer cinsinden kaynak akımının dalga şekli, PAGF öncesi ve sonrası için gösterilmiştir. Şekilde, 1 no’lu bölüm Yük-1’in devrede olduğu; 2 no’lu bölüm Yük-1 ve PAGF’nin aynı anda devrede olduğu ve 3 no’lu bölüm ise Yük-1 ve PAGF’ye ilaveten Yük-2’nin de devrede olduğu durumları göstermektedir. Bu çalışma şartları için sonucun daha iyi incelenebilmesi için Şekil 5.26 (a); Şekil 5.26 (b) ve 5.26 (c)’de detay gösterim olarak ayrıca verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, PAGF devreye girdiği anda kaynak akımının yaklaşık olarak sinüzoidal olması sağlanmıştır. Her iki doğrusal olmayan yükün devrede olduğu durum için de PAGF aynı şekilde kaynak akımını sinüzoidal formda tutmayı başarmıştır. Bu yöntemde de harmonik kompanzasyonuna ek olarak birim güç faktörlü çalışma elde edilerek güç faktörü düzeltme gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.27 (a) ve (b) sırasıyla, Yük-1 ve Yük-1 ve Yük-2’nin birlikte devrede olduğu durumlar için yük akımının THB’sini yüzde olarak göstermektedir. THB’nin, birinci yük devredeyken %20.66 ve iki yük dereyken ise %17.71 olduğu görülmektedir.



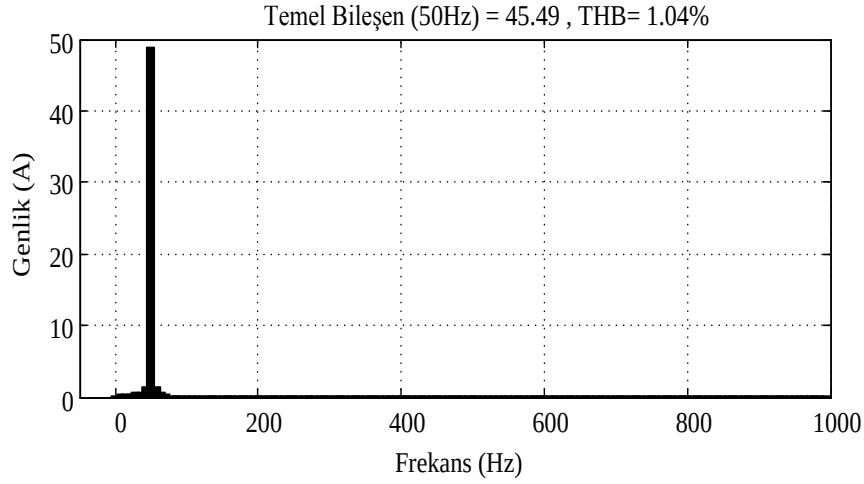
(a) Birinci yükün akımının THB’si



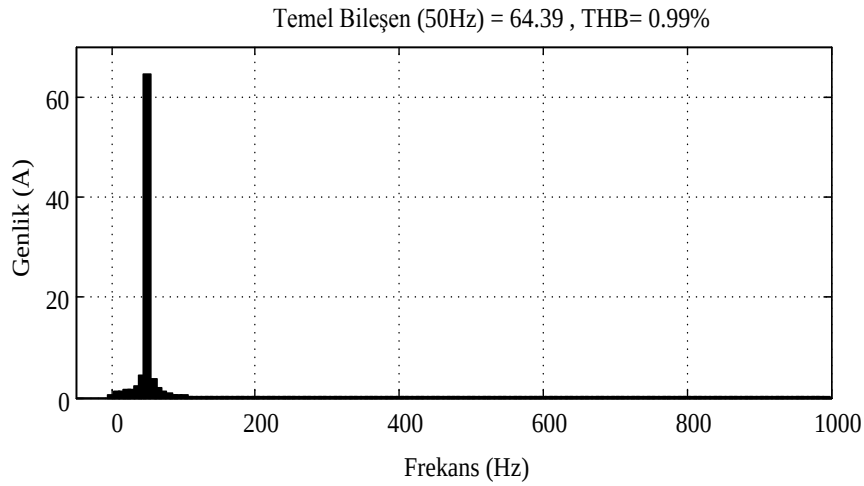
(b) Birinci ve ikinci yüklerin toplam akımlarının THB’si

Şekil 5.27 SRÇY - Yük-1-2 akımlarının THB’leri

Şekil 5.28 (a) ve (b)'de PAGF devredeyken sırasıyla, sadece Yük-1 ve iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şebeke akımının harmonik içeriği sadece Yük-1 devredeyken %1.04'e, her iki yük devredeyken ise % 0.99'a düşülmüştür. SRÇY yöntemi ile şebeke akımının %THB değerinin, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin altında olduğu görülmektedir.



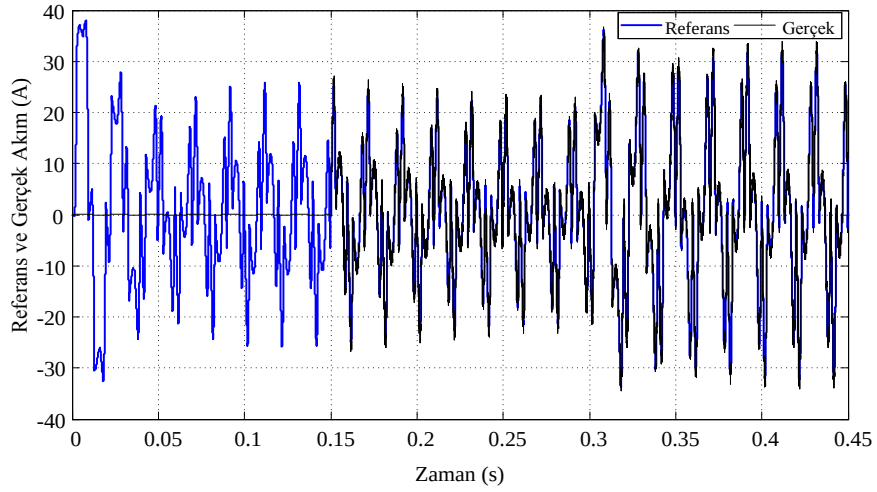
(a) Birinci yükün devrede olduğu durum için SRÇY kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği



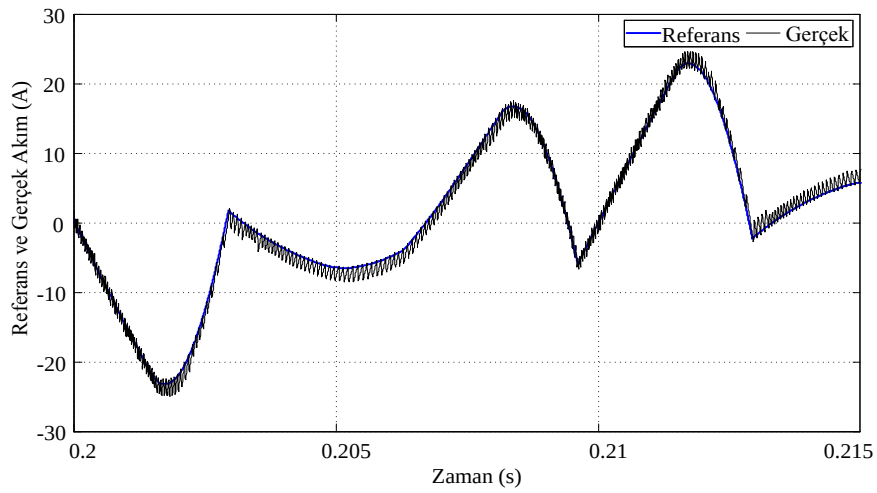
(b) Birinci ve ikinci yükün devrede olduğu durum için SRÇY kullanan PAGF'nin şebeke akımının harmonik içeriği

Şekil 5.28 SRÇY kullanan PAGF'li durum için şebeke akımına ait harmonik içerikleri

Şekil 5.29 'da SRÇY'nin referans işaretleri izleme başarımı verilmiştir. SRÇY'nin harmonik ve reaktif kompanzasyonundaki etkinliği, referans işaretleri izlemedeki başarımından görülmektedir. $t=0.15s$ anında PAGF devreye girmiş ve mevcut referans akımları istenen şekilde yakalayarak izlemeye başlamıştır. $t=0.3s$ anında, ikinci yükün devreye girmesiyle değişen referans akımları da yüksek doğrulukla izlemiştir.



(a) Benzetim süresi boyunca



(b) Detay gösterim

Şekil 5.29 SRÇY kullanan PAGF'nin referans izleme başarımı

Kullanılan her üç yöntemin de referansları izleme bakımından yüksek performansı grafiklerden görülmektedir. Hızlı Fourier yönteminin reaktif güç kompanzasyonu işlemini gerçekleştiremiyor olması bu yönteme ait en önemli olumsuzluktur. ARGİ ve SRÇY yöntemlerinin hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonunu birlikte yapabiliyor olması, bu yöntemlerin PAGF uygulamalarında daha çok tercih edilmelerini sağlamaktadır. Harmonik bastırma performansı olarak en iyi performansı SRÇY yöntemi göstermiştir. Tablo 5.2 bize referans işaret çıkarmak için kullanılan her üç yöntemin harmonik bastırma verilerini tümleşik olarak göstermektedir. Tablo incelendiğinde kullanılan her üç yöntemin de sistem harmonik içeriğini IEEE standartlarının önerdiği %5 değerinin altına indirdiği görülmektedir.

Tablo 5.2 Referans işaret çıkarma yöntemlerine ait harmonik verileri

Yöntem	Yük Durumu	Yük Akımı %THB Değeri	
		PAGF Devrede Değil	PAGF Devrede
FOURIER	Yük-1	20.62	2.24
	Yük 1-2	17.71	1.46
ARGİ	Yük-1	20.66	1.96
	Yük 1-2	17.71	1.06
SRÇY	Yük-1	20.62	1.04
	Yük 1-2	17.71	0.99

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan yükler tarafından şebekeden çekilen akımın harmonik içeriğini kabul edilebilir seviyeye düşürmek ve şebekeyi birim güç faktöründe tutabilmek için düşünülen PAGF'nin benzetim modeli MATLAB/SIMULINK paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. PAGF'nin güç devresinde iki seviyeli gerilim beslemeli evirici ve eviricinin çıkış akımlarının denetimi için iki seviyeli HBAD yöntemi kullanılmıştır. Bu akım denetim yöntemi basit bir yapıya sahiptir ve sistem parametrelerinde meydana gelen değişmelere karşı dayanıklıdır. Eviricinin akımlarının denetimi için gerekli olan referans işaretler; frekans alanında HFD, zaman alanında ise ARGF ve SRÇY yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir.

PAGF'nin dinamik performansını göstermek için iki ayrı doğrusal olmayan yük farklı zamanlarda devreye alınmıştır. Altı darbeli diyot doğrultuculardan oluşan bu yüklerden birincisi ilk anda devreye alınmıştır. $t=0.15s$ anında PAGF devreye alınmış ve $t=0.30s$ anına kadar Yük-1 ile birlikte çalışmıştır. $t=0.30s$ anından sonra Yük-2 devreye alınmış ve böylece her iki yük de benzetim süresi sonuna dek birlikte devrede kalmıştır. PAGF'nin başarımı her üç referans işaret çıkarma yöntemi için de incelenmiş ve elde edilen bazı benzetim sonuçları verilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarından, şebeke akımının yüzde THB değerinin, her üç referans işaret çıkarma yöntemi için de kabul edilebilir seviyeye düşürüldüğü görülmektedir. Ayrıca HFD yönteminde sadece harmonik kompanzasyonu işlemi gerçekleştirilebildiği için HFD yöntemi ile denetlenen PAGF, sadece harmonik kompanzasyonunun yeterli olduğu çalışma şartlarında kullanılmaktadır. Ek olarak zaman alanındaki referans işaret çıkarma yöntemlerinin frekans alanında kullanılan HFD yöntemine göre %THB değeri ve şebekenin birim güç faktöründe tutulması gibi ölçütlerde daha üstün performans gösterdikleri benzetim sonuçlarından görülmektedir.

Tüm bu sonuçlar ışığında ortaya çıkan önemli üstünlüklerinin yanı sıra, AGF'lerde ilk yatırım maliyetinin fazla olması en büyük dezavantaj olarak söylenebilir. Her geçen yılda güç elektroniği teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, yarı iletken elemanların fiyatlarında da iyileşme yönünde sonuçlar üretecektir. Bu duruma bağlı olarak AGF'lerin önümüzdeki yıllarda daha da yaygın olarak kullanılacağı söylenebilir.

İlerideki çalışmalarda, her bir fazın ayrı ayrı denetlendiği bir PAGF'nin deneysel uygulamasının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca sabit anahtarlama frekanslı bir akım denetim yöntemi kullanılarak, HBAD yapısının uygulamada ortaya koyabileceği bazı sakıncaların da giderilmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Uçar, M., 2005. 3-fazlı 4-telli paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [2] Kocabaş, İ., 2009. 10 kVA gücünde DSP tabanlı gerilim kaynaklı aktif güç filtresi gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] Bozabalı, M., 2009. Üç fazlı sistemlerde paralel aktif güç filtre tasarımı ve simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [4] Terciyanlı, A., 2005. Doğrusal olmayan yüklerin kompanzasyonunda rezonans olgusunun incelenmesi , *EEBM 11. Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, 22-25 Eylül, İstanbul, Sözlü Bildiri.
- [5] T.C. Resmi Gazete, Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK) Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Sayı: 27738, 23.10.2010.
- [6] Anwar, H. K., 2009. Gerilim beslemeli ve akım beslemeli üç fazlı şönt aktif güç filtresinin karşılaştırması ve simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [7] www.guckalitesi.gen.tr TUBİTAK UZAY-TEİAŞ-ODTÜ-DEÜ-YTÜ-HÜ, Milli Güç Kalitesi Projesi. 2006.
- [8] TS EN 61000-3-2/A2, 2005. Elektromagnetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 3-2: Sınır Değerler-Harmonik Akım Emisyonlar için Sınır Değerler:(Faz Başına Donanımın Giriş Akımı 16 A), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [9] Yılmaz, M., 2006. Elektrik sistem tasarımında harmoniklerin giderilmesi için bir analiz, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Avcı, T., 2008. Akım kaynaklı aktif güç filtresi için çeşitli kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] Cuma, M. U., 2010. Digital signal processor based implementation of custom power device controllers, *PhD Thesis*, Çukurova University Institute of Naturel and Applied Sciences, Adana.
- [12] Çöteli, R., Dandıl, B., Uçar, F., Ata, F., 2011. Aktif güç filtresinin denetimi için farklı referans işaret çıkarma yöntemlerinin incelenmesi, *International Advanced Technologies Symposium – IATS’1*,Fırat Üniversitesi, 16-18 Mayıs, Elazığ, Vol-4, s. 461-466.
- [13] Salam, Z., Cheng, T. P., Jusoh, A., 2007. Review Of Active Power Filter Technologies, *Journal - The Institution of Engineers*, **68**, 47-53.

- [14] **Bose, B. K.**, 2006. Power Electronics And Motor Drives, Academic Press/Elsevier, Burlington, USA.
- [15] **Kazmierkowski, M. P. and Malesani, L.**, 1998. Current Control Technique for Three-Phase Voltage Source PWM Converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **45**, 691–703.
- [16] **Buso, S. P., Malesani, L. and Matavelli, P.**, 1998. Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **45**, 722–729.
- [17] **Teke, A., Sarıbulut, L., Meral, M. E., Tümay, M.**, 2011. Active Power Filter: Review of Converter Topologies and Control Strategies, *GU J Sci*, **24**, 283–289.
- [18] **Vodyakho, O. and Mi, C. C.**, 2009. Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire and Four-Wire Systems, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, **24**, 1350–1363.
- [19] **Varschavsky, A., Dixon, J., Rotella, M. and Moran, L.**, 2010. Cascaded Nine-Level Inverter for Hybrid-Series Active Power Filter, Using Industrial Controller, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **57**, 2761–2767.
- [20] **Rahmani, S., Hamadi, A., Mendalek, N. and Al-Haddad, K.**, 2009. A New Control Technique for Three-Phase Shunt Hybrid Power Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 2904–2915.
- [21] **Xiao, P., Venayagamoorthy, G. K.**, 2009. Seven-Level Shunt Active Power Filter for High-Power Drive Systems, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, **24**, 6–13.
- [22] **Aredes, M., Akagi, H., Watanabe, E. H., Salgado, E. V. and Encarnação, L. F.**, 2009. Comparisons Between the p--q and p--q--r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, **24**, 924–933.
- [23] **Radzi, M. A. M. and Rahim, N. A.**, 2009. Neural Network and Bandless Hysteresis Approach to Control Switched Capacitor Active Power Filter for Reduction of Harmonics, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 1477–1484.
- [24] **Singh, B. and Solanki, J.**, 2009. An Implementation of an Adaptive Control Algorithm for a Three-Phase Shunt Active Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 2811–2820.
- [25] **Lavopa, E., Zanchetta, P., Sumner, M. and Cupertino, F.**, 2009. Real-Time Estimation of Fundamental Frequency and Harmonics for Active Shunt Power Filters in Aircraft Electrical Systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 2875–2884.
- [26] **Bhattacharya, A., Chakraborty, C. and Bhattacharya, S.**, 2009. Shunt Compensation, *IEEE Ind. Electron. Magazine*, **10.1109**, 38–49.
- [27] **Rahmani, S., Mendalek, N. and Al-Haddad, K.**, 2010. Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **57**, 3364–3375.

- [28] Terciyanli, A., Ermis, M. and Cadirci, I., 2011. A Selective Harmonic Amplification Method for Reduction of kVA Rating of Current Source Converters in Shunt Active Power Filters, *IEEE Trans. Pow. Delivery.*, **26**, 65–78.
- [29] Virmani, R., Gaur, P., Santosi, H., Mittal, A.P. and Singh, B., 2010. Performance Comparison of UPQC and Active Power Filters for a Non-Linear Load, *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES-2010)*, New Delhi, India, 20-23 Dec., Page(s):1-8.
- [30] Dos Santos, E. C., Jacobina, C. B., Dias, J. A. E. and Rocha, N., 2011. Single-Phase to Three-Phase Universal Active Power Filter, *IEEE Trans. Pow. Delivery.*, **26**, 1361–1371.
- [31] Teke, A., Saribulut, L., Tümay, M., 2011. A Novel Reference Signal Generation Method for Power-Quality Improvement of Unified Power-Quality Conditioner, *IEEE Trans. Pow. Delivery.*, **26**, 2205–2214.
- [32] Akagi, H. and Isozaki, K., 2012. A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive, , *IEEE Trans. Pow. Electron.*, **27**, 69–77.
- [33] Tang, Y., Loh, P. C., Wang, P., Choo, F. H., Gao, F. and Blaabjerg, F., 2012. Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter with Output LCL Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **59**, 1443–1452.
- [34] MATLAB 7.5 version, MathWorks Company, 2010.
- [35] Kıyan, M. ve Kayabaşı, M., 2006. Alçak gerilim reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin deneysel karşılaştırılması, *EMO–ELECO’2006*, 6-10 Aralık, Bursa, Poster Bildiri.
- [36] Bilki, F., 2008. Reaktif güç ve kompanzasyon teknikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [37] Schneider Electric, 2011. Reaktif Enerji Yönetimi – Alçak Gerilim Komponentleri – Güç Kalitesi Düzeltme Bilgi Kitapçığı
- [38] Arrillaga, J., Watson, N. R., 2003. Power System Harmonics Second Edition, Wiley Press, West Sussex, England.
- [39] Efe, S. B., 2006. Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [40] Owen, E. L., 1998. A History of Harmonics in Power Systems, *IEEE Industry Applications Magazine*, January/February.
- [41] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [42] Balcı, M. E., 2009. Harmonik üreten yüklerin belirlenmesi ve optimum kompanzasyon için yeni bir güç ifadesi, *Doktora Tezi*, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü – Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

- [43] **Caner, F.**, 2006. Güç sistemlerinde harmonikler ve filtrelemelerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [44] **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.**, 1984. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **11A-20**, 3:625-630.
- [45] **Bayındır, K. Ç.**, 2006. Modelling of custom power devices, *PhD Thesis*, University of Çukurova Institute of Naturel and Applied Science, Adana.
- [46] **Peng, F. Z., Akagi, H., Nabae, A.**, 1990. A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **26**, 6:983-990.
- [47] **Çöteli, R.**, 2010. Üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-Statkom'un sinirsel bulanık ağ ile denetimi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [48] **Bhattacharya, S., Divan, D., Banerjee, B.**, 1995. Active Filter Solutions for Utility Interface, *IEEE International Symposium on Ind. Elec, ISIE '95*, Athens, Greece, 10-14 July, Page(s):53-63.
- [48] **Çöteli, R.**, 2010. Üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-Statkom'un sinirsel bulanık ağ ile denetimi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [49] **Geethalakshmi, B. and Dananjayan, P.**, 2010. A Combined Multipulse-Multilevel Inverter Suitable For High Power Applications, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, **2**, 257–261.
- [50] **Singh, B., Bhuvaneswari, G. and Garg, V.**, 2006. Harmonic Mitigation Using 12-Pulse AC-DC Converter in Vector Controlled Induction Motor Drives, *IEEE Trans. Pow. Delivery.*, **21**, 1483–1492
- [51] **Soto, D., Green, T. C.**, 2002. A Comparison of High-Power Converter Topologies for the Implementation of FACTS Controllers, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **49**, 1072–1080.
- [52] **Lai, J. S. and Peng, F. Z.**, 1996. Multilevel Converters – A New Breed of Power Converters, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **32**, 509-517.
- [53] **Mysiak, P. Ryszard, S. and Wojciechowski, D.**, 2007. A Special Multi-Pulse Converter with Small Active Power Filter, *IEEE 5th International Conference – Workshop, Compatibility in Power Electronics (CPE-2007)*, Gdansk, Poland, May 29-June 1, Pages(s):1-7.
- [54] **Rajasekhar, G. G., Rao, N. S. and Muni, T. V.**, 2011. Implementation of Cascade Multilevel Inverter in Distribution Systems as Power Line Conditioner, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **2-10**, 1-5.

- [55] **L.M. Tolbert, F.Z. Peng**, 2000. Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, Washington, USA, 15-20 July, Page(s):1271-1274
- [56] **Morán, L., Dixon, J., Espinoza, J. and Wallace, R.**, 1999. Using Active Power Filters to Improve Power Quality, *5th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP'99*, Parana, Brazil, 19-23 Sep., Page(s):501-511
- [57] **Asiminoaei, L., Blaabjerg, F. and Hansen, S.**, 2005. Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications, *in Proc. APEC 2005*, Austin, Texas, USA, 6-10 March, Page(s):635-641
- [58] **Kale, M.**, 2004. Paralel Aktif güç filtresi ile harmonik akım ve reaktif güç kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [59] **Akagi, H., Watanabe, E. H. and Aredes, M.** 2007. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, IEEE-Wiley Press, New Jersey, USA.
- [60] **Jeong, S. G. and Woo, M. H.**, 1997. DSP-Based Active Power Filter with Predictive Current Control, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **44**, 329-336.
- [61] **Midtsund, T.**, 2010. Control of power electronic converters in distributed power generation systems, Evaluation of current control structures for voltage source converters operating under weak grid conditions, *MsC Thesis*, Norwegian University of Science and Technology Master of Science in Energy and Environment, Trondheim, Norway.

ÖZGEÇMİŞ

Ferhat UÇAR

22.09.1983 – Adana

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Merkez / ELAZIĞ

0541 234 04 01

fucar@firat.edu.tr

Eğitim Durumum:

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalı / Yüksek Lisans
/ 2009 – Devam Ediyor

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği / Lisans / 2002 - 2006 /
Mezun (*Fakülte birinciliği derecesi*)

Adana ÇEAŞ Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü / 1997 - 2001 / Mezun

Beceri ve Nitelikler:

Yabancı Dil / İngilizce (ÜDS = 70)

Elektrik / Endüstriyel Panolar / Proje Yönetimi / Bilgisayar / CAD / Satranç

Çalışma Durumum:

Fırat Üniversitesi / ELAZIĞ – Teknik Eğitim Fakültesi – Elektrik Eğitimi Bölümü /
Araştırma Görevlisi / 2009 Kasım - Devam Ediyor.

Schneider Electric-Emsan / ADANA – AG-OG Pano Tasarımı, Proje Yönetimi, Kalite
Denetmeni, CAD Çizimleri, HES / Proje Mühendisi / 2008 Nisan – 2009 Kasım

HP Adana Bölge-DCL / ADANA – Satış ve Pazarlama, Yazılım Destek, Eğitim, CRM,
ARGE, Proje Yönetimi / Satış Mühendisi / 2007 Kasım – 2008 Nisan

Mis Holding-Misland / ELAZIĞ – AVM, Aquapark, Restaurant, Çevre Ayd., OG Trafo
Merkezi Projeleri, İş Programı, / Saha Mühendisi / 2006 Haziran – 2007 Kasım