



**YENİ BİR DENETİM ALGORİTMALI PARALEL
AKTİF GÜÇ FİLTRESİ İLE AKIM
HARMONİKLERİNİN AZALTILMASI**

Ömer Ali KARAMAN

**Doktora Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ
KASIM-2018**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ BİR DENETİM ALGORİTMALI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ İLE
AKIM HARMONİKLERİNİN AZALTILMASI

DOKTORA TEZİ

Ömer Ali KARAMAN

(111113202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ekim 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Kasım 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (Fırat Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Zafer AYDOĞMUŞ (Fırat Ü.)

Doç.Dr. Hüseyin ERİŞTİ (Mersin Ü.)

Doç.Dr. Necmettin SEZGİN (Batman Ü.)

Dr.Öğr. Üyesi Mahmut Temel ÖZDEMİR (Fırat Ü.)

KASIM-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Mehmet CEBECİ'ye en samimi ve içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının tamamlanmasında bilgi ve desteklerini esirgemeyen ve her zaman güleryüzle karşılayan Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Faruk ERKEN, Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Temel ÖZDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU'ya teşekkür eder, minnetlerimi sunarım.

Tez ve makale yazımında her zaman yanımda olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmamı; zorlu süreçte anlayış ve sabır göstererek hep yanımda olan sevgili ailem özellikle manevi destekleri ile yanımda olan annem Rukiye ÖĞÜT'e ithaf ediyorum.

Ayrıca Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimine (Proje No:MF.17.27) desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ömer Ali KARAMAN
ELAZIĞ–2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
SİMGELER LİSTESİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özetleri	6
1.2. Tezin Amacı	10
1.3. Tezin Yapısı	11
2. HARMONİKLER VE HARMONİK AZALTMA YÖNTEMLERİ.....	13
2.1. Harmoniklerin Etkileri	14
2.1.1. Transformatörler üzerindeki etkileri.....	14
2.1.2. İletim Hatları Üzerindeki Etkileri.....	15
2.1.3. Motorlar ve generatörler üzerindeki etkileri.....	15
2.2. Harmonik Azaltma Yöntemleri.....	16
2.2.1. Aktif Güç Filtreleri	16
2.2.2. Pasif Filtreler	26
3. REFERANS AKIM ÇIKARTMA YÖNTEMLERİ.....	38
3.1. Genel Bilgi	38
3.2. Frekans Alanı Yöntemleri	39
3.2.1. Genel Bilgi	39
3.2.2. Hızlı Fourier Dönüşümü Yöntemi.....	40
3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümü Yöntemi İçin Matlab/Simulink Benzetim Modeli.....	43
3.3. Zaman Alanı Yöntemleri.....	48
3.3.1. Anlık Reaktif Güç Teorisi Yöntemi	49
3.3.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi Yöntemi İçin Matlab/Simulink Benzetim Modeli	52

3.3.3. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi	59
3.3.4. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi İçin Simulink Benzetim Modeli.....	63
4. ADAPTİF HARMONİK ENJEKTE ALGORİTMA TEMELLİ PAGF DENETİM SİSTEMİ	71
4.1. Giriş.....	71
4.2. Akım Harmonik Analizi ve Sınırlamalar	72
4.3. AHE Algoritması	74
4.4. Alt Verileri Birleştirme Algoritması	75
4.5. Algoritmanın Yakınsaması.....	76
4.6. Evirici Anahtarlarının Elde Edilmesi	77
4.7. AHE Algoritmali PAGF'nin Matlab/Simulink Benzetim Modeli	78
5. AKIM HARMONİK BOZULMALARINA KARŞI GELİŞTİRİLEN AHE ALGORİTMASININ BAŞARIMI	92
5.1. SRÇY, ARGT, FFT ve AHE Algoritmalarının Performans Karşılaştırması	92
5.1.1. Yüklerin Sırasıyla Devreye Alınması Durumunda Yöntemlerin Performansı	93
5.1.2. Yüklerin %50'sinin Aynı Anda Devreye Alınması Durumu	96
5.1.3. Yüklerin %90'ının Aynı Anda Devreye Alınması Durumu	99
5.2. Algoritmaların Genel Karşılaştırması	101
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	113

ÖZET

Bu tezde, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonikleri gidererek kaynak tarafına yansımaları önlemek ve aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu yapmak için yeni bir kontrol algoritması önerilmiştir. Bu yapı, Adaptif Harmonik Enjekte (AHE) algoritmasını kullanan üç fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi kontrol mekanizmasıdır. Önerilen AHE algoritması zaman alanında yeni uyarlanabilir referans akım çıkartma metodudur. AHE algoritması referans akımı belirlemek için kullanılan normalleştirilmiş en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Sunulan Paralel Aktif Güç Filtresi mekanizması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, harmonikli akımları belirlemek için referans akımın çıkarılmasıdır. AHE algoritması referans akımı çıkartmak için harmoniklerin uygun genliklerini ve fazlarını çevrimiçi ve anlık olarak doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Tahmin edilen faz ve genlik bilgileri sinüs ve kosinüs değerleri ile çarpılarak istenilen genlik ve fazda bir harmonik değeri elde edilmektedir. İkinci aşamada elde edilen harmonikli akımların sisteme ters fazda enjekte edilmesi için evirici anahtarlama sinyalleri üretilir. Bu amaçla evirici anahtarlama sinyallerinin üretilmesi için gereken kapı işaretleri, akım denetleme yöntemleri yardımıyla elde edilir. Bu çalışmada eviricinin anahtarları için kapı işaretleri, Histerisiz Bant Akım Denetleyici kullanılarak elde edilmiştir. Ele alınan sistemin hem AHE yöntemiyle hem de Senkron Referans Çatı Denetim, Anlık Reaktif Güç Teorisi Denetim ve Hızlı Fourier Dönüşüm Yöntemleri ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Özellikle beş farklı yükün ele alındığı örnek sistemde; yükler önce sırayla ve daha sonra da toplam yükün %50 ve %90'ı devreye alınarak, dört yöntemin dinamik cevabı incelenmiştir. AHE yönteminde THB, sırasıyla %1,2, %1 ve %0,83'e düşmüştür. Diğer üç yöntemde ise THB, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin üstünde kalmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar, bu tezde önerilen AHE yönteminin, harmonik giderme ve reaktif güç kompanzasyonu yapma konusunda oldukça başarılı bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Paralel Aktif Güç Filtresi, Harmonikler, Adaptif Harmonik Enjekte (AHE) algoritması, Histerisiz Bant Akım Denetleyici, Güç Kalitesi.

SUMMARY

Decreasing of Current Harmonics Via Parallel Active Power Filter Using A New Control Algorithm

In this thesis, a Parallel Active Power Filter (PAPF) control mechanism via a novel Adaptive Harmonic Injection (AHI) algorithm is proposed in order to filter out harmonics generated by non-linear loads and carry out reactive power compensation. This is a three-phase Parallel Active Power Filter control mechanism that uses the AHI algorithm. The proposed AHI algorithm is a novel adaptive reference current extraction method that operates in the time domain. The AHI algorithm is based on the normalized least mean square method that is used to determine the reference current. The presented PAPF mechanism is composed of two stages. The first stage is the extraction of reference current to determine currents with harmonics. The AHI algorithm accurately estimates the proper amplitudes and phases of the harmonics online in order to extract the reference current. By accurately multiplying the estimated phase and amplitude information with sine and cosine values, a harmonic value is obtained in the desired amplitude and phase. In the second stage, the inverter switching signals are generated to inject the obtained harmonic currents to system in reverse phase. The gate signals required to trigger the inverter switches are obtained by means of current controller methods. In this study, gate signals for the inverter's switches were obtained using a hysteresis band current controller (HBAD). The system addressed was simulated by both AHI method and other Synchronous Reference Frame, Instantaneous Reactive Power Theory and Fast Fourier Transformation methods. In the example system where five different loads were handled; the loads were analyzed in order, and then 50% and 90% of the total load were taken into account. In the AHI method, THB decreased to 1.2%, 1% and 0.83%, respectively. In the other three methods, THB remained above the recommended value of 5% in IEEE-519 standards. Studies have shown that the AHI method proposed in this thesis is a very successful method for harmonic removal and reactive power compensation.

Key Words: Parallel Active Power Filter, Harmonics, Adaptive Harmonic Injection (AHI) algorithm, Hysteresis Band Current Controller, Power Quality.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. 1980-2016 Yılları arasında türkiye’de tüketilen toplam elektrik enerjisi	1
Şekil 1.2. Güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması.	2
Şekil 1.3. Harmonik bileşenler	3
Şekil 2.1. AGF’nin temel prensip şeması.....	17
Şekil 2.2. AGF’lerin güç devresi yapılarına göre sınıflandırılması	18
Şekil 2.3. Gerilim kaynaklı PAGF’nin genel şeması	20
Şekil 2.4. Akım kaynaklı PAGF’nin genel şeması.....	20
Şekil 2.5. SAGF’nin genel şeması.....	22
Şekil 2.6. BGKD’nin genel şeması	23
Şekil 2.7. KGF’nin genel şeması.....	24
Şekil 2.8. KGF’nin sınıflandırılması	25
Şekil 2.9. Çeşitli pasif filtre devreleri	26
Şekil 2.10. Pasif filtre Matlab/Simulink benzetim modeli	28
Şekil 2.11. Harmonikli kaynak akımının değişimi (PF devrede değil)	28
Şekil 2.12. Kaynak akımının değişimi (PF devrede)	29
Şekil 2.13. Kaynak akımının FFT analizi (PF devrede değil).....	29
Şekil 2.14. Kaynak akımının FFT analizi (PF devrede).....	30
Şekil 2.15. Paralel pasif filtre	31
Şekil 2.16. 100 Ω ’luk yük ve şebeke gerilimleri benzetim modeli (PPF devrede değil)	31
Şekil 2.17. Yük üzerindeki bozulmuş gerilimin değişimi (PPF devrede değil)	32
Şekil 2.18. Harmonikli gerilime ait THB (PPF devrede değil)	32
Şekil 2.19. PPF’nin Matlab/Simulink benzetim modeli.....	33
Şekil 2.20. Yük üzerindeki gerilimin değişimi (PPF devrede).....	33
Şekil 2.21. Kaynak gerilimine ait THB (PPF devrede)	34
Şekil 2.22. Seri pasif filtre.....	34
Şekil 2.23. 100 Ω ’luk yük ve şebeke gerilimleri benzetim modeli (SPF devrede değil)	35
Şekil 2.24. Yük üzerindeki bozulmuş gerilimin değişimi (SPF devrede değil)	35
Şekil 2.25. Harmonikli gerilime ait THB (SPF devrede değil)	36

Şekil 2.26. SPF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli.....	36
Şekil 2.27. Yük üzerindeki gerilimin değişimi (SPF devrede).....	37
Şekil 2.28. Kaynak gerilimine ait THB (SPF devrede).....	37
Şekil 3.1. Referans akım/gerilim çıkartma yöntemleri.....	38
Şekil 3.2. Fourier dönüşüm ile her bir yük akımının faz açısını ve genliğini bulan Matlab/Simulink benzetim bloğu	42
Şekil 3.3. Sinüsoidal dalga bileşenlerini ve temel akım harmoniklerini üreten Matlab/Simulink blokları.....	42
Şekil 3.4. FFT yöntemini kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli	43
Şekil 3.5. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (FFT etkin değil)	44
Şekil 3.6. Benzetim süreci boyunca kaynak akımının değişimi (FFT)	45
Şekil 3.7. Yük1 devrede iken akımdaki toplam harmonik bozulma (FFT etkin değil).....	45
Şekil 3.8. Her iki yük devrede iken akımdaki THB (FFT etkin değil)	46
Şekil 3.9. Yük1 akımının THB'si (FFT)	46
Şekil 3.10. Her iki yük akımının THB'si (FFT).....	47
Şekil 3.11. Benzetim süresi boyunca gerçek ve referans akımın değişimi (FFT).....	48
Şekil 3.12. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (FFT)	48
Şekil 3.13. ARGV kontrol yapısı.....	49
Şekil 3.14. ARGV'yi kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli	53
Şekil 3.15. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (ARGV)	54
Şekil 3.16. Her iki yük devrede iken kaynak gerilimi ve akımının değişimi (ARGV)	54
Şekil 3.17. Kaynak akımlarının değişimi (ARGV).....	55
Şekil 3.18. Yük1 ve Yük2 akımlarının THB'leri (ARGV etkin değil).....	56
Şekil 3.19. ARGV yöntemini kullanan PAGF devrede iken kaynak akımına ait THB'ler ..	57
Şekil 3.20. Benzetim süresi boyunca gerçek ve referans akımların değişimi (ARGV)	58
Şekil 3.21. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (ARGV)	59
Şekil 3.22. SRÇY kontrollü 3-fazlı 3-telli sistemde i_d ve i_q akımlarını oluşturan benzetim blok diyagramı.....	61
Şekil 3.23. SRÇY yöntemi ile elde edilen harmonikli akımların blok diyagramları	63
Şekil 3.24. SRÇY'yi kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli.....	63
Şekil 3.25. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (SRÇY).....	64

Şekil 3.26. Her iki yük devrede iken kaynak gerilimi ve akımının değişimi (SRÇY).....	64
Şekil 3.27. Kaynak akımlarının değişimi (SRÇY)	66
Şekil 3.28. Yük1-2 akımlarının THB'leri (SRÇY etkin değil)	67
Şekil 3.29. Kaynak akımlarına ait THB'ler (SRÇY)	68
Şekil 3.30. PAGF'nin referans izleme başarısı (SRÇY)	69
Şekil 3.31. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (SRÇY)	70
Şekil 4.1. AHE algoritmali PAGF denetim sistemi	71
Şekil 4.2. Adaptif harmonik enjekte algoritması uygulama blok şeması.....	75
Şekil 4.3. Histerezis bant akım kontrol şeması	78
Şekil 4.4. AHE algoritmasını kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli	79
Şekil 4.5. Diyot doğrultuculu R-L yükü Matlab/Simulink benzetim modeli.....	79
Şekil 4.6. AHE algoritması Matlab/Simulink benzetim modeli.....	80
Şekil 4.7. AHE algoritmasına ait alt blokların Matlab/Simulink benzetim modeli	80
Şekil 4.8. Harmoniklerin genliklerini hesaplayan Matlab/Simulink benzetim modeli	81
Şekil 4.9. AHE Algoritması ile Referans Akım Üretme Bloğu	82
Şekil 4.10. AHE algoritması ile referans akım üretme bloğu detaylı şekli	82
Şekil 4.11. Evirici anahtar sinyallerini üreten HBAD bloğu.....	83
Şekil 4.12. HBAD bloğunun detaylı alt blokları	83
Şekil 4.13. İki seviyeli gerilim beslemeli evirici.....	84
Şekil 4.14. Üç fazlı yük akımların değişimi (AHE)	85
Şekil 4.15. Kaynak geriliminin ve harmonikli akımın değişimi (AHE)	86
Şekil 4.16. Kaynak geriliminin değişimi (AHE).....	86
Şekil 4.17. Yük1 devrede iken kaynak akımları (AHE)	87
Şekil 4.18. Her iki yük devrede iken kaynak akımları (AHE)	87
Şekil 4.19. Yük1-2 akımlarının THB'leri (AHE etkin değil)	88
Şekil 4.20. Yük1 ve Yük2 akımlarının THB'leri (AHE)	89
Şekil 4.21. AHE algoritmasını kullanan PAGF'nin referans işaret izleme başarısı.....	90
Şekil 5.1. Çeşitli yük gruplarının Matlab/Simulink benzetim modeli.....	92
Şekil 5.2. Harmonikli yük akımları	93
Şekil 5.3. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda yük akımlarının THB'si	93

Şekil 5.4. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi ..	94
Şekil 5.5. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri	95
Şekil 5.6. Yüklerin %50'si devreye alınması durumunda yük akımlarının THB'si	96
Şekil 5.7. Yüklerin %50'si devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi	97
Şekil 5.8. Yüklerin %50'si devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri	98
Şekil 5.9. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda yük akımlarının THB'si	99
Şekil 5.10. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi..	100
Şekil 5.11. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri	101
Şekil 5.12. Harmonikli yük akımı ve bu akıma ait THB değeri.....	104
Şekil 5.13. Kaynak akımı ve bu akıma ait THB değeri.....	104
Şekil 5.14. Harmonikli Yük Akımı	105
Şekil 5.15. Harmonikli kaynak akımının THB'si (AHE etkin değil).....	105
Şekil 5.16. Kaynak Akımı (AHE)	106
Şekil 5.17. Kaynak akımının THB'si (AHE)	106

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Özel uygulamalar için aktif güç filtresi seçimi.....	18
Tablo 2.2. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması (Yılmaz, 2006)	27
Tablo 3.1. FFT Yöntemine Ait Harmonik Verileri.....	47
Tablo 3.2. ARGT Yöntemine Ait Harmonik Verileri.....	58
Tablo 3.3. SRÇY Yöntemine Ait Harmonik Verileri	69
Tablo 4.1. IEC Std 1000-3-4 harmonik sınırlamalar	72
Tablo 4.2. IEEE Std 519-1992 akım harmonik sınırları	73
Tablo 4.3. AHE yöntemine ait harmonik verileri	90
Tablo 4.4. Dört yönteme ait harmonik verileri	91
Tablo 5.1. Üç yükün aynı anda devreye alınması durumundaki yük değerleri	96
Tablo 5.2. Dört yükün aynı anda devreye alınması durumundaki yük değerleri.....	99
Tablo 5.3. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı	102
Tablo 5.4. Yüklerin %50'si aynı anda devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı.....	102
Tablo 5.5. Yüklerin %90'ı aynı anda devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı.....	103

KISALTMALAR LİSTESİ

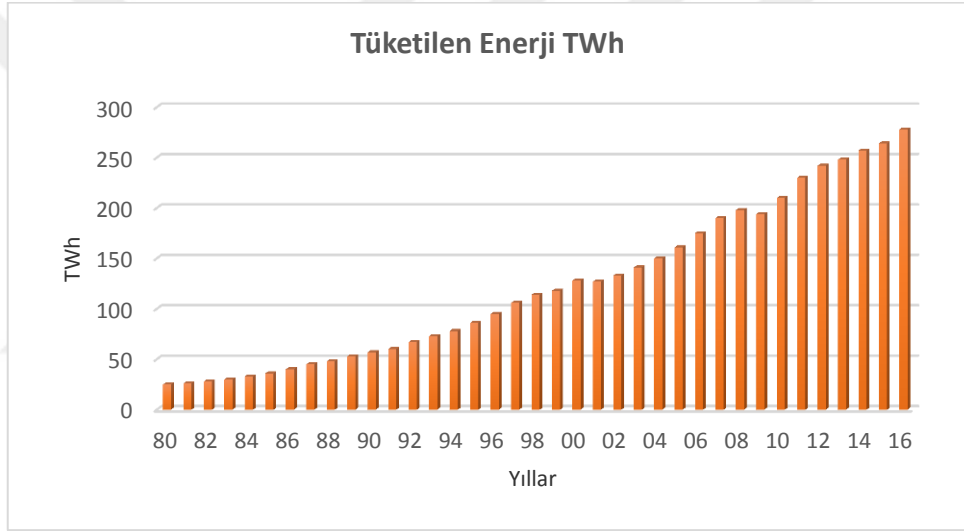
PF	: Pasif Filtre
PPF	: Paralel Pasif Filtre
SPF	: Seri Pasif Filtre
SPPF	: Seri Paralel Pasif Filtre
AGF	: Aktif Güç Filtresi
PAGE	: Paralel Aktif Güç Filtresi
SAGF	: Seri Aktif Güç Filtresi
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre
BGKD	: Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi
KGF	: Karma Güç Filtresi
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
FFT	: Fast Fourier Transform
ARGT	: Anlık Reaktif Güç Teorisi
SRÇY	: Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi
AHE	: Adaptif Harmonik Enjekte Algoritması
GBE	: Gerilim Beslemeli Evirici
ABE	: Akım Beslemeli Evirici
HBAD	: Histerisiz Bant Akım Denetleyici
OKH	: Ortalama Karesel Hata

SİMGELER LİSTESİ

$\cos \varphi$	: Şebeke güç faktörü
f	: Şebeke frekansı
H	: Histerisiz bant aralığı
i_d	: d-eksen akımı
i_{c-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_{DA}	: Kayıp aktif güç
pu	: Birim değer
Q, q	: Reaktif güç
Q_c	: Kapasitif reaktif güç
S	: Görünür güç
S_1	: Evirici a-fazı üst anahtar
S_2	: Evirici a-fazı alt anahtar
V	: Şebeke gerilimi etkin değeri
V_{DA}	: Şebeke gerilimi etkin değeri
V_α	: Kaynak gerilimi α -eksen bileşeni
V_β	: Kaynak gerilimi β -eksen bileşeni
XL	: Endüktif reaktans
φ	: Şebeke gerilimi ve akımı arasındaki açı
ω	: Açısal frekans
I_m	: Harmonikli akımın genliği

1. GİRİŞ

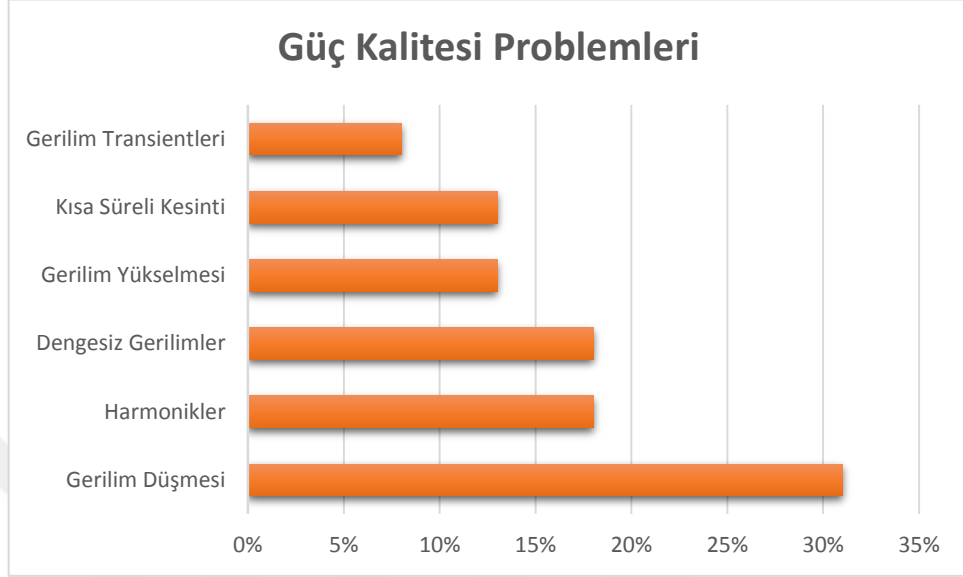
Günümüzde elektrik enerjisi, toplumların vazgeçilmez bir ihtiyacıdır. Teknoloji ve nüfusa bağlı olarak elektrik enerjisine talep her geçen gün katlanarak artmıştır. 1980-2016 yılları arasında Türkiye’de tüketilen toplam elektrik enerjinin değişim grafiği Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Türkiye’nin toplam elektrik tüketimi 1980’de 25 TWh iken 2016 yılında bu rakam 278 TWh’e yükselmiştir. Türkiyede elektrik tüketiminin 2023 yılında bazı senaryoya göre yıllık ortalama %4,8 artışla 385 TWh'e ulaşması beklenmektedir (Doğan 2016; URL-1, 2018).



Şekil 1.1. 1980-2016 Yılları arasında türkiye’de tüketilen toplam elektrik enerjisi (Doğan,2016)

Her alanda yoğun bir şekilde kullanılan elektrik enerjisindeki beklenmedik kısa süreli kesintiler, bozukluklar, kırpışmalar veya gerilimdeki düşüklükler çok ciddi problemlere, maddi kayıplara ve iş gücünde aksamalara neden olmaktadır. Bu yüzden enerjinin kalitesi ve güvenilirliği özel bir önem arz etmekte olup, bu durumun tabii bir sonucu olarak literatüre “Güç Kalitesi” kavramı girmiştir. Güç kalitesi noktasında mühendisler ve araştırmacılar çok sayıda çalışma yapmışlardır. Elektrik enerjisinin kaliteli olarak nitelendirilmesi için; şebeke gerilimi ve frekansının standartların öngördüğü limitler içerisinde ve sinüsoidal dalga formunda olması gerekmektedir. Aksi durumda şebeke geriliminde dengesizlikler, dalgalanmalar, kısa ve uzun süreli kesintiler, çökmeler, kırpışmalar, tümsekler ve sınır değeri üzerindeki harmonikler “Güç Kalitesi Problemleri” olarak tanımlanır. Seng tarafından yapılan çalışmada gerilim düşmesi / yükselmesi ve

harmoniklerin endüstriyel süreçlerde karşılaşılan en yaygın güç problemleri olduğu Şekil 1.2’de gösterilmiştir (Seng, 2002).



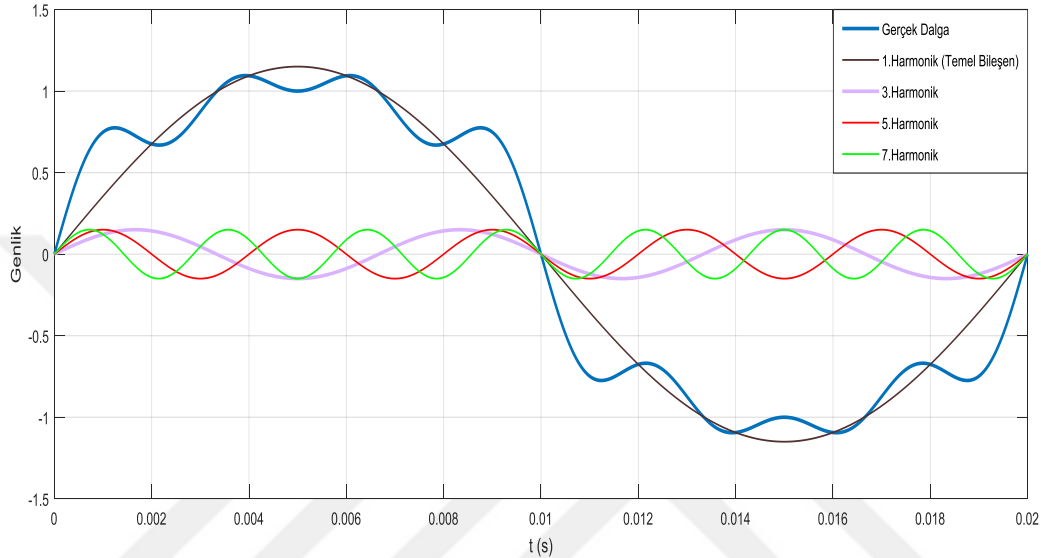
Şekil 1.2. Güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması (Seng, 2002).

Genel olarak iki tür güç kalitesi problemi vardır. Birincisi doğrusal olmayan yüklerden dolayı çekilen düşük kalite akımlardır. Diğer güç sistemlerinde meydana gelen arızaların neden olduğu gerilim bozukluklarıdır (Teke, 2011). Akım kalitesi ideal akımdan sapmayla doğru orantılı azalmaktadır. İdeal akım sabit frekans ve genliğe sahip tek frekanslı sinüs dalgasına sahip olan akımdır. Güç kalitesi problemleri ile karşılaşmamak için akım ve gerilim temel frekansa sahip sinüsoidal bir değişime sahip olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için sistemin sinüsoidal bir kaynakla beslenmesi ve doğrusal yüklerle beslenmesi gerekmektedir. Ancak güç sistemlerine bağlanan doğrultucular, inverterler, AC regülatörler, ark fırınları, motorlar ve sayıları her geçen gün hızla artan güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yükler şebekeden harmonikli akım ve reaktif güç çekerler. Bu harmonikli akımlar güç sistemlerinde pek çok farklı empedanslardan akarlar ve gerilim harmonikleri üretirler. Üretilen gerilim harmonikleri güç sisteminin tamamına yayılarak sisteme bağlı tüm elemanları etkiler (Gali vd., 2017).

Sistemdeki harmonikler, transformatörlerde ısı artışına, düşük güç faktörüne, motorlarda moment dalgalanmasına, rezonans nedeniyle aşırı gerilime, şebeke boyunca harmonik gerilime ve ortak noktaya bağlı tüm yüklerin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Ayrıca enerji iletim hatlarında ilave kayıplar oluştururlar. Bazı durumlarda

harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler (Karuppanan. P, 2012; Yıldız, 2006).

Güç kalitesi sorunların başında gelen harmonikler, güç sistemindeki temel frekansın genellikle tamsayı katları olan akım veya gerilimlerdir. Örneğin, temel frekans 50 Hz ise, 3'üncü harmonik 150 Hz, 5'inci harmonik 250 Hz'dir. Şekil 1.3'te harmonik bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Harmonik bileşenler

Bir güç sisteminde harmonik üreten kaynaklar üç gruba ayrılabilir (Yıldız, 2006):

1. Şebeke içerisine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü doğrusal olmayan elemanlar,
2. Büyük güçlü, ancak rastgele değişen doğrusal olmayan yükler,
3. Büyük güçlü statik konvertörler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, alçak gerilim aygıtlarının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarj prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları sebebiyle bu gruba dâhil edilebilir. Tek tek bakıldığında küçük güçlü olmalarına rağmen sayıca çok olmaları göz önüne alındığında tümünün harmonik etkisi önemli olabilmekte ve harmonik distorsiyonunun artmasına neden olmaktadır.

İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği; yüksek gerilimli iletim şebekesine doğrudan bağlanan ve anma gücü MW mertebesinde olan, genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış bulunan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz

olup, zamana göre rasgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olmaktadır.

Üçüncü gruptaki büyük güçlü konvertörlerin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenlerde güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır (Yıldız, 2006).

Harmonik bozulmayı ölçmek için Toplam Harmonik Bozulma (THB) terimi kullanılır. Elektrik şebekelerindeki, gerilim ve akım harmoniklerinin kabul edilebilir oranını belirleyen uluslararası standartlar IEEE-519-1992 standardıdır. Bu standarta göre yüzde olarak Toplam Harmonik Bozulma (%THB) değeri akım için %5 ve gerilim için %3 olarak belirlenmiştir. Elektrik şebekesinin ve tesislerinin güvenliği açısından, sistemler tasarlanırken bu değerler göz önünde bulundurularak, harmonik kompanzasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Anwar 2009). Ülkemizde henüz tüketiciler açısından harmonik sınırlamalarla ilgili herhangi bir cezai yaptırım bulunmamaktadır (Uçar,2012).

Geçmiş yıllarda, güç sistemlerinde harmonik bozulmayı ortadan kaldırmak için Pasif Filtreler (PF) tasarlanmıştır. PF'ler endüktif ve kapasitif elemanlardan oluşup sisteme paralel bağlanır ve yok edilmek istenen harmoniğin frekansına göre ayarlanır. Yapılarının basit, yatırım maliyetlerinin düşük olması ve kullanım kolaylıklarından dolayı PF'ler uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Ancak PF'nin 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. Yüksek güçlerde yapılacak güç faktörü iyileştirme işlemlerinde PF yapılarında kullanılan endüktans ve kondansatör elemanlarının da boyutları büyümekte ve sonuç olarak boyut problemi oluşmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak son yıllarda güç elektroniği elemanları ve mikro işlemcilerdeki gelişmelere paralel olarak pasif filtrelerin sakıncalarını gidermek için Aktif Güç Filtreleri (AGF) yapıları kullanılmaya başlanmıştır (Uçar, 2012).

Doğrusal olmayan yükler harmonik akımların yanı sıra reaktif güç de çekmektedirler. Transformatörler, asenkron motorlar, doğrultucular, indüksiyon ve ark ocakları, kaynak makineleri, floresan lambalar, sodyum ve cıva buharlı lamba balastları gibi yükler, çalışabilmeleri için şebekeden aktif gücün yanında reaktif güç de çekmektedir. 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.

Çekilen reaktif güç, endüktif ve kapasitif olmak üzere ikiye ayrılır. Reaktif Güç Kompanzasyonu şebekenin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli yöntemler kullanılarak karşılanması işlemi olarak adlandırılır. Endüstriyel yükler genellikle endüktif olduğundan kapasitif bir yük ile kompanze edilirler. Kapasitif reaktif güç üretiminde; senkron generatörler, senkron motorlar ve kondansatörler kullanılır. Kondansatörler ile üretilen reaktif güç kolay ve kontrol edilebilir olduğundan kompanzasyon için genellikle kondansatör ve kondansatör grupları kullanılır. Reaktif güç kompanzasyonunun aşağıda sıralandığı gibi birçok faydası vardır (Çetin, 2018).

1. Şebekenin güç kapasitesi artar
2. Akımın azalması şebekenin ısı kayıplarını da azaltır
3. Gerilim düşümü azalır
4. İletken kesitleri azalır
5. Faz gerilim dengesizlikleri azaltılmış olur
6. Gerilim dalgalanmaları (kırpışma olayları) azalır
7. Harmonikler azalır

Klasik metotlarla yapılan kompanzasyon, reaktif gücü zamanla hiç değişmeyen ya da çok yavaş değişen yükler için bir çözüm olabilir. Ancak günümüzde endüstriyel yüklerdeki reaktif güç talebinin ani ve hızlı değişmesi nedeniyle yeni kompanzasyon tasarımları gerekmiştir.

AGF, harmonik gidermenin yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu ve yük dengeleme işlemlerini de yapmaktadır. Şebekede rezonans problemlerine neden olmadıklarından PF üzerinde önemli bir avantajlara sahiptirler (Vardar, 2011). Aktif filtre genel bir terimdir. Bir grup güç elektroniği devrelerine bağlı güç anahtarlama aygıtları ve pasif enerji depolayan endüktörler ve kapasitörlerden oluşur. Bu devrelerin işlevleri çok farklı uygulamalara göre değişebilir. AGF genellikle düşük ve orta gerilim güç kaynaklarındaki akım harmoniklerinin kontrolü ya da yüksek gerilim dağıtım seviyelerinde reaktif güç ve gerilim kontrolü için kullanılırlar.

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'lerin yatırım maliyetinin pasif filtrelerle göre fazla olmasına rağmen,

değişen yük şartlarına cevap verebilmesi, sisteme bağlantı kolaylığı ve güç kalitesi problemlerine çeşitli açılardan çözüm getirebilmesi gibi önemli özellikleri bu yapıları ön plana çıkarmaktadır.

AGF'ler temel olarak Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF), Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF) ve Karma Güç Filtresi (KGF) olmak üzere olarak üçe ayrılırlar. PAGF yaygın olarak yükten kaynaklanıp şebeke üzerinde (yükten şebekeye) oluşan harmonik akımlar, reaktif güç, akım dengesizlikleri ve gerilim dalgalanmaları gibi problemleri kompanze etmek için kullanılırlar.

SAGF yükten şebekeye oluşan problemlerin yanı sıra daha çok şebekeden kaynaklanıp yük üzerinde (şebekeden-yüke) oluşan; gerilim çökmeleri ve sıçramaları, gerilim dengesizlikleri, gerilim bozulması, gerilim kesintisi, gerilim dalgalanmaları ve ani gerilim düşümleri (çentik) gibi problemleri kompanze edebilirler.

KGF ise LC pasif filtrenin aktif güç filtresine seri veya paralel bağlanmasıyla oluşur. Aktif ve pasif güç filtrelerinin beraber kullanılmasıdaki amaç AGF akım ve gerilim değerlerini düşürüp başlangıç maliyetini azaltmak ve verimini yükseltmektir. Yani eskiden var olan pasif filtre sistemlerine aktif filtreler eklenebilir. Karma filtrelerde hem aktif filtrelerin hem de pasif filtrelerin avantajları birleştirilmiştir. Pasif filtreler temel harmonikleri süzme ve tepkin güç kompanzasyonu yaparken, aktif filtreler hassas ve dinamik yapısı sayesinde arta kalan harmonikleri süzme ve kompanzasyon görevlerini yerine getirir (Das, 2017).

PAGF'nin başarılı bir kontrolü için doğru bir referans akım çıkartma yöntemi kullanılması ve referans akıma göre eviriciyi kontrol etmek üzere anahtarlama sinyallerinin üretilmesi çok önemlidir. Genelde referans akım çıkartma yöntemleri zaman domen, frekans domen ve diğer algoritmalar olmak üzere sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında adaptif ve en küçük kareler yöntemi temelli yeni bir algoritma ile referans akım çıkartılmıştır. Çıkartılan referans akıma göre evirici anahtarlama sinyalleri Histerisiz Bant Akım Denetleyici ile üretilmiştir. Histerisiz Bant Akım Denetleyici gerilim beslemeli eviriciye sahip AGF'nin tüm uygulamalarında çok uygun bir kapı işaretleri üretme tekniği olduğu kanıtlanmıştır (Suresh vd., 2012).

1.1. Literatür Özetleri

AGF'ler, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu kaynak akımlarındaki harmoniklerini gidermek amacıyla ters fazda ve eşit genlikteki harmonik bileşenleri

elektrik şebekesine enjekte etmek için güç elektroniği dönüştürücülerini (PWM voltajı veya akım kaynağı dönüştürücüleri gibi) kullanan aygıtların genel ismidir.

AGF kavramı ilk olarak 1971'de lineer yükselteçlere dayalı uygulama öneren Sasaki ve Machida tarafından tanıtılmıştır (Sasaki ve Machida, 1971).

Gyngyi ve Strycula, PWM akım kaynaklı evirici (CSI) ile PWM gerilim kaynaklı eviriciye (VSI) dayalı bir aktif güç filtresi sistemi ailesi önermiştir (Gyngyi ve Strycula, 1976)

Akagi ve arkadaşları, anlık reaktif güç teorisi temelli bir reaktif güç kompanzasyon sistemi sunmuştur. Bu sistemde akım, gerilim harmoniklerinin ve reaktif gücün azaltıldığı görülmüştür (Akagi vd., 1984).

Moran, giriş akımı ve çıkış gerilimini bağımsız denetleyebilen seri-paralel bir filtre tasarlamıştır (Moran, 1989).

Bhattacharya, anlık üç fazlı akımların d-q bileşenlerinin (doğrudan ve kuadratik) hesaplanmasını önermiştir. Bu yöntemde senkron referans çatı konsepti oluşturulmuş ve yük akımlarından referans akımları üretmek için kullanılmıştır (Bhattacharya vd., 1991).

S. Fryze, fryze güç teorisi olarak bilinen gerilim ve akımın rms değerine dayanan yeni bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. M. Depenbrock, fryze güç teorisine dayanan güç analiz yöntemini desteklemiş ve F. Buchholz tarafından da modifiye edilmiştir. Bu geliştirilmiş yöntem artık FBD (Fryze-Buchholz-Dpenbrock) yöntemi olarak bilinmektedir (Depenbrock, 1993).

Peng ve Lai, sıfır dizi akımları olan veya olmayan sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan, dengeli veya dengesiz üç fazlı güç sistemleri için geçerli olan genelleştirilmiş bir reaktif güç teorisini önermiştir (Peng ve Lai, 1996).

Nassar Mendalek ve arkadaşları üç fazlı üç telli gerilim kaynaklı şönt AGF'ne ait doğrusal olmayan dekuplaj kontrol yöntemini geliştirmiştir. Bu çalışmada referans akımlar, senkronize referans çatı yöntemi uygulanarak çıkartılmıştır (Mendalek vd.,2001).

Herrera ve Salmeron, aktif filtrenin, anlık reaktif güç teorisi ile daha iyi kontrol edilebileceğini savunarak sinüsoidal akımlarda daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir (Herrera ve Salmeron, 2007).

Corasaniti ve arkadaşları, orta gerilimde meydana gelen harmonik ve reaktif güç sorununu ele almışlardır. Güç kalitesini düzeltmek üzere 13,8 kV'luk şebekeye bağlanan hibrit bir PAGF'yi inceleyerek sonuçları sunmuşlardır. Bu çalışmada pasif filtre ile aktif filtrenin avantajları birleştirilmiş ve detaylı bir şekilde anlatılmıştır (Corasaniti vd., 2009).

Kumar ve Mahajan, PAGF'yi kontrol etmek için bulanık mantık, yapay sinir ağlarını ve genetik algoritmayı kullanmışlardır. Bu yöntemleri farklı yük koşullarında Matlab/Simulink'te modelleyip sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu yöntemlerin yakın bir zamana kadar pratik uygulamalarının yapılamayacağı öngörülürken mikrodenetleyiciler ve DSP'lerle artık rahat bir şekilde yapılacağını vurgulamışlardır. Bulanık mantık denetleyici tarafından sunulan bir esneklik ve sağlamlık avantajı olmasına karşı bazı sınırlamaların olduğunu ve bu sınırlamaları yapay sinir ağları ile aşılacaklarını söylemişlerdir (Kumar ve Mahajan, 2009).

Pereira ve arkadaşları paralel AGF'ne adaptif çentik filtresini uygulayarak harmonikleri tespit etme sürelerini iyileştirmek üzere çalışmalar yapmışlardır. Bunun için en küçük kareler temelli algoritma ve yinelemeli en küçük kareler temelli algoritma olmak üzere iki tür algoritma sonuçları elde etmişlerdir. Söz konusu algoritmaların literatürde bahsedilen diğer yöntemlerden daha hızlı geçici cevap verdiğini göstermiştir (Pereira vd., 2011).

Hamad ve arkadaşları PAGF'yi kontrol etmek için yapay sinir ağlarını kullanan akıllı bir kontrol tekniğini sunmuşlardır. Önerilen yöntem özel harmonikleri azaltarak toplam harmonik bozulmayı düşürmüştür. Ek olarak, harmonik referans akımını çıkarıp filtre akımını kontrol ederken uygulanan gecikme süresini azaltmışlardır. Önerilen sistem için Matlab/Simulink kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Önerilen PAGF performansı deneysel olarak da doğrulanmıştır (Hamad vd., 2012).

Panigrahi ve arkadaşları, PAGF'nin performansını artırmak için yeni bir kontrol stratejisi açıklamışlardır. Yaptıkları çalışma ile aktif bir güç filtresinin performansını, evirici özelliklerine, uygulanan kontrol yöntemine ve referans sinyal üretiminin doğruluğuna bağlamışlardır. Bu çalışmada PAGF'nin performansını belirlemede en önemli ayağın referans işaret üretmek olduğunu belirtilmiştir. Önerdikleri yeni kontrol stratejisi, düşük geçirgen filtre ve Kalman filtrenin birleşimine dayalı referans akım üretme yöntemidir. Referans sinyal üreticinin performansı Matlab/Simulink aracılığıyla doğrulanmıştır. Benzetim sonuçlarına bakıldığında referans sinyal üreticinin başarılı ve mükemmel bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir (Panigrahi vd., 2012).

Panigrahi ve arkadaşları PAGF'nin referans akım tahmini için yeni bir yöntem olan Kalman filtresini önermişlerdir. Kullanılan yöntem özellikle ortak bağlantı noktasındaki gerilime ait temel frekansın fazını tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca,

IGBT'leri sürmek amacıyla tetikleme sinyalleri doğrudan bu kontrol tarafından üretildiği için ayrıca bir kontrolöre gerek olmadığı vurgulanmıştır (Panigrahi vd., 2014).

Qasim ve arkadaşları, algoritmik basitliği ve paralel hesaplama doğası nedeniyle ADALINE yöntemini PAGF için önermişlerdir. ADALINE'nın hesaplama yükünü azaltmak amacıyla En Küçük Kareler yöntemini (EKKY) kullanmışlardır. Aynı zamanda EKKY çevrimiçi kullanılabileceğini de belirtmişlerdir. Bu çalışmada frekans tahmini ve besleme gerilimi senkronizasyonu için iki ADALINE kullanılırken, üçüncü ADALINE yük akımının temel aktif bileşenini çıkarmak için kullanılmıştır. Tahmin hızını ve doğruluğunu etkileyen ana faktörün, LMS ağırlık güncelleme kuralında yer alan öğrenme oranı olduğunu belirtmişlerdir. Genellikle, bu öğrenme oranı deneme-yanılma yolu ile seçilmiştir. Bu çalışmada, her bir ADALINE öğrenme oranı, en iyi dinamik performansı elde etmek için parçacık sürüsü optimizasyonu kullanılarak ayarlanmıştır. Önerilen yöntem deneysel olarak da yapılmıştır (Qasim vd., 2014).

Yousfi ve arkadaşları üç fazlı PAGF kontrolü için doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikleri yok etmek üzere bulanık mantık kontrolör sunmuşlardır. Önerilen yöntem, bulanık mantığı kullanıp mevcut hatayı ayarlayarak PAGF'nin kompanzasyon yeteneğini geliştirmek için tasarlanmıştır. Çalışmada çok değişkenli bir filtreye dayanan gelişmiş bir kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Önerilen kontrol yaklaşımının yeniliği, Concordia eksenine göre yük akımı referansının harmonik içeriğini çıkarabilen çok değişkenli bir filtrenin kullanılmasıdır. Bu yeni referans harmonik çıkarma tekniğinin etkinliği Matlab/Simulink'te benzetim sonuçları ile gösterilmiştir (Yousfi vd., 2015).

Alfonso-Gil ve arkadaşları yaptıkları çalışmayla, PAGF'ye uygulanacak lineer matris eşitsizlikleri (LME) temelli bir optimizasyon algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma, bir LME formülasyonu vasıtasıyla, kuadratik olarak sınırlandırılmış kuadratik bir programı çözer ve en uygun referans akımlarını hesaplar. Burada sunulan PAGF, iyi bir dinamik yanıt sunmuştur. Hem benzetimde hem de laboratuvarında elde edilen sonuçlar bu durumu göstermiştir. Bu bağlamda, deneysel sonuçlar yük akımlarının dengesizliği, reaktif ve hatta harmonik bozulmayı seçici olarak telafi etme kabiliyetini de göstermiştir (Alfonso-Gil vd., 2015).

Wang ve Fei, paralel aktif güç filtresinin performansını arttırmak için uyarlamalı bir radyal tabanlı fonksiyon yapay sinir ağları (RBFNN) bulanık kontrol şeması önermektedirler. RBFNN, PAGF dinamik modelindeki lineer olmayan fonksiyonun yakınlaştırılmasında kullanılır ve RBFNN'nin ağırlıkları çevrimiçi olarak ayarlanmaktadır.

Ağ yakınsama hatasını telafi etmek ve mevcut gürültüyü ortadan kaldırmak için, kayan mod kontrol süresi, sistemin sağlam performansını artırabilecek uyarlamalı bulanık sistemler tarafından ayarlanmaktadır. Önerilen yöntemin kullanılmasıyla PAGF'nin benzetim sonuçları, önerilen kontrolörün etkinliğini teyit etmiş, olağanüstü kompanzasyon performansını ve güçlü sağlamlığı göstermiştir (Wang ve Fei,2016).

Badoni ve arkadaşları yaptıkları çalışmada üç fazlı bir PAGF için yeni bir adaptif kontrol tekniği önermişlerdir. Bu çalışmada, yük akımlarının temel aktif ve reaktif güç bileşenlerine karşılık gelen ağırlıklı değerleri çıkarmak için özyinelemeli ters teori temelli bir kontrol algoritması kullanılmıştır. Bu adaptif kontrol algoritması, karmaşık hesaplama yükünü azaltma, hızlı yakınsama ve sağlam performansından dolayı diğer kontrol algoritmalarına göre avantajlı olduğu belirtilmiştir. PAGF'nin önerilen kontrol algoritmasının performansı, Matlab / Simulink ortamında benzetim sonuçları ile kanıtlanmış ve bunlar, laboratuarda PAGF'nin geliştirilmiş deneysel prototipinde elde edilen test sonuçları ile doğrulanmıştır (Badoni vd., 2016).

Feng ve Wang modüler tasarımı bir PAGF sunmuştur. Geleneksel merkezi PAGF ile karşılaştırıldığında, modüler tasarımı PAGF, harmonikleri daha hassas ve hızlı bir şekilde izleyebilir ve bu da harmonik azaltma için daha iyi bir çözüm sağladığını göstermiştir. Bu makale, modüler tasarımı sağlamak ve paralel rezonans kontrol yöntemini araştırmak amacıyla üç seviyeli bir PAGF modellemesi sunmuştur. Deneysel sonuçlar PAGF'nin hassas harmonik izleme yeteneğini göstermiştir (Feng ve Wang, 2017).

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı , akım harmoniklerini gideren ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilen PAGF için yeni adaptif bir denetim yöntemi olan Adaptif Harmonik Enjekte (AHE) algoritmasının performansını göstermektir. Bu yöntemi kullanmanın temel özelliği hızlı değişken yüklerde de PAGF bu değişimlere adaptif olarak uyarlanarak harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesidir.

PAGF kontrolü için zaman ve frekans domeninde kullanılan yöntemler kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda çok farklı algoritmalarla da PAGF kontrol edilmeye başlanmıştır. Bu tez çalışmasında PAGF'yi kontrol etmek amacıyla kullanılan AHE algoritması en küçük kareler temelli bir algoritmadır. AHE algoritması, özel bir amaç için geliştirilmiş olan ve doğrusal olarak çalışan birçok alt algoritmanın birleşiminden oluşan yeni ve özgün bir algoritmadır. Başlangıçta bilgisayarların görme problemi, çeşitli görüntü

işleme analizlerinde ve kablosuz haberleşme uygulamalarında başarı ile uygulanmıştır (Yarkan vd., 2012).

Harmonik dalgalanmaları genellikle periyodiktir. Bu nedenle uygulanan yöntem, harmonikleri azaltmak amacıyla, sisteme ait istenilen bir büyüklüğe harmonik enjekte edilmesi esasına dayanır. Enjekte edilecek harmoniklerin uygun genlik ve faz değerleri, çevrimiçi olarak her an doğru olarak tahmin edilmektedir. Enjekte edilecek harmoniği bulmak için açının sinüs ve kosinüsü uygun değerlerle çarpılırsa istenilen genlik ve fazda bir harmonik değeri elde edilebilir.

Tez çalışmasında PAGF'nin denetimi için diğer yöntemlere göre kolay ve az bir hesaplama yükü ile yapılabilen AHE algoritmasının başarıyla uygulanabileceği amaçlanmaktadır. Önerilen bu yöntemin diğer yöntemlerden farkı, istenilen harmoniğin sisteme enjekte edilmesi ve ağırlık diye adlandırdığımız harmoniğin genliğini doğrusal olmayan yüke bağımlı olarak her an çevrimiçi güncelleyerek istenilen cevabı verebilmesidir.

Önerilen yöntemde yük değiştirilerek sistemin adaptif olduğu gösterilip, PAGF'nin verdiği cevaba göre yöntemin etkinliğinin ispat edilmesi amaçlanmaktadır.

1.3. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, elektrik tesislerinde güç kalitesi kavramı, reaktif güç ve harmonikler gibi güç kalitesi problemleri, bu problemlerin olumsuz etkileri ve bu problemlerin çözümü için kullanılan yöntemler kısaca anlatılmıştır. Kullanımı gittikçe yaygınlaşan AGF sistemleriyle ilgili genel bilgiler verilmiş ve literatürde AGF ile yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

İkinci bölümde harmonik azaltma yöntemlerinden pasif filtre ve aktif filtre çeşitlerine değinilmiştir. Bu filtre çeşitlerinin kullanım yerleri ve hangi sorunlara çözüm buldukları detaylı olarak anlatılmıştır. Yine bu filtrelerin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde PAGF'nin en önemli kısımlarından olan sağlıklı bir kompanzasyon yapmak ve harmonikleri gidermek için kullanılan referans akım çıkartma yöntemleri anlatılmıştır. Referans akım çıkartma zaman ve frekans domeninde çeşitli alt başlıklara ayrılmaktadır. Bu alt başlıklara kısaca değinilmiştir. Yine bilgisayar algoritmalarının hızla yayılma başlaması ve PAGF'nin kontrol edilmesinde kullanılan algoritmalara kısaca değinilmiştir.

Dördüncü bölümde PAGF'yi kontrol etmek amacıyla önerilen ve bu tez çalışmasında geliştirilen en küçük kareler yöntemi temelli AHE algoritmasının teorisi ve temel özellikleri açıklanarak, algoritmayı oluşturan alt algoritmaların işlevleri hakkında ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde bu tez çalışmasında önerilen AHE algoritmali PAGF ile literatürde yapılan çalışmaların sonuçları kıyaslanmıştır. Ayrıca Matlab/Simulinkte benzetimleri yapılan üç fazlı AHE algoritmali PAGF ve PAGF'lerde kullanılan diğer üç farklı yöntemle ilişkin sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Farklı yük koşullarında algoritmaların performansları, benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

Altıncı bölümde ise, tezde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar, amaca uygunluk bakımından irdelenmiştir.

2. HARMONİKLER VE HARMONİK AZALTMA YÖNTEMLERİ

Güç sistemlerinde, akım ve gerilimin dalga şekilleri sinüzoidal ve temel frekanslı bir değişime sahip olmalıdır. Bu durum şebekeye bağlı yüklerin sinüzoidal bir kaynaktan beslenmesi ve doğrusal yapıda olması halinde sağlanabilir. Doğrusal olmayan yüklerde ise, şebekeden çekilen akım ve gerilimin dalga şekli sinüzoidal yapıdan uzaklaşır ve harmonikli bir yapıya dönüşür. Dolayısıyla Harmonikler, temel frekansın tam katları olan bir frekansa sahip periyodik bir dalganın sinüs bileşenleri olarak tanımlanabilir. Doğrusal olmayan yükler tarafından üretilirler.

Anahtarlama güç kaynakları, ark ve pota ocakları, motor sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, elektronik balastlar, fotovoltaiik sistemler, AA/DA dönüştürücüler ve çevirgeçler gibi doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin bozulmasında en büyük etkendirler. Akım harmonikleri ve akım harmoniklerinden kaynaklanan gerilim harmonikleri, bugün birçok ülkede ciddi bir problem haline gelmiştir. Sözü edilen bu olumsuzlukları gidermek ya da azaltmak için harmoniklerin şebekede bastırılması, yani harmonik kompanzasyonu yapılması gerekmektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan yüklerin yaygın olarak kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda, harmonik kaynaklı sorunları çözmek için filtreler kullanılmaktadır. Harmoniklerin oranını % olarak belirten büyüklük, THB ile ifade edilmektedir. THB, akım ve gerilim dalgalarındaki bozulmayı ifade eden bir göstergedir. Bir başka ifade ile THB, periyodik bir dalganın bir sinüs dalgasından sapmasıdır.

Uluslararası IEEE 519-1992 standartlarına göre kabul edilen THB, gerilim için %3, akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelebilir. THB, harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının temel bileşenin efektif değerine oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Akım ve gerilim için THB ifadeleri, denklem (2.1) ve denklem (2.2) ile verilmiştir.

$$THB_i = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2} \quad (2.1)$$

$$THB_v = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{V_{sh}}{V_{s1}} \right)^2} \quad (2.2)$$

Burada I_{sh} akım harmonikleri ve I_{s1} akımın temel bileşeni, V_{sh} gerilim harmonikleri ve V_{s1} gerilimin temel bileşenidir.

2.1. Harmoniklerin Etkileri

Doğrusal olmayan yükler, beslendikleri baranın gerilim ve akım dalga şekillerini olumsuz yönde etkilemekte ve doğrusal olmayan bir akım çekerek enerji kalitesini bozmaktadırlar. Doğrusal olmayan bu akımlar, güç sistemlerinde gerilim harmonikleri üretirler ve üretilen gerilim harmonikleri, güç sisteminin tamamına yayılarak sisteme bağlı tüm elemanları etkiler. Akım ve gerilim harmonikleri transformatörlerin aşırı ısınmasına, sigortaların yanmasına, kesicilerin açma-kapama yapamamasına, sistemin güç faktörünün ve verimliliğinin düşmesine, elektrik cihazlarının çalışma ömürlerinin azalmasına, ölçü cihazlarının yanlış çalışmalarına, ölçü hatalarının yükselmesine sebep olurlar. Ayrıca güç sistemlerinde oluşan harmonikler; transformatörler, enerji iletim hatları, motorlar, generatörler, kondansatörler vb. elemanlar üzerinde ilave kayıplara yol açarlar. Bazı durumlarda harmonikler, güç sistemi elemanlarının zarar görmesine ya da devre dışı kalmalarına da neden olurlar.

2.1.1. Transformatörler üzerindeki etkileri

Harmonikler, transformatörde kayıpları ve ısınmayı arttıran önemli bir etkidir. Akım harmonikleri kaçak akı ve bakır kayıplarında artışa neden olmaktadır. Gerilim harmonikleri ise, demir kayıplarında artışlara neden olmaktadır. Bu kayıp artışları sonucunda transformatörde ek ısınma meydana gelmektedir. Ayrıca harmonik bileşenler transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı bir yükün veya devre elemanının arasında rezonans meydana getirebilmektedir. Tüm bu kayıplar frekansla ilişkilidir. Frekansın artmasıyla kayıplar da artmaktadır. Harmonik bileşenlerin seviyesi arttıkça frekans değeri büyüdüğünden yüksek seviyeli harmonik bileşenler, düşük seviyeli harmonik bileşenlerden daha fazla kayıplara neden olmaktadır (Alaşahan,2014). Genel olarak ifade edilecek olursa, manyetik çekirdekli bir elemanda oluşacak demir kayıpları, bu elemana uygulanacak gerilim şekli ile ilgilidir. Manyetik çekirdekli bir elemana uygulanan harmonikli gerilimin N tane harmonik bileşen içermesi durumunda ani değer matematiksel olarak denklem (2.3)'de ifade edilmektedir.

$$V(t) = \sum_{n=1}^N V_n(t) \quad (2.3)$$

Gerilimin efektif değeri denklem (2.4)'de verilmektedir.

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (2.4)$$

Demir kayıpları,

$$P_{Fe} \cong K_m V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (2.5)$$

İle ifade edilmektedir. n. harmonik için gerilim harmoniği oranı olan

$$\beta_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (n=2,3,\dots,N) \quad (2.6)$$

ifadesi kullanılarak demir kayıpları yeniden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{Fe} \cong K_m V_1^2 (1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2) \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de görüldüğü gibi sistemde harmoniklerin bulunması durumunda temel bileşenin oluşturduğu kayıplara ek olarak harmoniklerin neden olduğu kayıplar da meydana gelmektedir.

2.1.2. İletim Hatları Üzerindeki Etkileri

Harmonikler iletim hatları üzerinde kayıp güçler ve sisteme bağlı bütün elemanlar üzerinde gerilim düşümleri meydana getirmektedir. Akımın n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü,

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \quad (2.8)$$

olarak ifade edilmektedir. Akım harmoniklerinin oluşturduğu kayıp güç denklem (2.9)'da gösterilmektedir. Burada verilen ek kayıplardır.

$$P_k = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.9)$$

Bu denklemdeki I_n n. harmonik bileşen akımını, R_n ise n. harmonik frekansındaki omik direnci göstermektedir.

2.1.3. Motorlar ve generatörler üzerindeki etkileri

Harmonikler, motorlar ve generatörler üzerinde transformatöre benzer bir etki oluşturur. Harmonikler, motor ve generatörlerde demir ve bakır kayıplarını artırır ve ısının yükselmesini sağlar. Bu yüzden harmonik bileşenler, döner makinelerin verimi ile

momentinin düşmesine ve daha gürültülü çalışmalarına neden olurlar. Her bir harmonik gerilimi (5., 7., 11., ...) makinenin statorunda bir harmonik akım indükleyerek ve stator sargılarında ek ısı meydana getirir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısısı daha da yükselir. Harmonikler sebebiyle motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltır (Alaşahan, 2014).

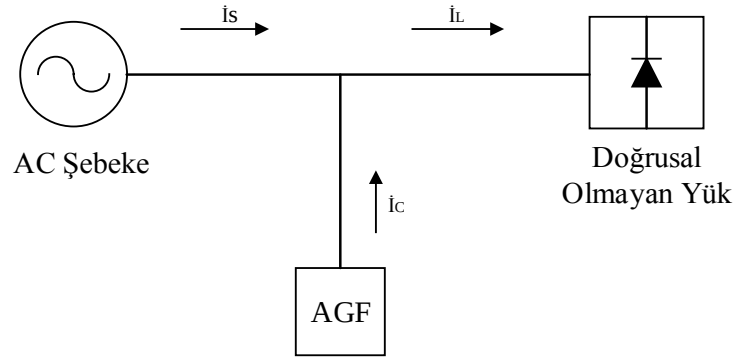
2.2. Harmonik Azaltma Yöntemleri

Günümüzde, dağıtım sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artışa bağlı olarak, akım ve gerilim dalga biçiminde büyük miktarlarda bozulmalar meydana gelmiştir. Bu harmoniklerin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması için literatürde kullanılan birkaç yöntem vardır. Bu yöntemler; aktif güç filtreleri, pasif güç filtreleri, hibrit güç filtreleri, anahtarlama teknikleridir. (Sher ve Eltamaly, 2011).

2.2.1. Aktif Güç Filtreleri

Aktif filtre genel bir terimdir. Bir grup güç elektroniği devrelerine bağlı güç anahtarlama aygıtları ve pasif enerji depolayan endüktörler ve kapasitörlerden oluşur. Bu devrelerin işlevleri çok değişik uygulamalara göre değişebilir. Aktif Güç Filtreleri (AGF) genellikle düşük ve orta gerilim güç kaynaklarındaki akım harmoniklerini kontrol etmek ya da yüksek gerilim dağıtım seviyelerinde reaktif güç ve gerilim kontrolü için kullanılırlar (Gali vd., 2017). AGF kavramı H.Sasaki ve T.Machida tarafından önerilmiştir. 1982'de dünyada ilk kez 800 kVA'lık GTO tristör kullanan PWM invertörlü akım kaynağından oluşan AGF, harmonik kompanzasyon yapmak için kullanılmıştır. Bunu izleyen yıllarda kontrol stratejilerindeki gelişmeler AGF tekniklerinde de hızlı ilerlemelere neden olmuştur.

Şekil 2.1' de AGF'nin temel prensip şeması gösterilmiştir. Kaynak akımını sinüzoidal yapmak için kompanze akım i_c , kaynak akım i_s 'ye enjekte edilerek yük akımı i_L 'deki harmonik giderilir (Chen ve Xie, 2004).

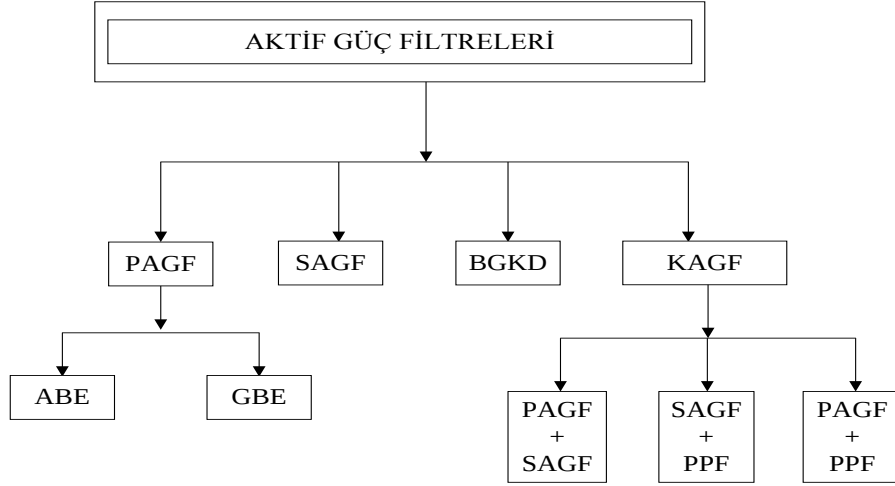


Şekil 2.1. AGF'nin temel prensip şeması

AGF yapıları; içeriğindeki eviriciyle, DA bağıdaki kondansatör veya reaktör üzerinde oluşturulan gerilim veya akımı güç elektroniği anahtarları ile anahtarlama yapan ve bunun sonucunda oluşturduğu farklı dalga yapılarındaki gerilim veya akımı şebekeye ileten güç elektroniği tabanlı aygıtlardır (Uçar, 2012). AGF'lerin yatırım maliyetinin pasif filtrelerle göre fazla olmasına rağmen, değişen yük şartlarına cevap verebilmesi, filtreleme performansının daha iyi olması, fiziksel boyut olarak daha küçük olması, uygulamalarda daha esnek olması, sisteme bağlantı kolaylığı ve güç kalitesi problemlerine çeşitli açılardan çözüm getirebilmesi gibi önemli özellikleri bu yapıları ön plana çıkarmaktadır (Akagi, 2005).

Günümüzde imal edilen güç transistörlerinin çok yüksek frekanslarda tetiklenebilmesi, aktif güç filtresinin yüksek frekanslı akım ve gerilim harmoniklerini de bastırabilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine, üç fazlı sistemlerde dengesizliğin giderilmesine ve nötr hattı akımlarının azaltılmasına imkan sağlar. Bu nedenle aktif güç filtreleri, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemidir (Magoarou ve Monteil, 1994).

Ayrıca paralel AGF, güç katındaki evirici yapısına göre gerilim beslemeli evirici (GBE) ve akım beslemeli evirici (ABE) tabanlı olarak alt gruplara ayrılabilir. Şekil 2.2'de AGF'lerin sınıflandırılması, blok şema halinde gösterilmiştir. AGF'ler güç devresi yapılarına göre seri, paralel, karma ve birleşik güç kalite düzenleyici olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.2. AGF’lerin güç devresi yapılarına göre sınıflandırılması

Özel uygulamalar için AGF seçimi, uygulama mühendislerinin ve kullanıcıların en önemli görevlerinden biridir. Çünkü uygulama gereksinimleri tek faz ya da üç faz, üç telli veya dört telli sistemler, akım veya gerilim temelli kompanzasyon gibi çok çeşitli ve geniş bir alana yayılırlar. Bununla birlikte birçok sayıda aktif filtre konfigürasyonu bireysel kullanıcıların ihtiyaçlarına cevap verebilir. Tablo 2.1’de, AGF seçimi için özet bir bilgi sunulmaktadır. Burada * sayısına bağlı olarak ilgili konfigürasyon daha çok tercih edilme durumunu gösterir (Singh ve Al-Haddad, 1999).

Tablo 2.1. Özel uygulamalar için aktif güç filtresi seçimi

Belirli Uygulamalar İçin Kompanzasyon	SAGF	PAGF	KAGF
1. Akım Harmonikleri		**	***
2. Reaktif Güç		***	**
3. Yük Dengeleme		*	
4. Nötr Akım		**	*
5. Gerilim Harmonikleri	***		**
6. Gerilim Düzenleme	***	*	**
7. Gerilim Dengeleme	***		**
8. Gerilim Titremesi	**	***	
9. Gerilim Çökmesi	***	*	**

Akım temelli filtreleme; akım harmoniklerini giderme, reaktif güç kompanzasyonu, yük dengeleme ve nötr akım kompanzasyonu olarak sınıflandırılabilir. Akım temelli filtreleme bireysel kullanıcılar tarafından tek yada karma şeklinde kullanılabilir. Akım

harmoniklerinin kompanzasyonu için PAGF ideal bir çözümdür. Ancak karma seri aktif ile paralel pasif filtre en uygun olduğu maliyetlerinin düşük olması nedeni ile düşünülmektedir. PAGF, hem AC kapasitör kullanan sabit yükler hem de ayarlanabilir yükler için reaktif güç kompanzasyonunu ve nötr akım kompanzasyonunu yerine getirebilir. Gerilim temelli filtreleme, gerilim harmoniklerini giderme, gerilim düzenleme, gerilim dengeleme, gerilim titremesini azaltma ve gerilim çökmesini giderme olarak sınıflandırılabilir. Gerilim temelli filtreleme genel olarak seri aktif filtreler kullanılarak yapılır. Ancak gerilim titremesi paralel aktif filtre kullanılarak giderilir (Steela ve Rajpurohit, 2014).

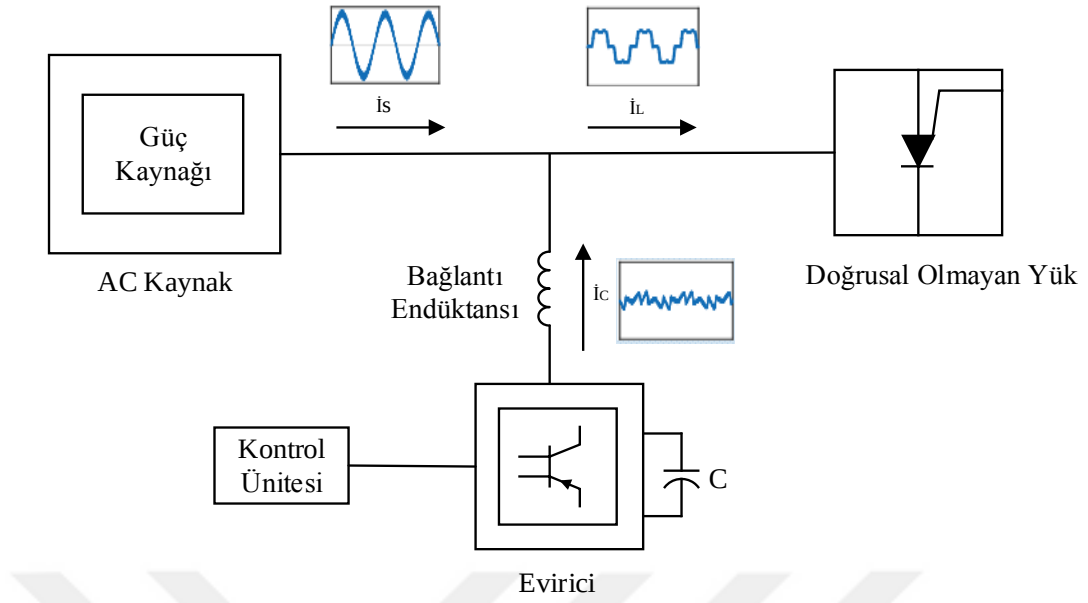
2.2.1.1. Paralel Aktif Güç Filtreleri

Paralel Aktif Güç Filtreleri (PAGF) yüke paralel bağlanarak yük akımının harmoniklerini yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için harmonik akıma ters fazda ve eşit büyüklükte akımları şebekeye enjekte eder. Böylece kaynaktan çekilen akımların dalga şekli sinüzoidal yapılır (Açıkgöz vd., 2017).

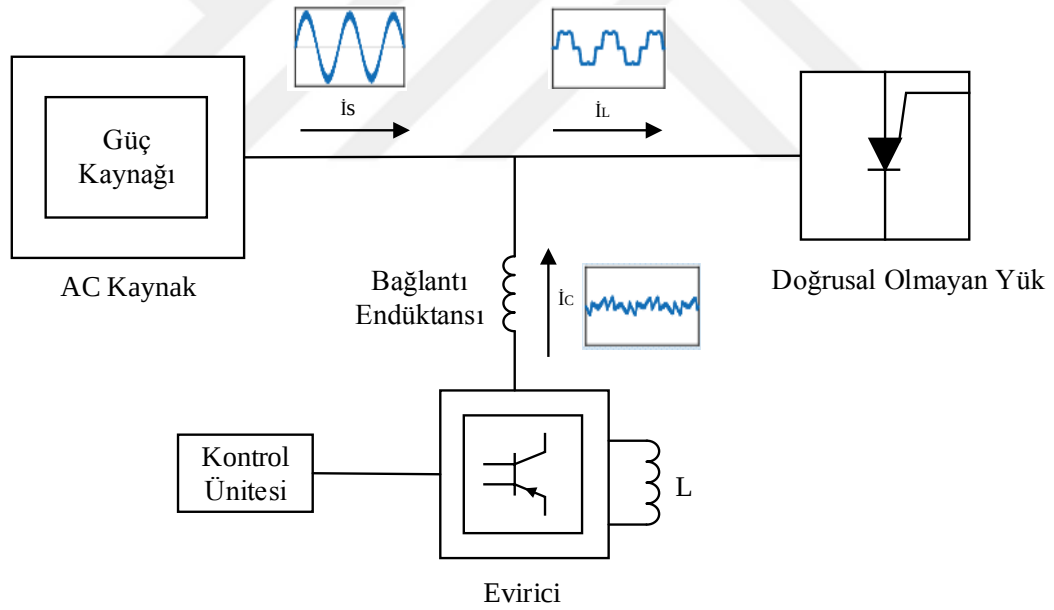
Bir PAGF; evirici, DA link kondansatörü, eviriciyi şebekeye bağlayan bir bağlantı endüktansı ve evirici anahtarları ile referans akımı üreten bir kontrol ünitesinden oluşur. Evirici, kompanzasyon akımını üretir. Sürücünün AC tarafında kullanılan bağlantı endüktansının görevi, evirici tarafından üretilen anahtarlama parazitlerini önler. Kontrol ünitesi ise, evirici için anahtarlama sinyalleri üretir.

PAGF evirici yapısına göre iki kısma ayrılır. Bunlar gerilim kaynaklı PAGF ve akım kaynaklı PAGF'dir. Gerilim kaynaklı paralel aktif güç filtrelerinde enerji depolama elemanı olarak kondansatör, akım kaynaklı paralel aktif güç filtrelerinde ise bobin kullanılır. Şekil 2.3'te gerilim kaynaklı bir PAGF'nin genel devre yapısı gösterilmiştir.

Şekil 2.4'te ise akım kaynaklı PAGF gösterilmiştir. Gerilim beslemeli eviricili paralel aktif güç filtresinin verimi akım beslemeli eviricili paralel aktif güç filtresine göre daha yüksek, kuruluş maliyeti daha düşük ve denetim kolaylığı gibi üstünlüklerinden dolayı aktif güç filtresi uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir (Bozabalı,2009). Buna karşılık akım kaynaklı paralel aktif güç filtreleri de doğrudan doğruya akımı anahtarladıkları için tepki sürelerinin hızlılığı ve endüktansın akımını sınırlayıp kısa devre koruması sağlama gibi özellikleriyle, AGF yapılarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Gerilim kaynaklı PAGF'nin genel şeması



Şekil 2.4. Akım kaynaklı PAGF'nin genel şeması

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 kapasitans içerirler. Bunun yanında DA bağında endüktans içeren akım kaynaklı

eviriciler de doğrudan doğruya akımı anahtarladıkları için PAGF güç devrelerinde kullanılmaktadırlar.

PAGF'nin kararlı hal performansını belirleyen en önemli şartlardan biri, DA bağ kondansatör uçlarındaki gerilimin, şebeke geriliminin maksimum değerinden büyük olduğu bir referans gerilimde sabit tutulmasıdır. Bu nedenle DA bağ kondansatör geriliminin değeri PAGF için son derece önemlidir. Çünkü bu gerilim evirici vasıtasıyla işlenerek kompanzasyon akımı üretilir (Vahedi vd., 2018).

PAGF yapısında kontrol ünitesi; evirici çıkışında, sisteme enjekte edilecek olan kompanzasyon akımını üretebilmek için referans işaretleri elde eden denetim sistemi ve evirici anahtarlarına tetikleme sinyallerini üreten akım modülasyonu sisteminden oluşmaktadır.

PAGF, pasif güç filtrelerinin aksine, farklı türdeki doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen akım harmoniklerini dengelemenin yanı sıra yük değişikliklerine hızlı yanıt vermeleri, fiziksel boyut olarak daha küçük olmaları, uygulamalarda daha esnek olmaları gibi özelliklerinden dolayı öne çıkmıştır. Günümüzde imal edilen güç transistörlerinin çok yüksek frekanslarda tetiklenebilmesi, PAGF'nin yüksek frekanslı akım harmoniklerini de bastırabilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine olanak sağlar. Bu nedenle aktif güç filtreleri, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemlerdendir (Guzman vd., 2016).

Bir PAGF'nin, uygun harmonik akım referanslarını çıkarması ve bu referans akımı takip ederek ters fazda ve eşit genlikte bir kompanzasyon akımı için evirici anahtarlama sinyallerini üretmesi en önemli iki görevidir. Harmonik referans akım, harmonik bileşenlerin her birini doğrudan belirleyerek veya temel bileşeni yük akımından çıkarmak suretiyle dolaylı olarak bulunabilir. Verimli filtre performansı elde etmek için dolaylı yöntem, daha basit ve hızlı bir uygulama sergiler (Panigrahi ve Subudhi, 2017).

2.2.1.2. Seri Aktif Güç Filtreleri

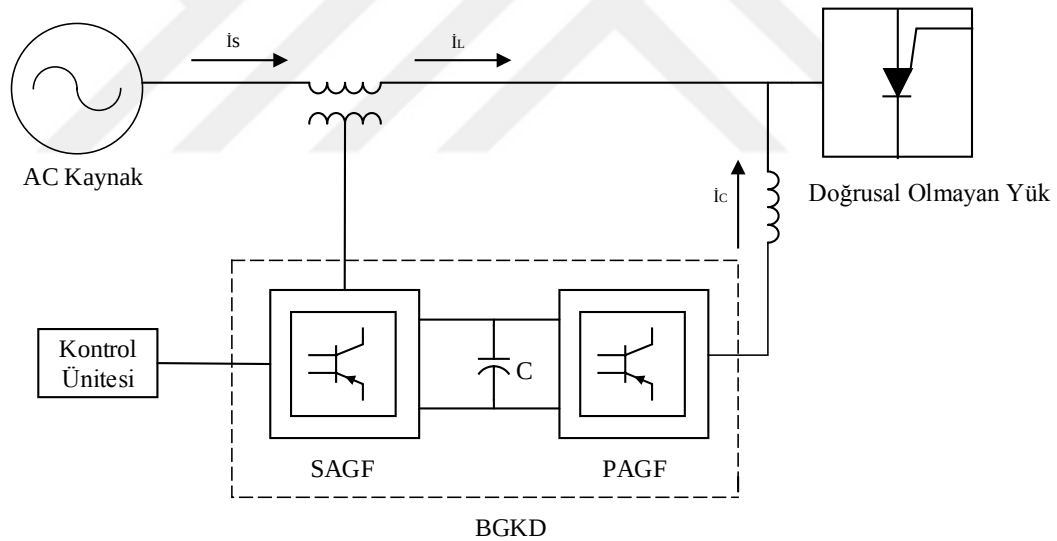
Şekil 2.5'te görüldüğü gibi SAGF, kaynak ile yük arasına bir trafo üzerinden seri olarak bağlanır. SAGF'ler düşük ve orta gerilim seviyelerindeki gerilim ve akım harmoniklerini filtrelemek için şebekeye harmonikli gerilimler enjekte ederler ve güç sistemlerinde gerilim regülasyonu, gerilim dengeleme, gerilim kırışmasının azaltılması ve gerilim tepe/çukurlarının yok edilmesi amaçları için kullanılırlar (Hashim vd., 2016).

karşı yüksek empedans gösterir. Dolayısıyla kaynak ile yük arasında harmonik izolasyon oluşturur (Akçay, 2010).

SAGF'lerinin verimlerinin yüksek oluşu, güç katsayısının 1'e çok yakın bir değerde tutulabilmesi, doğrusal olmayan yüklerde kullanılabilmeleri ve akımı tam bir sinüs dalgasına benzetebilmesi, kullanımda tercih nedeni olmaktadır (Özdemir ve Kuşdoğan, 2005).

2.2.1.3. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicileri

Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD) ilk olarak Birleşik Güç Akış Denetleyicisi adıyla Gyugyi tarafından 1992'de ortaya atılmıştır (Gyugyi,1992). BGKD Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, SAGF ile PAGF'nin birlikte kullanılması ile oluşturulmuş filtre sistemidir. PAGF ile akım harmonikleri, dengesizlikleri ve nötr akımı kompensasyonu yapılmakta, SAGF ile gerilim harmonikleri, dengesizlikleri ve gerilim çökme-yükselme gibi güç kalitesi problemleri düzeltilmektedir.



Şekil 2.6. BGKD'nin genel şeması

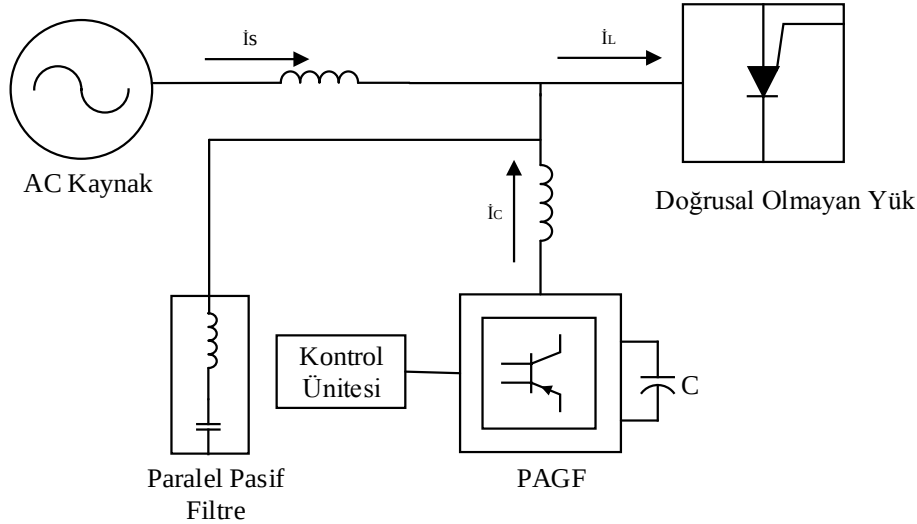
BGKD sistemi, kontrol ünitesi ve güç devresi olarak iki bölüme ayrılabilir. Kontrol ünitesi, harmonik bozulma tespiti, referans sinyal üretimi, evirici kapı sinyal üretimi ve gerilim/akım ölçümlerini içerir. Güç devresi iki adet gerilim kaynaklı eviriciden, sistem koruma düzeneğinden, harmonik filtrelerden ve enjeksiyon transformatörlerinden oluşur. Kontrol ünitesi BGKD sisteminin en önemli parçasıdır. Harmonik bozulmanın yüksek doğrulukla hızlı tespiti, referans sinyalinin hızlı bir şekilde bulunması ve kontrolörün yüksek dinamik yanıtı, istenen kompanzasyon için en önemli gerekliliklerdir. Bu cihazlar

son yıllarda hem alçak gerilim hem de orta gerilim uygulamalarında çok popüler hale gelmiştir (Teke, 2011).

2.2.1.4. Karma Güç Filtreleri

Geleneksel olarak güç kalitesi iyileştirmesi pasif filtrelerin çeşitleri ile yapılmıştır. Geçmişte, pasif güç filtreleri genellikle şebekenin ciddi harmonik problemlerini çözmek için kullanılmıştır. Ekonomik ve basit yapısı nedeniyle pasif filtreler tercih edilmesine rağmen pasif filtrelerin kullanımı rezonans, sabit kompanzasyon ve diğer güç sorunlarına neden olmasından dolayı yeni arayışlara sebebiyet vermiştir. Karma Güç Filtreleri (KGF) Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, aktif güç filtreleri ve paralel pasif filtrelerin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan filtre yapılarıdır. Pasif filtrenin eksikliklerini gidermek için geliştirilen aktif güç filtresi, gerilim veya akım kaynağı invertörü, DA link kondansatörü ve çıkış filtresinden oluşur.

Aktif filtre pasif filtre ile karşılaştırıldığında, aktif filtre karmaşık bir yapıya ve daha maliyetli olmasına rağmen, bugün harmonik kompanzasyon, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim dengesizliği, gerilim titremesi gibi çeşitli güç kalitesi problemlerini çözebilir (Demirdelen vd., 2013).

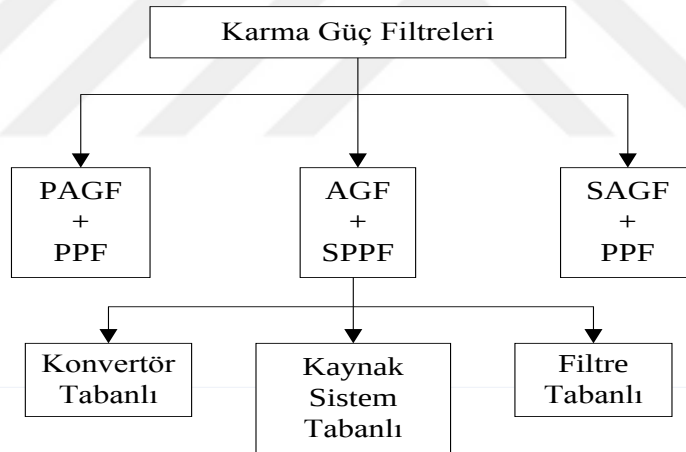


Şekil 2.7. KGF'nin genel şeması

AGF etkin bir kompanzasyon sistemi olmasına rağmen, maliyeti artan güç kapasitesinin oranıyla ciddi şekilde artmaktadır. Bu duruma bir çözüm olarak, aktif ve pasif filtreler birlikte kullanılarak hibrit aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. KGF'nin

geliştirilmesindeki temel amaç, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu baskın harmonikleri filtreleyen ve reaktif güç gereksinimi sağlayan pasif filtre kullanarak aktif güç filtresinin maliyetini ve derecesini azaltmaktır. Bu nedenle, bu sorunları ortadan kaldırmak için PF ve AGF de dahil olmak üzere bazı hibrit kombinasyonlar kullanılmaktadır. Bu filtreler, daha iyi kalite performansı sağlayarak pasif ve APF'nin yaşadığı problemlerin üstesinden gelir. Anahtarlama gürültüsünün yanı sıra elektromanyetik sorunları da azaltır.

KGF uygulamaları genelde, 5'inci harmonik ve 7'inci harmonik frekanslara sahip bir pasif filtre ya da 11'inci harmonik frekanslı yüksek geçirgen filtre ile birlikte bir AGF'nin (paralel ya da seri) beraber konfigürasyonlarına dayanmaktadır. 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 (Das vd., 2017). Şekil 2.8'de gösterildiği gibi KGF'lerin çeşitli alt kategorileri vardır.



Şekil 2.8. KGF'nin sınıflandırılması

PAGF+PPF karma filtre grubunda paralel konfigürasyonda pasif ve aktif güç filtresi ile birleştirilmiştir. Pasif filtre kullanmanın amacı hem düşük frekansta hem de reaktif güç kompanzasyonunda doğrusal olmayan yüklerin baskın harmoniklerini filtre etmektir. Ayrıca, paralel aktif güç filtresi sadece pasif filtrenin filtreleyemediği harmonikleri telafi etmekle kalmaz aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonunu da destekler (Demirdelen, 2013).

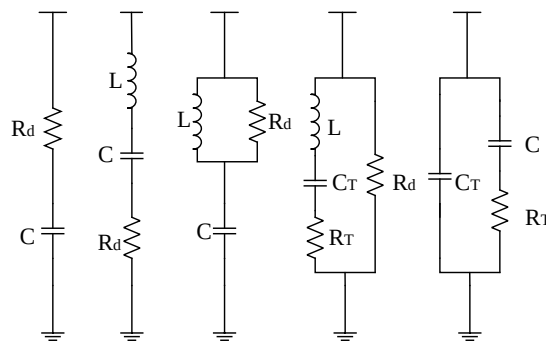
SAGF+Paralel PF karma filtresinde ise SAGF harmonik izolasyon sağlayarak yüksek bir empedans gösterir. Böylece harmonik akımın PF üzerinden akmasını sağlar. Bu tip

filtre, güç dağıtım sisteminin orta gerilim seviyesinde reaktif güç, harmonikler ve dengesiz yükleri dengelemek için tasarlanmıştır (Salmerón ve Litrán, 2010).

AGF+Seri Paralel PF karma filtresinde, AGF parçası sadece harmonik kompanzasyon gerektiren DA link gerilimini tutmaya yarar. Pasif filtre parçası, şebekedeki temel bileşenin geriliminde tutulur. AGF'nin anma gerilimi, paralel aktif güç filtresine kıyasla 1/10 oranında azaltılabilir. Bu nedenle, sadece AGF eviricisi ve DA link kapasitesi değil, aynı zamanda maliyet de önemli ölçüde azalır. Ayrıca eviricinin anahtarlama kaybı, AGF'nin anma geriliminin düşürülmesiyle azalabilir (Demirdelen, 2013).

2.2.2. Pasif Filtreler

Pasif filtreler (PF); kondansatör (C), filtrelenecek harmonik frekansına göre ayarlanmış bir endüktans (L) ve bazen omik bir dirençten (R) oluşmaktadırlar. Bu durum, filtre yapılandırmasını basit ve uygulanması kolay hale getirir. Şekil 2.9' da çeşitli PF devreleri gösterilmiştir. Kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen bu filtrelerin görevi, bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilim harmoniklerinin etkisini azaltmak veya yok etmektir. Bu amaçla pasif güç filtreleri, en etkin harmonik bileşenin etkisini tamamen ortadan kaldırmak veya azaltmak üzere, sisteme özel olarak tasarlanır ve istenmeyen harmonik bileşenler, düşük ayarlı bir empedans üzerinden toprağa aktarılır. Yapılarının basit, yatırım maliyetlerinin düşük olması ve kullanım kolaylıklarından dolayı pasif filtreler uygulamada sıkça kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. Çeşitli pasif filtre devreleri

PF'nin üç ana fonksiyonu vardır. Birincisi, anahtarlama kaynağı tarafından üretilen elektromanyetik parazitlerin güç hattına ulaşmasını ve diğer ekipmanı etkilemesini önlemektir. İkincisi, güç hattındaki yüksek frekanslı gerilimin güç kaynağının çıkışından

geçmesini önlemektir. Üçüncüsü, güç faktörünü geliştirmek ve harmoniği ortadan kaldırmaktır (Maheswaran vd., 2014).

Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşeni için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gereklidir (Bozabalı, 2009).

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.

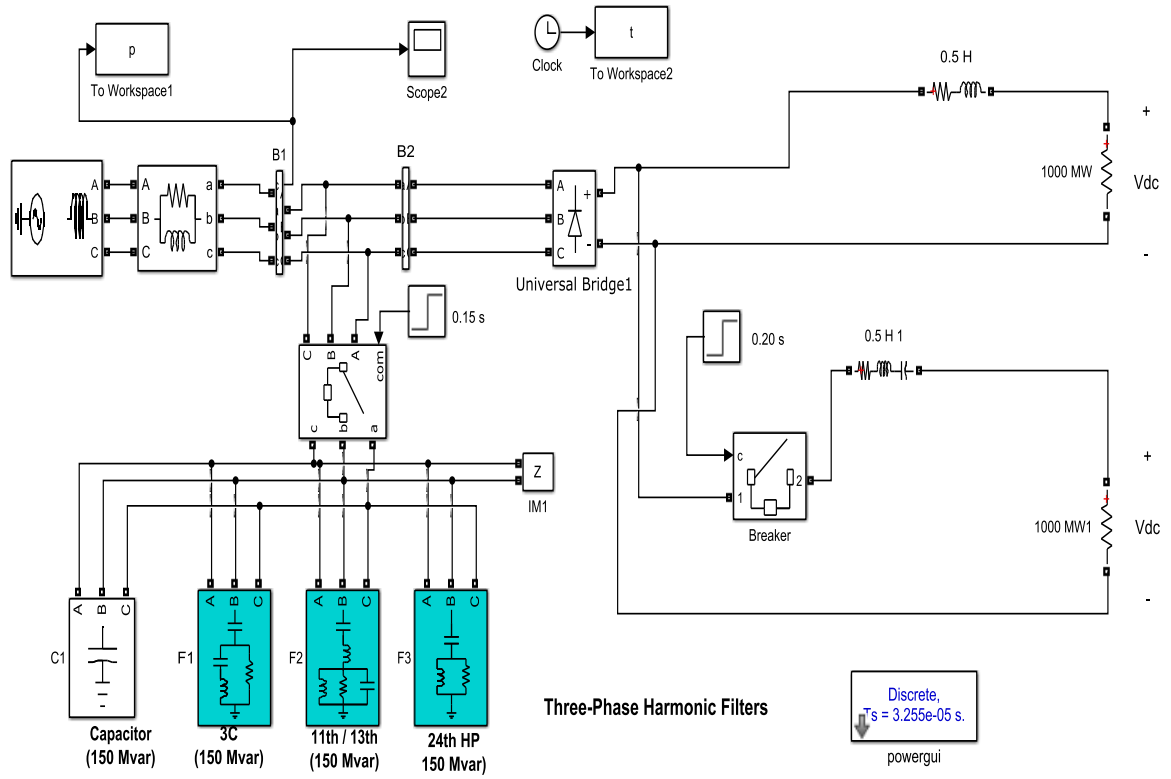
Birçok uygulama, gerilim ve akım temelli problemlerin giderilmesi için karma kompanzasyon gerektirmektedir. Tablo 2.2, uygun olan filtreyi seçmek için kısa bilgiler vermektedir. Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli değişimlerdeki davranışı Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması (Yılmaz, 2006)

Durum	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Filtrenin ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlıdır	Birden fazla frekansa ayarlanabilir
Harmonik değerlerinde değişme	Yeni filtre gerektirir	Yeni filtre gerektirmez
Empedansın etkisi	Rezonans meydana gelebilir	Etkilenmez
Temel frekans değişmesi	Etkinliği azalır	Etkilenmez
Akım yükselmesi	Problem çıkabilir	Aşırı yüklenme yaşanmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün
Maliyet	Düşük	Yüksek

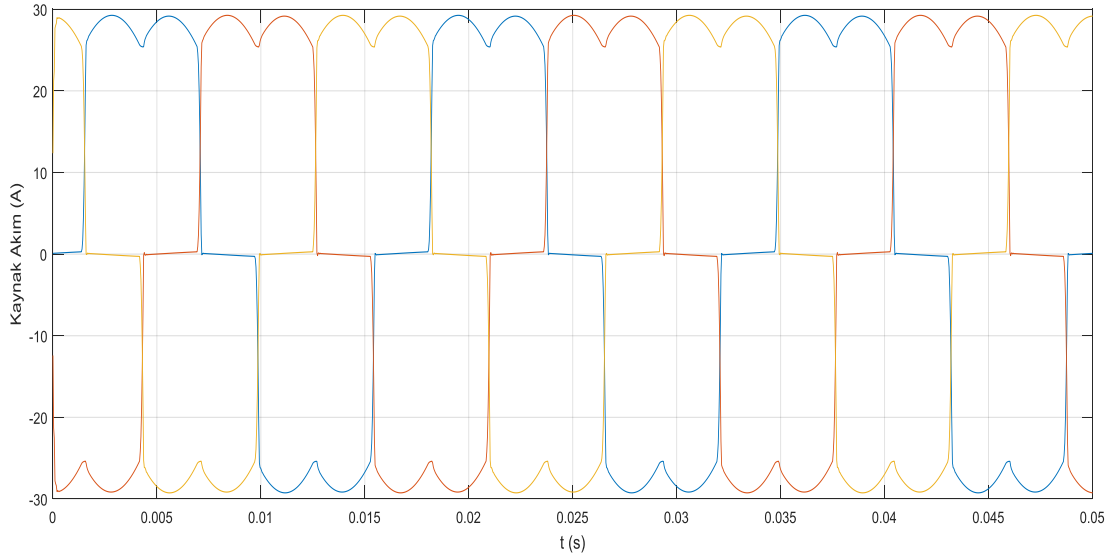
Şekil 2.10, Pasif filtrelerin yük değişimlerinden nasıl etkilendiğini incelemek üzere yapılan Matlab/Simulink benzetim modelini göstermektedir.

Bu benzetim modelinde birinci yük hemen devreye girerken ikinci yük 0,02’inci s’de devreye girmektedir. Böylece birinci yüke göre hazırlanmış pasif filtrenin ikinci yük devreye girdiği durumdaki davranışları incelenmiştir.



Şekil 2.10. Pasif filtre Matlab/Simulink benzetim modeli

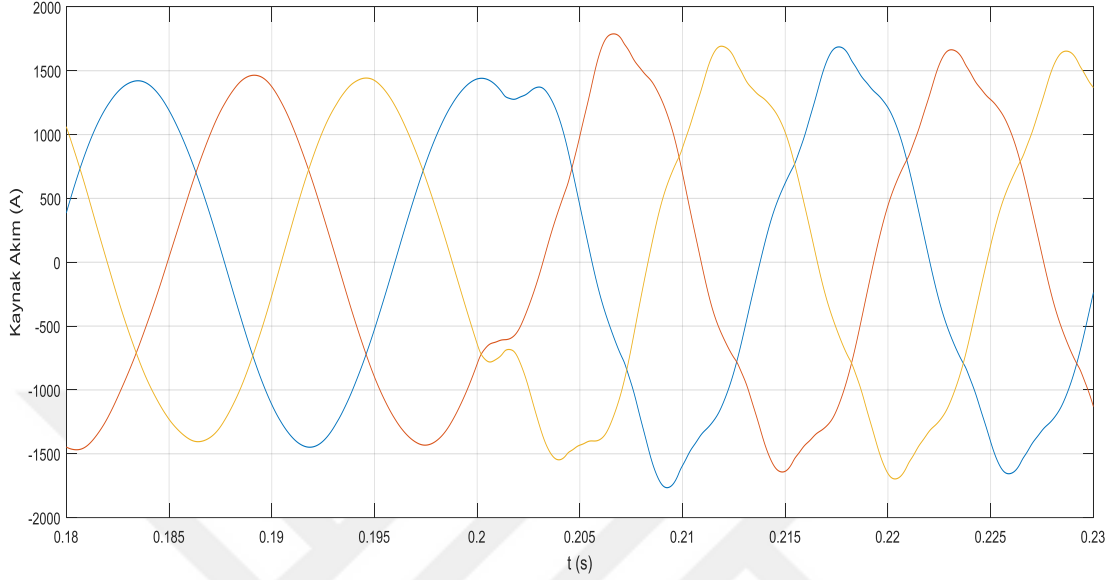
İlk önce harmonikli akım üretmesi için diyot doğrultucunun çıkışına 100 ohm ve 100 mH'lık yük bağlanmıştır. Üretilen harmonikli akım Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Harmonikli kaynak akımının değişimi (PF devrede değil)

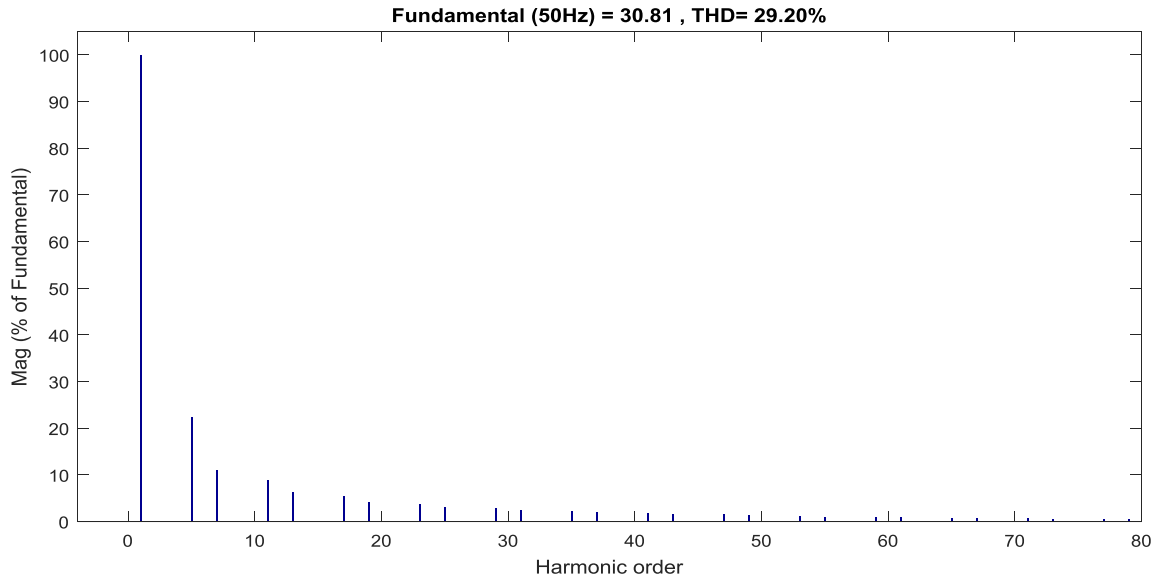
0,15'inci saniyede Pasif Filtre ve 0,2'inci saniyede ikinci yük (1000 ohm, 100 mH, 100 μ F) devreye alınmakta ve böylece akım Şekil 2.12'de gösterilen şekle dönüşmektedir.

Şekil 2.12’de ilk yük devreye girdiğinde pasif filtre harmonikli akımı filtre ederken 0,2’inci saniyede ikinci yük devreye girdiğinde filtrenin harmonikleri tam olarak gideremediği görülmektedir.

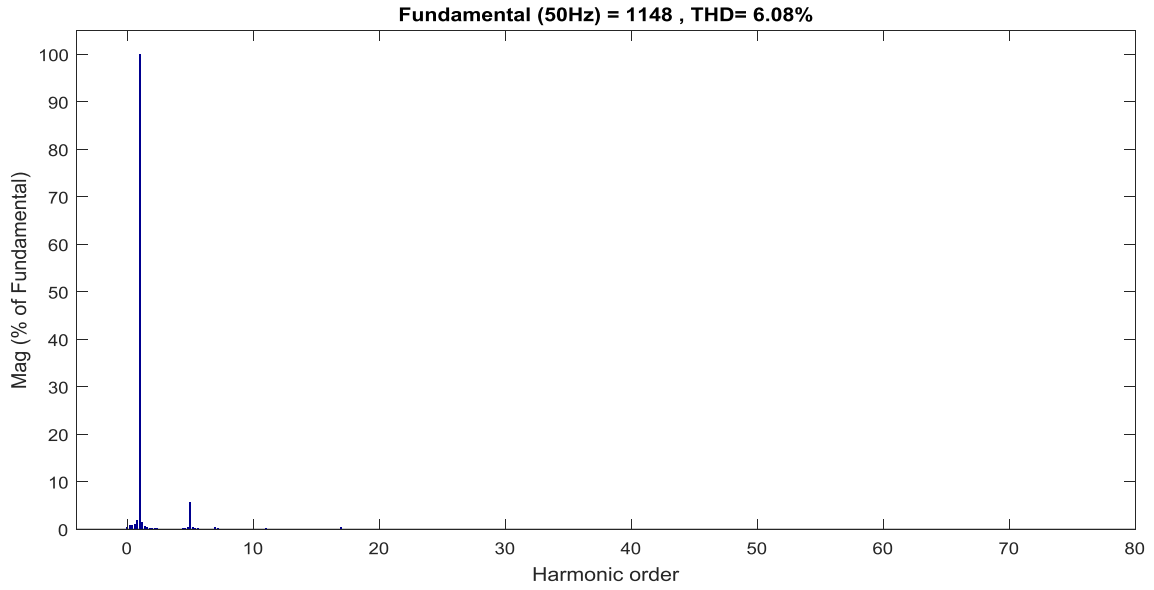


Şekil 2.12. Kaynak akımının değişimi (PF devrede)

Şekil 2.13’e göre, PF devrede değilken kaynak akımının THD’si %29,20’dir. PF devreye girdiğinde ise, THD’nin %29,20 seviyelerinden %6,08 seviyesine düştüğü Şekil 2.14’den görülmektedir.



Şekil 2.13. Kaynak akımının FFT analizi (PF devrede değil)



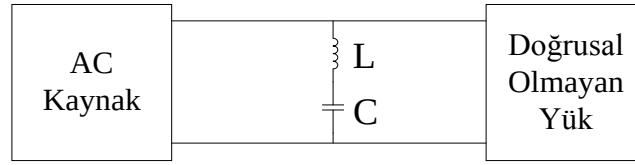
Şekil 2.14. Kaynak akımının FFT analizi (PF devrede)

Benzetim modeli şekillerinden de görüleceği üzere Pasif filtreler yük değişimlerinden olumsuz etkilenmektedirler. Pasif filtreler sisteme özel seçilirler ve yükün değişmesi durumunda yeni yatırım maliyetleri gerektirmektedirler. Yüksek güçlerde yapılacak güç faktörü iyileştirme işlemlerinde PF yapılarında kullanılan endüktans ve kondansatör elemanlarının da boyutları büyümekte ve sonuç olarak boyut problemi oluşturmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak son yıllarda güç elektroniği elemanları ve mikro işlemcilerdeki gelişmelere paralel olarak pasif filtrelerin sakıncalarını gidermek için Aktif Güç Filtreleri (AGF) yapıları kullanılmaya başlanmıştır (Uçar, 2012).

Pasif filtreler devreye bağlanış şekillerine göre paralel filtreler ve seri filtreler olmak üzere iki başlık altında incelenebilirler. Paralel filtreler devreye paralel bağlanan bir rezonans devresidir ve ayarlandığı frekansta düşük empedans gösterirler. Seri filtreler ise devreye seri bağlanırlar ve ayarlandığı frekansta yüksek empedans göstererek harmoniklerin sisteme girmesine engel olurlar.

2.2.2.1. Paralel Pasif Filtreler

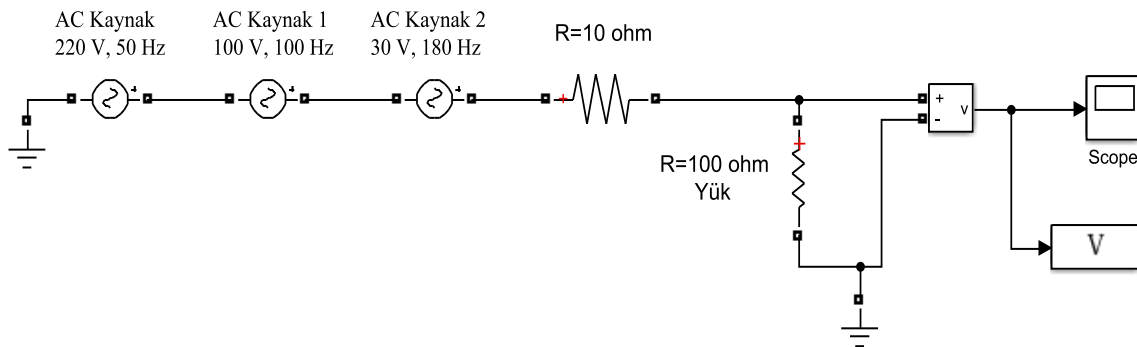
Paralel pasif filtreler (PPF) pasif devre elemanlarından oluşan filtrelerdir. Özellikle 3, 5 ve 7 inci sıralı harmoniklerin filtrelenmesi için iyi sonuçlar sunmaktadır. Bazı araştırmacılar bunları tek ayarlı filtreler, ikinci derece sönümlü filtreler ve C tipi sönümlü filtreler olarak adlandırmışlardır (Chou vd., 2000). Şekil 2.15'te temel bir paralel pasif filtre gösterilmiştir.



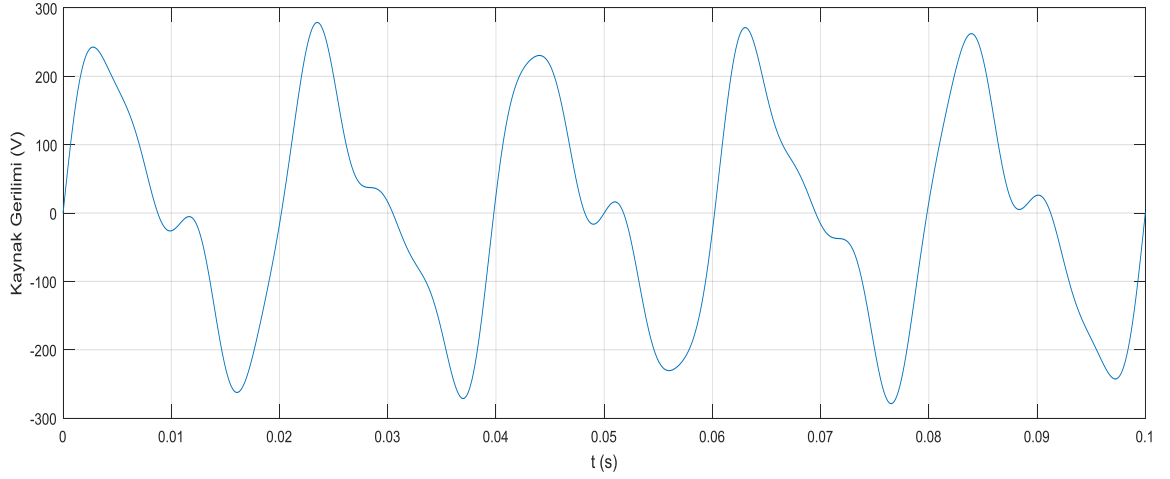
Şekil 2.15. Paralel pasif filtre

Bu filtrelerde harmonik derecesinin arttırılması, filtrenin çalışma verimini arttırır, ancak tasarımı zorlaştırır. Ayarlandıkları frekanslara düşük empedans sağlarlar. Paralel bağlı oldukları için sadece harmonik akım taşımak üzere tasarlanmışlardır. Bu tip filtrelerde amaç, düşük bir paralel empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımlarının filtre üzerinden geçerek toprağa akması sağlanır. Paralel bağlanmasının doğası gereği, onları besleme tarafına göre bir yük haline getirir ve bir dizi elektrikli sürücü besliyorlarsa % 30-50 yük akımını taşıyabilirler (Hoadley, 2008). Ekonomik olarak bakıldığında, paralel filtrelerin, sadece harmonik akımlara göre tasarlandıklarından dolayı seri filtrelere göre daha ekonomiktirler. Bu nedenle, daha küçük boyutlu L ve C'ye ihtiyaç duyarlar, böylece maliyeti düşürürler. (Sher ve Eltamaly, 2011).

Şekil 2.16'daki benzetim modelinde 100 Ω 'luk bir yük direnci 220 V-50 Hz, 100 V-100 Hz ve 30V- 180 Hz'lik üç gerilim kaynağının toplamından oluşan bozulmuş bir gerilim ile beslenmektedir. Üç dalga birleşiminden oluşan bozulmuş gerilim dalga şekli, Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Yük üzerindeki gerilimin 220V genliğinde ve 50 Hz frekansa sahip olması istenmektedir. Bu yüzden 100V'luk ve 30 V'luk harmonik gerilim bileşenlerinin PPF ile elenmesi gerekmektedir. PPF istenilmeyen harmonik frekanslarında rezonansa girerek bu harmonik bileşenleri ortadan kaldırmaktadır (Akmaz, 2012).

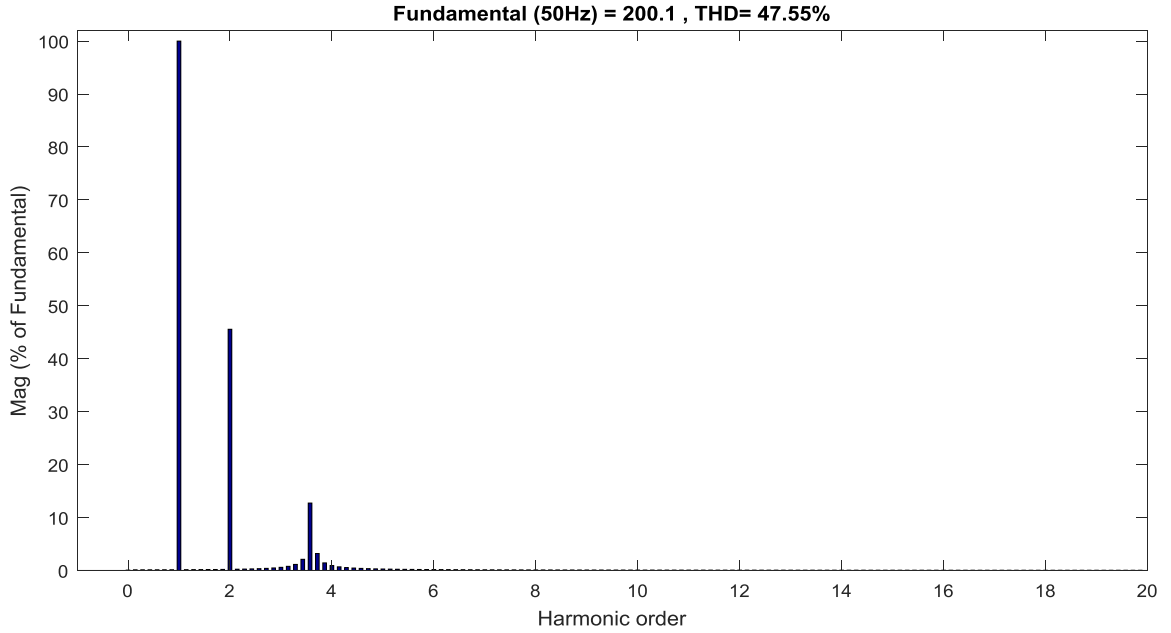


Şekil 2.16. 100 Ω 'luk yük ve şebeke gerilimleri benzetim modeli (PPF devrede değil)



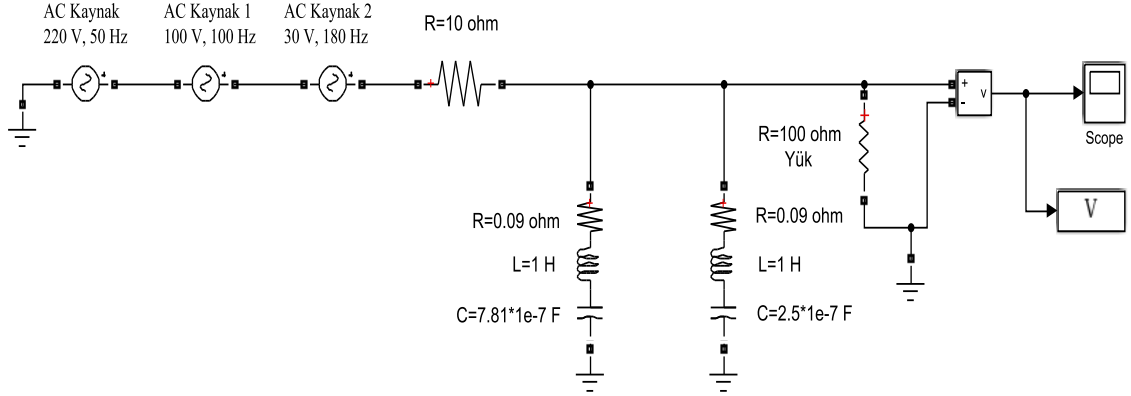
Şekil 2.17. Yük üzerindeki bozulmuş gerilimin değişimi (PPF devrede değil)

Şekil 2.18’de harmonikli kaynak gerilimine ait THB gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi THB %47,55’dir. Bu değer standartlarda önerilen değerin çok üstünde yüksek bir değerdir.

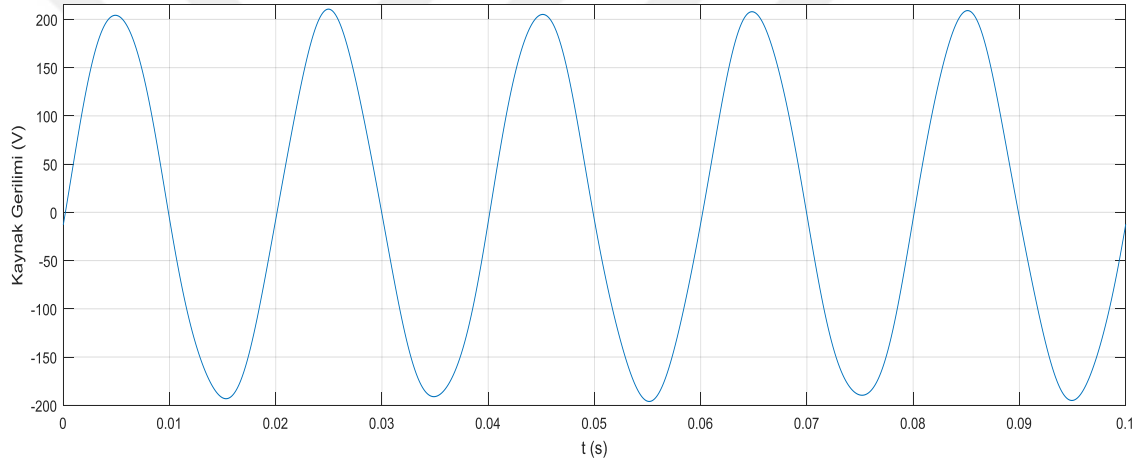


Şekil 2.18. Harmonikli gerilime ait THB (PPF devrede değil)

Şekil 2.19’da yüke uygulanan harmonikli gerilimi yok etmek için şebeke gerilimine paralel bağlanmış R-L-C filtreler gösterilmiştir. R-L-C değerleri Şekil 2.19’ daki gibi ($R=0,09$ ohm, $L=1$ H, $C=7,81 \cdot 10^{-7}$ F ve $C=2,5 \cdot 10^{-7}$) seçilip uygulanırsa, yük üzerindeki gerilim, Şekil 2.20’ de gösterildiği gibi yük üzerindeki dalga şekli 220 V ve 50 Hz’lik sinüs dalgasına çok yaklaştığı görülecektir.

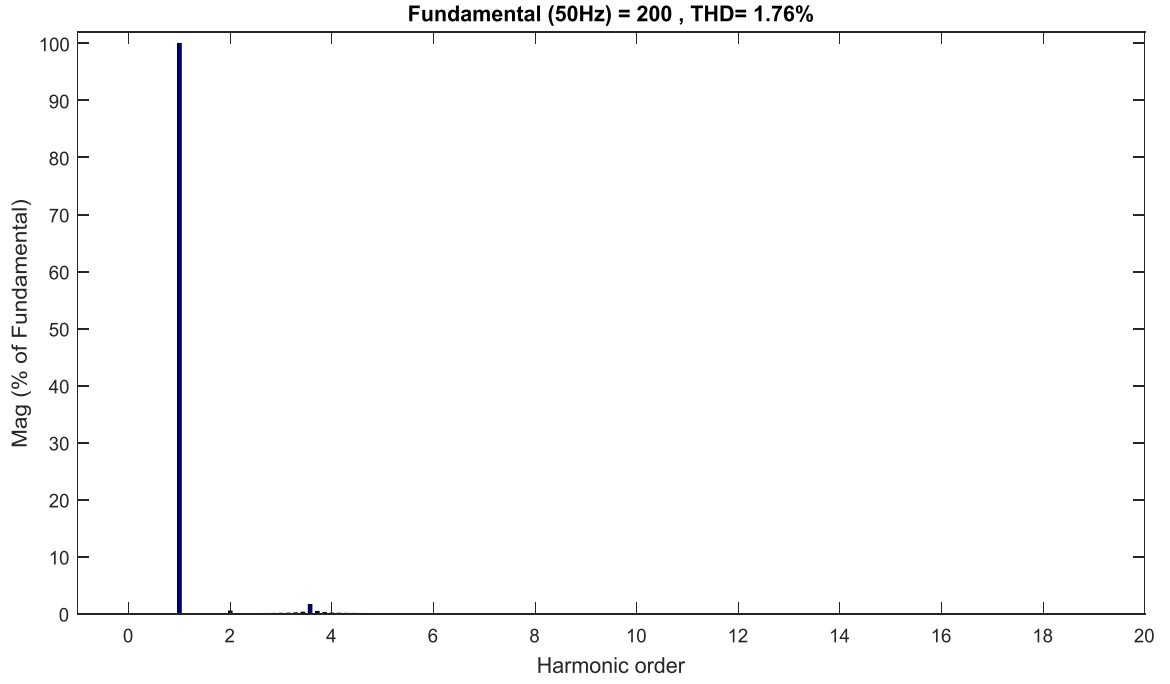


Şekil 2.19. PPF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli



Şekil 2.20. Yük üzerindeki gerilimin değişimi (PPF devrede)

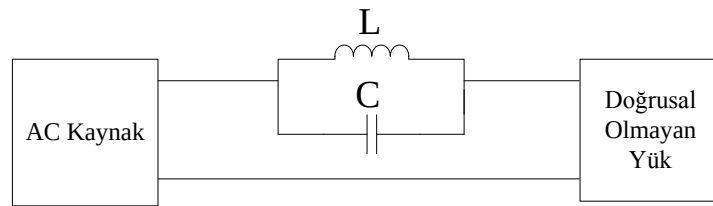
Şekil 2.21'de gösterildiği gibi Paralel PF'nin devreye girmesiyle kaynak gerilimin THB %47,55'ten %1,76'ya düşmektedir. Böylece IEE-519-1992 standartlarında gerilim için önerilen $THB < 3\%$ değerini sağlamaktadır.



Şekil 2.21. Kaynak gerilimine ait THB (PPF devrede)

2.2.2.2. Seri Pasif Filtreler

Seri pasif filtreler (SPF) , paralel bir indüktör ve kapasitörden oluşur ve geniş bir empedans sunar. Bu filtre tamamen endüktif tip veya LC ayarlı özelliklere sahiptir. SPF'ler temel olarak Şekil 2.22'de gösterildiği gibi kaynak ile yük arasında seri olarak bağlanırlar.

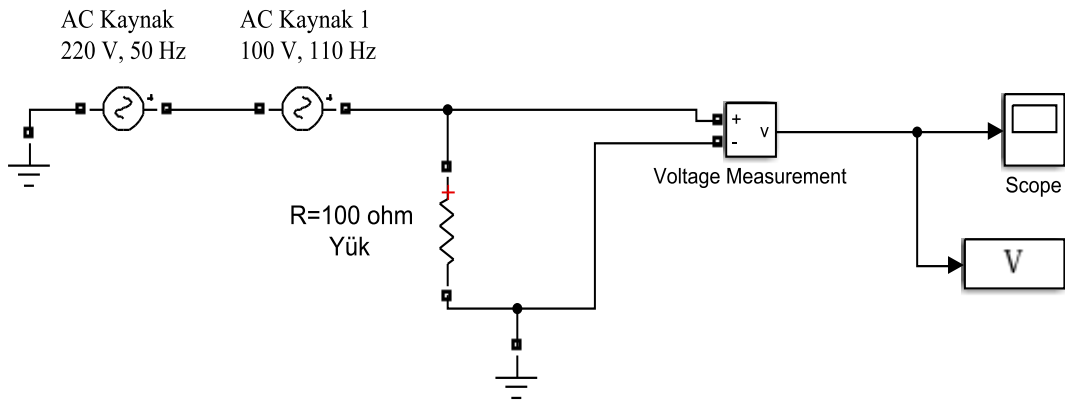


Şekil 2.22. Seri pasif filtre

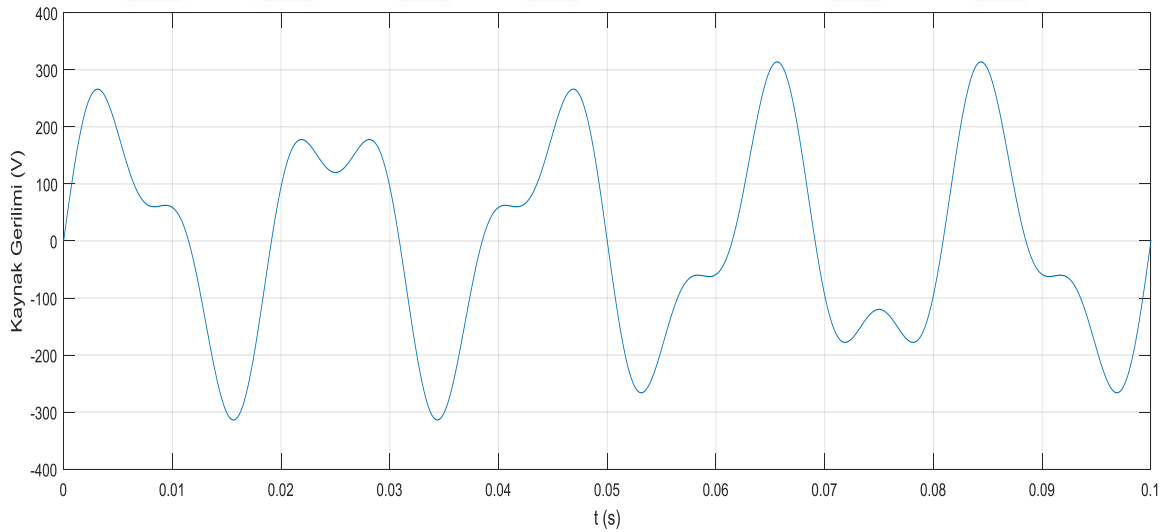
Şekil 2.22'de gösterilen pasif seri filtre tek fazlı sistemler için en basit gösterim şeklidir. Özellikle 3'üncü harmoniklerin bastırılmasında kullanılmaktadır. Ancak, diğer frekanslardaki harmoniklere göre de ayarlanabilirler. Ayarlandıkları frekanslara yüksek empedans, temel frekansa düşük empedans sunarlar. Bu filtreler, tam yük akımını taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu filtreler bakım gerektirmez ve MVAR'lara kadar yüksek güç değerlerinde tasarlanabilirler. Seri pasif filtrelerin en büyük dezavantajı hat

gerilimi için yalıtılmaları ve tüm yük akımı filtre üzerinden geçmekte ve gerilim düşümüne sebep olmaktadır. Bununla birlikte seri pasif filtrelerin rezonans problemi yoktur. (Das, 2004).

Şekil 2.23' te Matlab/Simulinkte benzetim çalışması yapılmış 100 Ω 'luk yük 220 V, 50 Hz temel harmonik ve 100V, 110 Hz değerindeki sistemde istenmeyen harmonik toplamından oluşan bozulmuş bir gerilimle beslenmektedir. Bu iki gerilim dalgasının neden olmasıyla oluşan bozulmuş dalga şekli, Şekil 2.24'te gösterilmiştir.

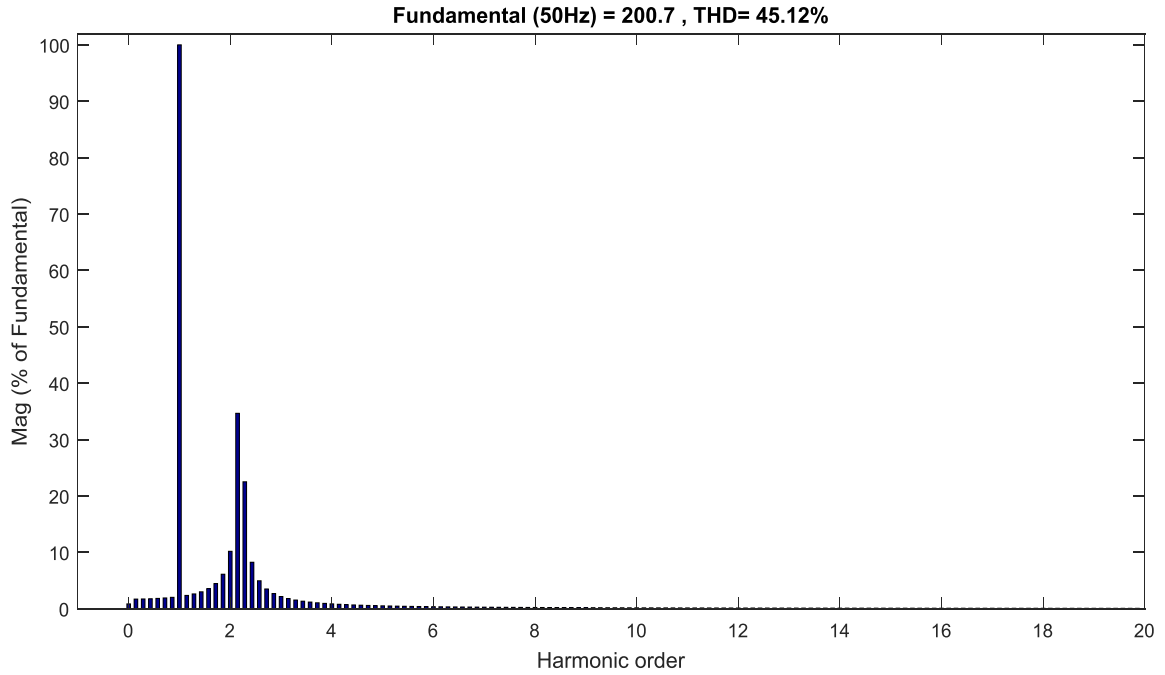


Şekil 2.23. 100 Ω 'luk yük ve şebeke gerilimleri benzetim modeli (SPF devrede değil)



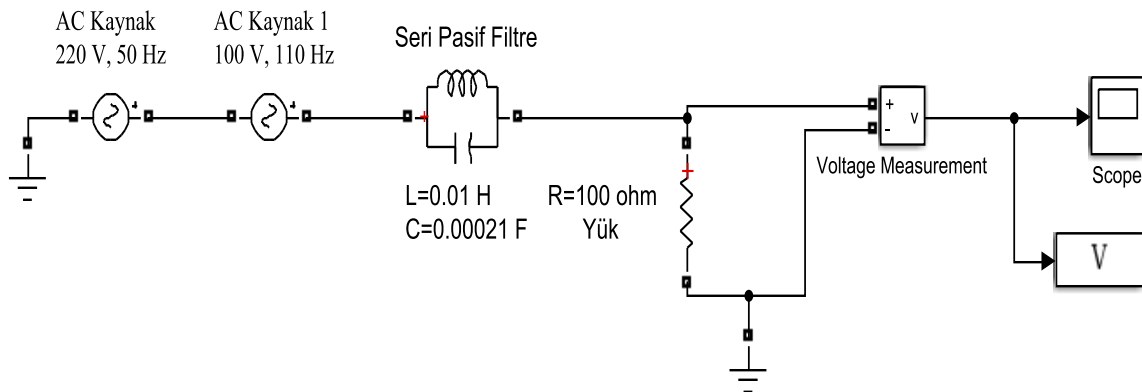
Şekil 2.24. Yük üzerindeki bozulmuş gerilimin değişimi (SPF devrede değil)

Şekil 2.25'de harmonikli kaynak gerilimine ait THB gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi THB %45,12'dir. Bu değer IEE-519-1992 standartlarında gerilim için önerilen %3 değerinin çok çok üstünde yüksek bir değerdir.

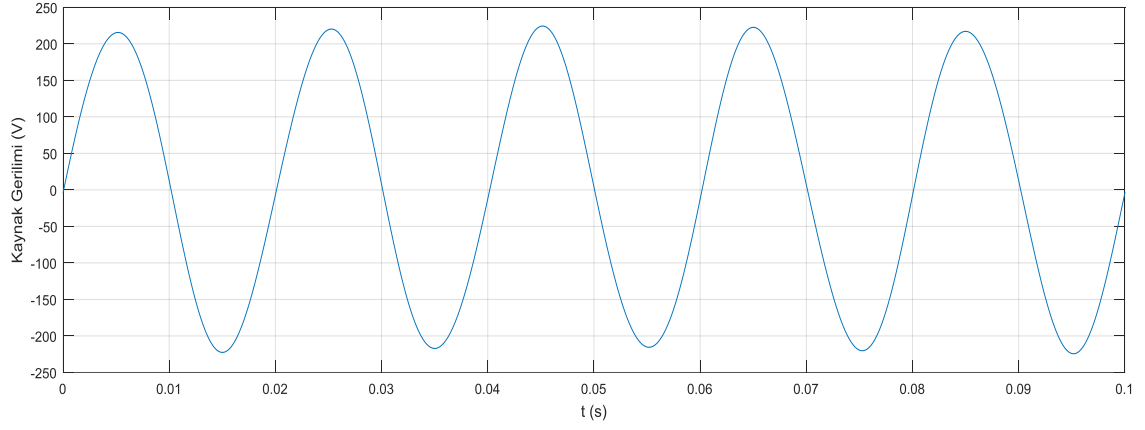


Şekil 2.25. Harmonikli gerilime ait THB (SPF devrede değil)

Şekil 2.26’da verilen SPF’nin Matlab/Simulink benzetim modelinden görüleceği üzere, yüke uygulanan harmonikli gerilimi yok etmek için yüke ve şebekeye seri bir L-C bağlanmıştır. Yüke seri bağlanan bu L-C’nin, 220 V ve 50 Hz gerilim kaynağına düşük empedans göstermesi; 100 V, 110 Hz’lik gerilim kaynağına ise büyük empedans gösterip yük tarafına geçirmemesi beklenmektedir. Eleman değerleri $L=0,01$ H, $C=0,00021$ F seçilirse, Şekil 2.27’den görüleceği üzere $100\ \Omega$ ’luk yük üzerindeki gerilimin dalga şekli istenilen gibi 220 V ve 50 Hz’lik sinüsoidal dalga şekline yaklaşmaktadır.

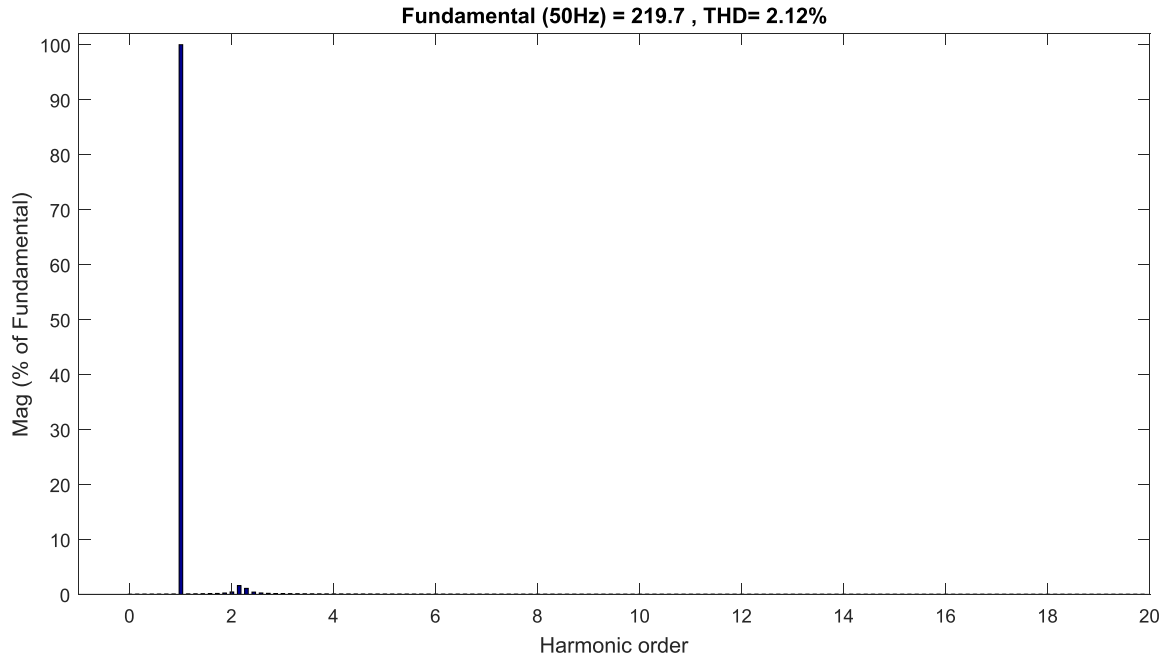


Şekil 2.26. SPF’nin Matlab/Simulink benzetim modeli



Şekil 2.27. Yük üzerindeki gerilimin değişimi (SPF devrede)

Seri PF'nin devreye girmesiyle, Şekil 2.28'de gösterildiği gibi kaynak geriliminin THB'si %45,12'den %2,12'ye düşmüştür. Böylece IEE-519-1992 standartlarında gerilim için önerilen %3 değeri sağlanmıştır.

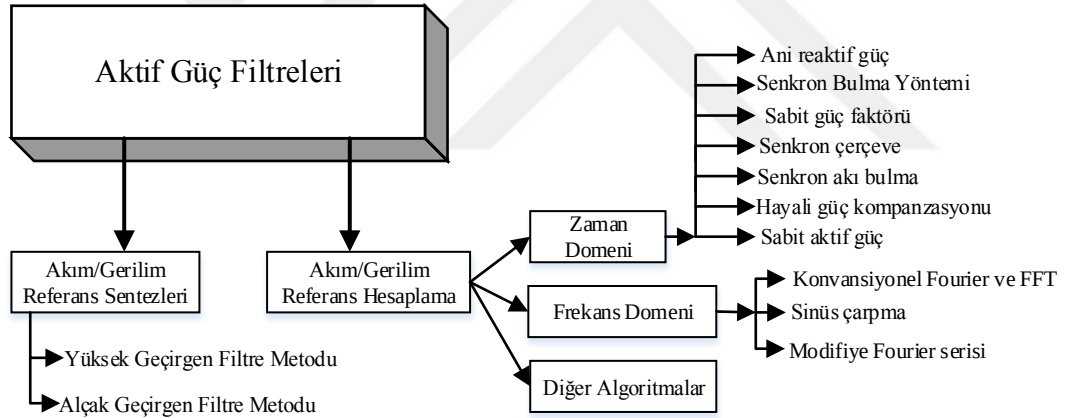


Şekil 2.28. Kaynak gerilimine ait THB (SPF devrede)

3. REFERANS AKIM ÇIKARTMA YÖNTEMLERİ

3.1. Genel Bilgi

Referans akım çıkarma yöntemi, harmonik kaynağın şebekeden çektiği harmonikli akımı yok etmek ve reaktif gücü kompanze etmek amacıyla AGF'nin sisteme vermesi gereken akımın hesaplanmasını ifade eder. AGF'nin başarılı dinamik bir performansı için doğru ve hızlı bir referans akım çıkartma metodu kullanmak son derece önemlidir. Literatürde kullanılan farklı referans akım çıkartma yöntemleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir (El-Habrouk vd., 2000). AGF'nin harmonik kompanzasyon aşamaları iki kısma ayrılabilir. Birinci kısım; yük akımı harmoniklerinin tespiti ve değerlendirilmesi, ardından referans akım çıkartma işlemidir. İkinci kısım, gerilim kaynaklı evirici için anahtarlama sinyallerinin üretilmesidir.



Şekil 3.1. Referans akım/gerilim çıkartma yöntemleri

Akım/gerilim referansı tahmin tekniklerine göre sınıflandırma, zaman ve frekans domeni kontrolü olarak iki kısma ayrılabilir. Frekans domenindeki referans akım/gerilim çıkartma kontrol stratejisi, bozulmuş gerilim veya akım sinyallerinin fourier analizine dayanır. Frekans domeni yaklaşımları hem tek hem de üç fazlı sistemler için uygundur. Frekans domeni algoritmaları; klasik Fourier ve Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmaları, sinüs çarpma tekniği ve modifiye Fourier serileri teknikleridir. AGF'nin zaman alanındaki kontrol yöntemleri, kompanzasyon komutlarının anlık olarak türetilmesine dayanmaktadır. Zaman domeni algoritmaları, sinir ağı, sabit aktif güç algoritması, sabit (birim) güç faktörü algoritması, DQ yöntemi, anlık reaktif güç

algoritması (p-q), hayali güç kompanzasyon algoritması ve senkron akı algılama algoritmasıdır (Teke vd., 2011).

Filtre performansını önemli ölçüde etkilediği için, bir filtrenin doğru referans akım çıkarma tekniğini kullanması çok önemlidir. Algılanan referans akımları yanlış bir şekilde hesaplanırsa yanlış kompanzasyon yapılmasına ve dolayısıyla filtre performansının bozulmasına neden olur. Çeşitli kontrol yöntemleri, karmaşıklık, doğruluk, gürültü, tepki süresi vb. noktaları baz alarak performans açısından değerlendirilir. Bu nedenle, filtre uygulamasına göre uygun olan kontrol yönteminin seçilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, frekans domeninde FFT yöntemi ile zaman domeninde anlık reaktif güç teorisi denetim yöntemi ve senkron referans çatı denetim yöntemlerine ait benzetim çalışmaları yapılmış ve uygulama sonuçları verilmiştir. Benzetim çalışmalarında her üç yöntemin performanslarını kolayca karşılaştırmak amacıyla kaynak gerilimleri ve devreye giren yükler için aynı değerler kullanılmıştır. Her üç yöntem için de kaynak geriliminin tepe değeri 320 V, frekansı 50 Hz olarak alınmakta ve 10 Ω , 1 mH değerindeki RL yükü (yük1) devreye girdikten 20 ms sonra ise 15 Ω , 3 mH değerindeki RL yükü (yük2) devreye girmektedir.

3.2. Frekans Alanı Yöntemleri

3.2.1. Genel Bilgi

Frekans alanı yöntemleri, hızlı Fourier analizi ile yeniden düzenlenmiştir. Bu yüzden DSP'lerde gerçek zamanlı uygulamaya yönelik daha az sayıda hesaplamayla mümkün olduğunca hızlı sonuçlar elde edilmektedir. Bununla birlikte, frekans alanı yöntemleri sinyalin frekans spektrumunu analiz etmek için bir pencere fonksiyonundan faydalandığından, frekans alanı yöntemleri büyük bellek gereksinimi duymaktadırlar. Ayrıca frekans alanı yöntemlerinde geçici durumlarda doğruluk kaybolabilmektedir. Frekans alanı yöntemlerinin genel olarak dinamik cevapları zayıf olduğu için zaman alanı yöntemlerine göre daha az kullanılmaktadır (Shahbaz, 2012).

Aşağıda frekans alanı yaklaşımları sunulmuştur:

- Konvansiyonel Fourier ve FFT analizi tabanlı algoritma
- Sinüs çarpım tekniği
- Modifiye Fourier serileri tekniği

Frekans alanı yöntemleri içerisinde referans akım üretmek ve analiz için DFT tabanlı algoritma ya da diğer adıyla FFT iyi bilinen bir tekniktir ve daha az hesaplama gereksinimi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte FFT uygulamalarında birçok performans sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalar aşağıda verilmiştir:

- 1) Düşünülen pencere boyutu sırasında dalga formunun sabit bir büyüklükte olduğu varsayılır.
- 2) Örnekleme frekansı, analiz edilecek sinyalin en yüksek frekansının iki katından daha büyük olmalıdır.
- 3) Veri penceresinin uzunluğu, güç frekans döngülerinin tamsayı katı olmalıdır.

Eğer sinyal gürültülü ise ve/veya DA bileşeni zayıf bir yapıya sahipse, DFT tabanlı algoritma hesaplama hatasına neden olabilir ve hatalı sonuçlara yol açabilir (El Shatshat, 2001).

3.2.2. Hızlı Fourier Dönüşümü Yöntemi

Frekans bölgesinde gerçekleştirilen denetim yöntemlerinde, harmonik akım ya da gerilimin FFT işlemi yapılır ve AGF için gerekli olan referans işaretler bu analiz yardımı ile elde edilir. Ancak bir işaretin FFT'sinin yapılabilmesi için tekrarlı bir fonksiyon olması gerekmektedir. FFT kullanılarak akımın temel bileşeni elde edilir. Ardından yükün talep ettiği toplam akımdan bu temel bileşen çıkarılır. Geriye kalan harmonikli akımlar elde edilir. AGF'nin kontrolü için lazım olan referans işaretler elde edilen bu harmonikli akımların tersi alınarak üretilir (Uçar, 2012). Etkin bir kompanzasyon için, aktif güç filtresinin anahtarlama frekansı genelde en bozuk sinyalleri dahi kompanze edilecek harmonik frekansın iki katında tutulur. Fourier dönüşümün anlık uygulamaları karışık hesaplamalar içerir ve sonuç tepki süresi uzundur. Frekans domen tekniğinin dezavantajı, hesaplamaların çokluğu, hesaplama miktarının filtrelenecek harmonik derecesinin artmasıyla daha da artması ve cevap süresinin uzamasıdır.

Bu yöntemde ölçülen yük akımının ana harmonik bileşeni denklem (3.1)'de verilen Fourier serisi ile hesaplanır.

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

Harmonikli akımın temel bileşeni, denklem (3.2) deki gibi gösterilebilir.

$$I_y = I_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (3.2)$$

Bu temel akım bileşeni lineer olmayan sistemde yük akımından çıkarılırsa yalnızca harmonikli akımlar elde edilir.

$$I_{y(abc)} - I_{1.Harmonik(abc)} = I_{2,3,4,...Harmonik(abc)} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te elde edilen harmonikli akımlar, sisteme ters ve eşit büyüklükte basıldığında harmonik kompanzasyonu sağlanmış olur. Bunu sağlamanın ilk adımı her faz için yük akımı alınarak, temel (birinci) harmoniğin genliğinin ve faz açısının bulunması gerekir. Temel bileşenin genliği ve temel bileşenin faz açısı aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilebilir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (3.4)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \theta_n)$$

Temel harmonik için A1 ve B1 katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin(\theta_k) \quad (3.5)$$

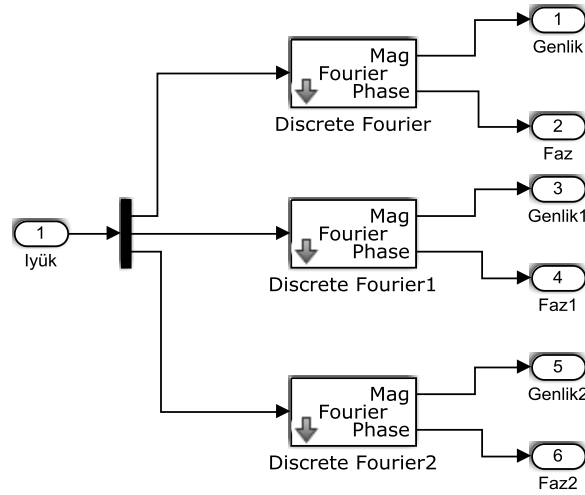
$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos(\theta_k)$$

C_1 temel harmoniğin genliği, θ_1 temel harmoniğin faz açısıdır.

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (3.6)$$

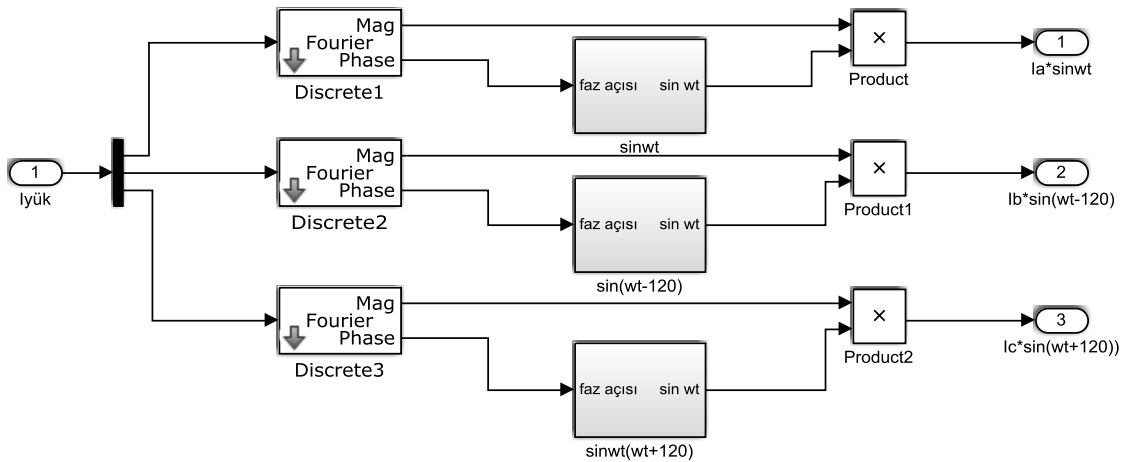
$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{B_1}{A_1}\right)$$

Şekil 3.2'de FFT kullanılarak her bir yük akımının faz açısı ve genliğini bulan Matlab/Simulink benzetim bloğu verilmektedir. Benzetim bloğu, yukarıda verilmiş olan denklemler yardımıyla elde edilmektedir.



Şekil 3.2. Fourier dönüşüm ile her bir yük akımının faz açısını ve genliğini bulan Matlab/Simulink benzetim bloğu

Faz açısı hesaplandıktan sonra faz kilitlemeli döngü (PLL), sinüsoidal dalga bileşenlerini üretir. Temel harmonik akım büyüklüğü sinüsoidal dalgala bileşenleri ile çarpılır. Böylece, her yük fazının temel akım harmonik değeri hesaplanabilir. Fakat eviricinin mevcut kayıpları ($I_{kayıp}$) sisteme geri verilmelidir. Şekil 3.3'te yük akımı sinyalinin faz açısı hesaplaması ve sinyalin PLL'e iletilerek sinüsoidal dalga bileşenlerini üretmeye ilişkin bloklar verilmektedir (Akmaz ve Erişti, 2014).



Şekil 3.3. Sinüsoidal dalga bileşenlerini ve temel akım harmoniklerini üreten Matlab/Simulink blokları

$n=1$ için;

$$I_1 = I_1 + I_{kayıp} \quad (3.7)$$

(3.8)

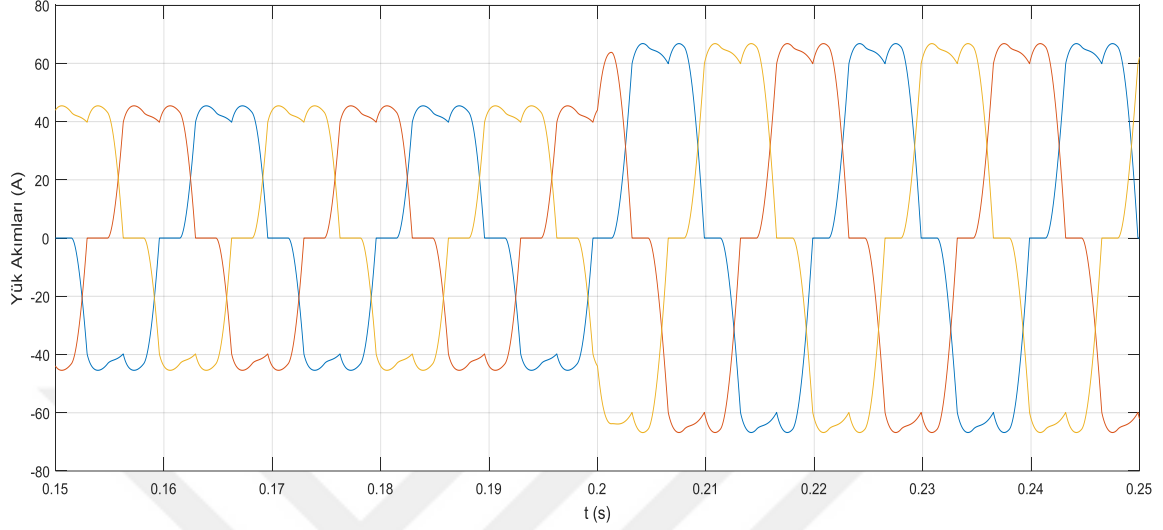
(3.8)

(3.8)

3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümü Yöntemi İçin Matlab/Simulink Benzetim Modeli

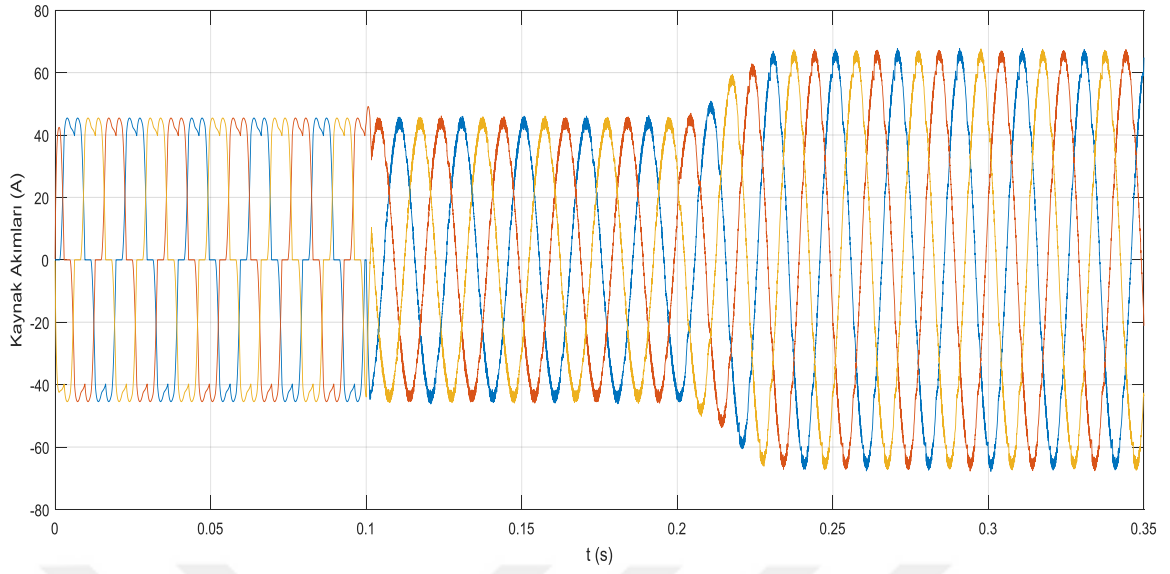
Birinci yük $10\ \Omega$, 1 mH değerinde bir RL yükü olup, hemen devreye girmektedir. İkinci yük ise $15\ \Omega$, 3 mH değerinde bir RL yükü olup, 20 ms 'de devreye girmektedir. İkinci yükün devreye alınmasının nedeni farklı yük koşullarında PAGF'nin performansını ölçmektir. Doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın üç faz dalga yapısı, Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bu çalışmada, $t=0.2\text{ s}$ anında akımda meydana gelen artış, birinci doğrusal olmayan yüke ilave olarak ikinci yük de devreye alındığı için ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca yüklerin doğrusal olmayan karakteristiklerinin sonucu olarak şebekeden çektikleri akımın dalga şeklinin de sinüzoidal yapıda olmadığı görülmektedir.



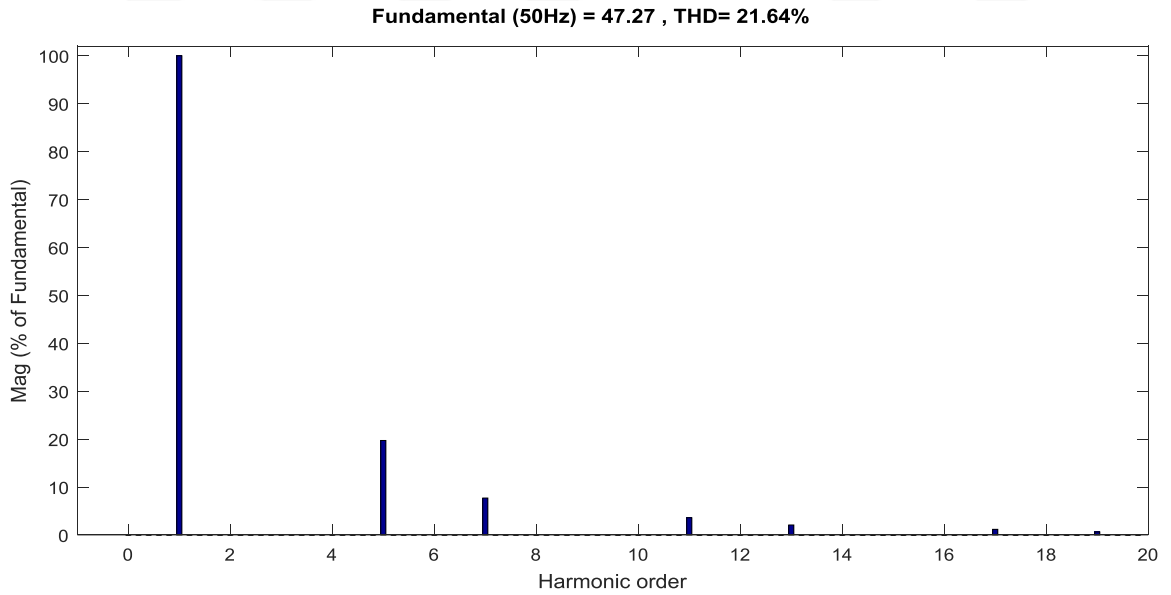
Şekil 3.5. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (FFT etkin değil)

Şekil 3.6’da benzetim süresince kaynak akımların değişimi gösterilmektedir. 0,1’inci saniyede PAGF’nin devreye girdiği ve 0,2’inci saniyede Yük2’nin devreye girdiği durumlar gösterilmektedir. Başlangıçta harmonikli olan akımlar, 0,1’inci saniyede FFT yöntemini kullanan PAGF’nin devreye girmesiyle sinüsoidal yapıya yaklaşmıştır. Yine 0,2’inci saniyede Yük2’nin devreye girmesiyle birlikte PAGF başarılı bir şekilde harmonik kompanzasyon yapmaya devam etmektedir.

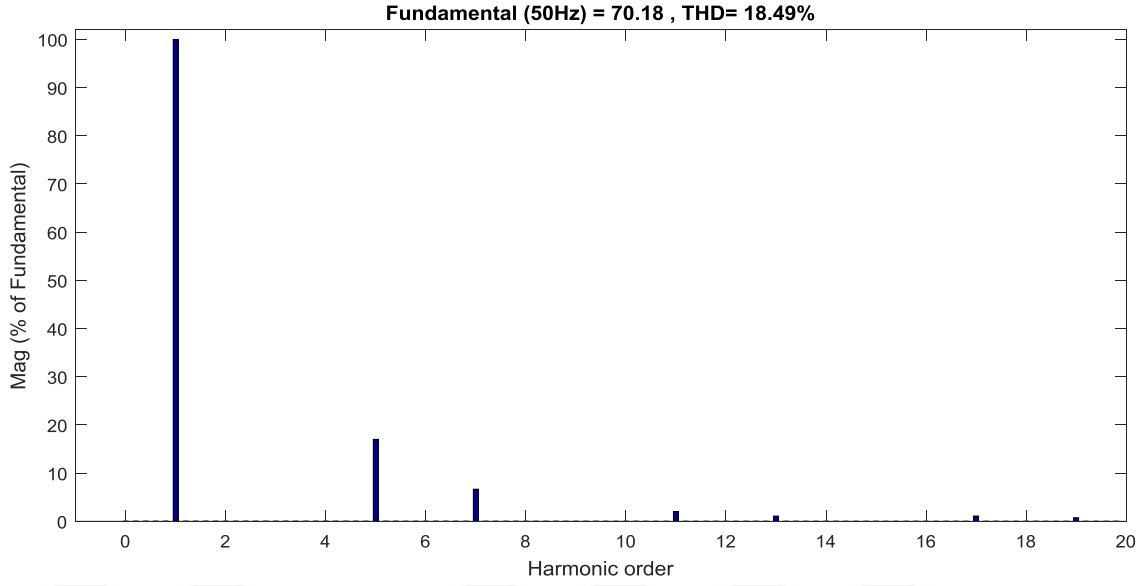


Şekil 3.6. Benzetim süreci boyunca kaynak akımının değişimi (FFT)

Şekil 3.7’de Yük1 devrede olduğunda yük akımının THB’si %21,64 olduğu ve iki yük beraber devrede iken THB’nin %18,49 olduğu Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Her iki yük durumunda THB’nin IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin çok üstünde olduğu görülmektedir.

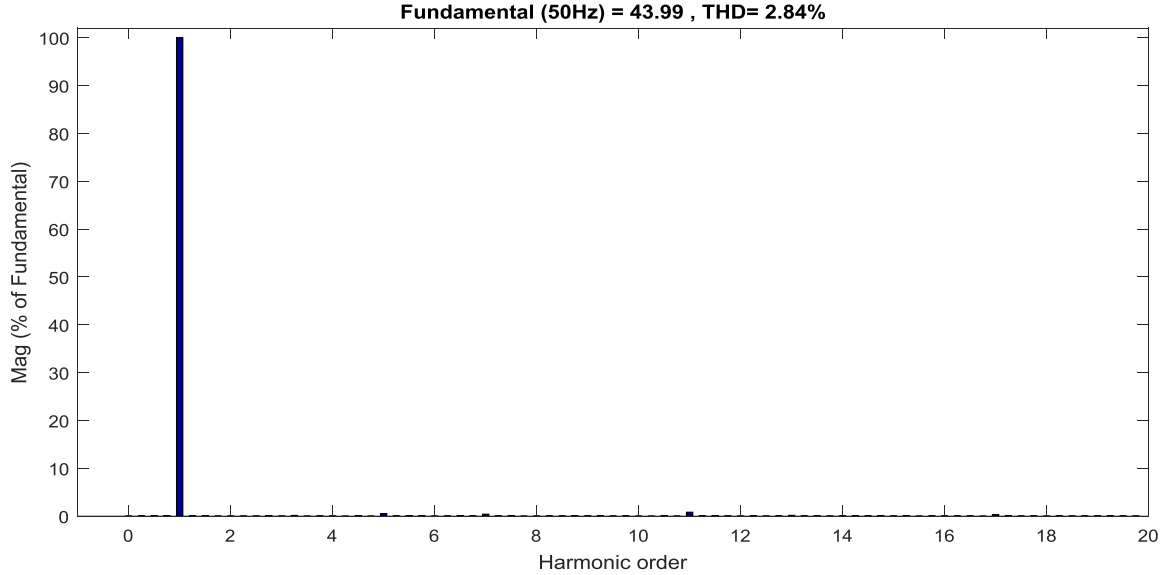


Şekil 3.7. Yük1 devrede iken akımdaki toplam harmonik bozulma (FFT etkin değil)

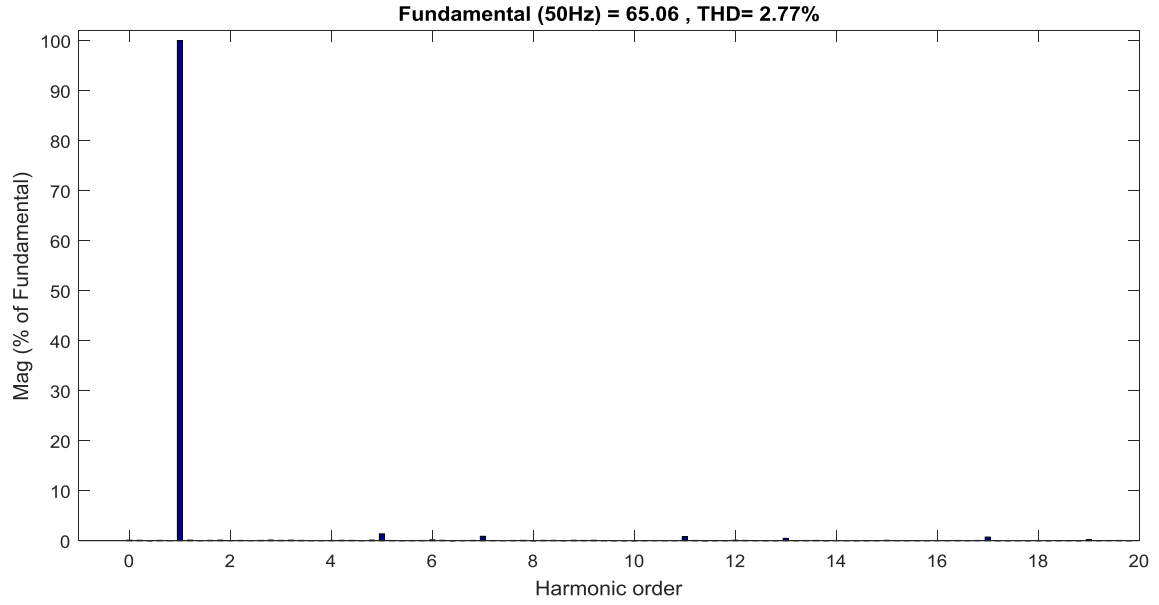


Şekil 3.8. Her iki yük devrede iken akımdaki THB (FFT etkin değil)

Sadece Yük1 devrede iken, FFT yöntemini kullanan PAGF'nin devreye girmesiyle THB'nin %2,84'e düştüğü Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Yine Şekil 3.10'a göre, her iki yük devrede iken FFT yöntemini kullanan PAGF'nin devreye girmesiyle THB %2,77'e düşmektedir. Bu değerlerin, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin altında oldukları görülmektedir.



Şekil 3.9. Yük1 akımının THB'si (FFT)



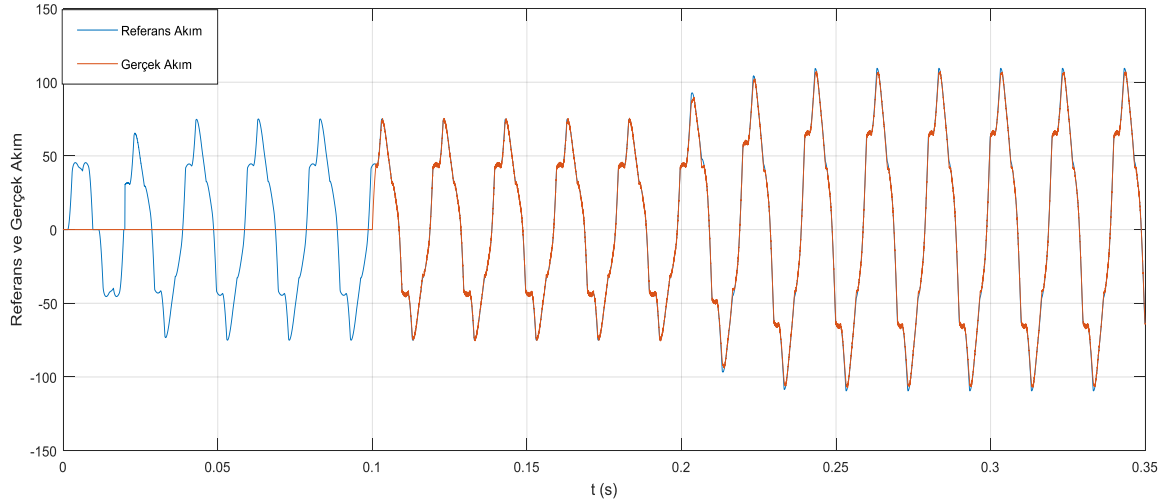
Şekil 3.10. Her iki yük akımının THB'si (FFT)

Tablo 3.1, referans işaret çıkarmak için kullanılan FFT yöntemin harmonik bastırma verilerini göstermektedir.

Tablo 3.1. FFT Yöntemine Ait Harmonik Verileri

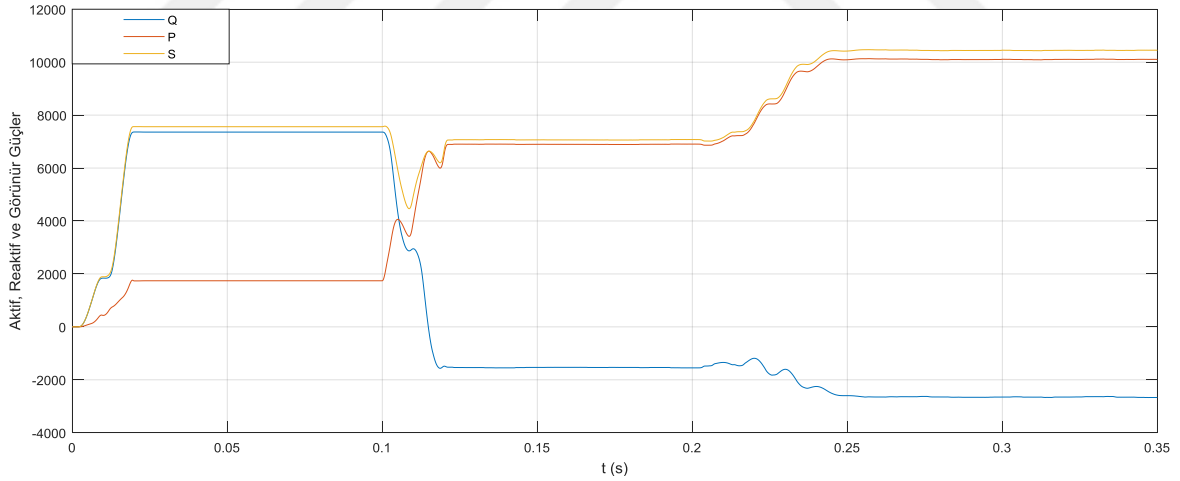
Yöntem	Yük Durumu	Yük Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
FFT	Yük1	21,64	2,84
	Yük1 ve Yük2	18,49	2,77

Şekil 3.11'de FFT'nin referans işaretleri izleme başarısı gösterilmektedir. $t=0,10$ s anında PAGF devreye girmiş ve mevcut referans akımları istenen şekilde yakalayarak izlemeye başlamıştır. $t=0,2$ s anında, ikinci yükün devreye girmesiyle değişen referans akımlar da yüksek doğrulukla izlenmiştir.



Şekil 3.11. Benzetim süresi boyunca gerçek ve referans akımın değişimi (FFT)

Şekil 3.12’de FFT yöntemine ait aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere reaktif güç düşmekte, fakat sıfır olmamaktadır. Dolayısıyla FFT yöntemi harmonikleri başarı ile bastırabilmektedir. Ancak reaktif güç kompanzasyonu yapmakta yetersiz kalmaktadır.



Şekil 3.12. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (FFT)

3.3. Zaman Alanı Yöntemleri

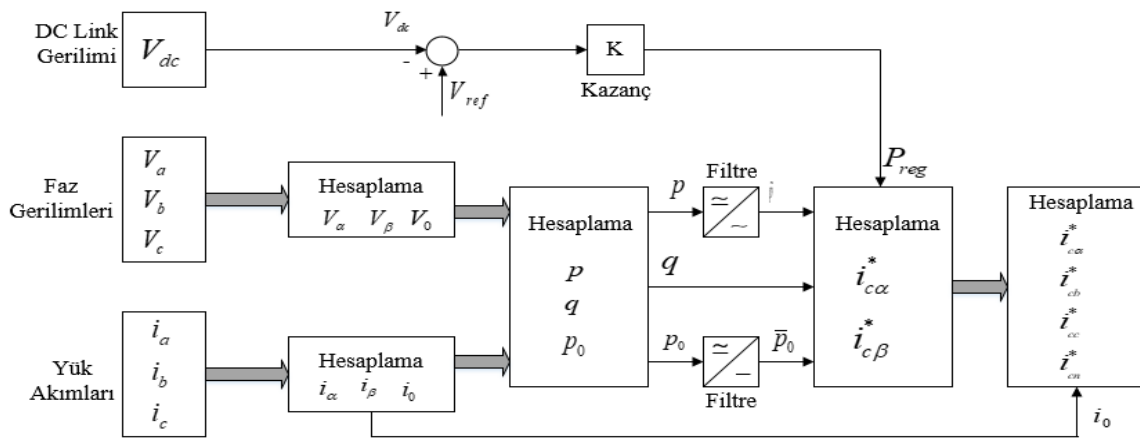
Zaman alanı tekniğinin en büyük avantajı güç sistemindeki değişmelere karşı cevap hızının yüksek olmasıdır. Ayrıca uygulanması ve hesaplamaları kolaydır. Geçişler sırasında tepki hızları ve kompanzasyonun iyi olması, 1990’lardan sonra zaman alanı tekniğinin frekans alanı tekniğine göre çok daha fazla kullanılmasına neden olmuştur (Chen ve Xie, 2004). Literatürde zaman alanında referans işareti elde etmek için ARGT,

senkron algılama algoritması, sabit aktif güç algoritması, sabit güç katsayısı algoritması, hayali güç kompanzasyonu, SRÇY ve senkron akı algılama algoritması gibi farklı yöntemler kullanmıştır.

ARGT ve SRÇY, PAGF uygulamalarında referans akım çıkarımı için en çok tercih edilen zaman alanı yöntemidir (Özkaya, 2007). Zaman alanı yöntemleri daha az hesaplama gerektirdikleri için örnekleri depolanmasında büyük belleğe ihtiyaç duymazlar. Dolayısıyla, veri işleme için güçlü CPU'lar gerektirmezler. Zaman alanı yöntemleri, daha hızlı ve basittir, ancak frekans alanı yöntemlerine kıyasla daha az doğruluk oranına sahiptirler (Kucherenko ve Safronov, 2014).

3.3.1. Anlık Reaktif Güç Teorisi Yöntemi

Bu yöntem p-q teorisi olarak da bilinir. ARGT ilk kez Akagi tarafından aktif güç filtrelerinin kontrolüne uygulanmak amacıyla ortaya konulmuştur (Akagi vd., 2007). ARGT yöntemi ile referans akımlar, Şekil 3.13'te gösterilen kontrol yapısı yardımıyla çıkarılır.



Şekil 3.13. ARGT kontrol yapısı

Sadece kararlı durumda değil aynı zamanda geçici durumda da uygulanabilen bu yöntem üç fazlı gerilimlerin simetrik ve sinüzoidal olması durumunda geçerlidir.

Üç fazlı akım ve gerilimler, denklem (3.9)'da verilen dönüşüm matrisi (Clarke Dönüşümü) kullanılarak iki bileşenli α - β durağan çatıya dönüştürülür. Burada x ile gösterilen akım ya da gerilim olabilir.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Bu bileşenler kullanılarak aktif ve reaktif güçler denklem (3.10)'daki gibi anlık olarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Eğer şebekeye bağlı yükler harmonikli bir akım çekiyorsa α - β eksenine göre hesaplanan aktif ve reaktif güçler, denklem (3.11) ve (3.12)'de gösterildiği gibi hem DA hem de AA bileşenlere sahip olacaktır. Aktif güç formül şeklinde denklem (3.6) gibi yazılabilir.

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = P_\alpha(t) + P_\beta(t) = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de $P(t) = P_\alpha(t) + P_\beta(t)$ ifadesi anlık gerçek gücü göstermektedir. Reaktif güç denklem (3.12)'deki gibi yazılabilir.

$$q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.12)$$

Denklem (3.11)'de verilen p aktif güç denkleminde; $\bar{p}$ şebekeden yüke doğru anlık aktif gücün DA bileşenini, $\tilde{p}$ ise anlık aktif gücün AA bileşenini gösterir. Denklem (3.12)'de verilen q reaktif güç denkleminde; $\bar{q}$ çekilen reaktif gücün DA bileşenini, $\tilde{q}$ ise reaktif gücün AA bileşenini gösterir. Denklemlerdeki V_α ve V_β üç fazlı sinüzoidal kaynak geriliminin Clarke dönüşümü sonrası elde edilen ifadelerdir.

Denklem (3.11)'de gösterilen p aktif gücündeki AA bileşen harmonikleri içeren bileşendir. Referans akımların bastırılacak harmoniklerle eşit özellikli harmonikleri içermesi, p gücünün AA bileşeninin yüksek geçiren filtre kullanılarak süzülmesiyle gerçekleşir ve eşitliklerde yüksek geçiren filtrenin 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. α - β eksenindeki referans akımlar denklem (3.13)'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_{DA} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

p_{DA} gücü, AGF yapısındaki anahtarlama kayıplarını ve DA bağıdaki kondansatörden kaynaklanan kayıpları karşılamak için kullanılmaktadır. Yani AGF, DA-bağ yapısına herhangi bir kaynak gerektirmeksizin bu kayıpları bağlı olduğu şebekeden karşılayabilmektedir.

α - β ekseninde elde edilen referans akımlar, denklem (3.14)'da gösterilen ters Clarke dönüşümü uygulamasıyla olağan üç-faz biçimine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Denklem (3.11) ve denklem (3.12)'ye dayanarak elde edilen α - β eksenini güç bileşenlerini kolaylıkla ayırabiliriz:

$$P_{\alpha p} = V_{\alpha} i_{\alpha p} = \frac{V_{\alpha}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (3.15)$$

$$P_{\alpha q} = V_{\alpha} i_{\alpha q} = \frac{-V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (3.16)$$

$$P_{\beta p} = V_{\beta} i_{\beta p} = \frac{V_{\beta}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (3.17)$$

$$P_{\beta q} = V_{\beta} i_{\beta q} = \frac{V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (3.18)$$

Burada denklem (3.16) ve denklem (3.18)'in anlık toplamı sıfırdır. Denklem (3.11), denklem (3.15-3.18) yardımı ile üç fazlı aktif güç denklem (3.19)'daki gibi gösterilir.

$$P_{3\phi} = P_{\alpha} + P_{\beta} = P_{\alpha p} + P_{\alpha q} + P_{\beta p} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p} \quad (3.19)$$

Burada $P_{\alpha p}$, α - eksenini anlık aktif güç; $P_{\beta p}$, β - eksenini anlık aktif güç; $P_{\alpha q}$, α - eksenini anlık reaktif güç; $P_{\beta q}$, β - eksenini anlık reaktif güçtür.

Tanımlanan bu değerler anlık değerler olup, hem geçici hem de sürekli rejimler için geçerlidir. Bununla birlikte harmonikler burada akımda verilmesine rağmen gerilimde de

harmonikler olabilir. Denklem (3.13)'den yararlanılarak α - eksenindeki anlık yük akımı ve β - eksenindeki anlık yük akımı denklem (3.20) ve denklem (3.21)'de gösterilmektedir.

$$i_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{q} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} + \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{q} \quad (3.20)$$

$$i_{\beta} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{q} + \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{q} \quad (3.21)$$

Burada $\bar{p}$ şebekeden yüke doğru anlık aktif gücün DA bileşenini, $\tilde{p}$ ise anlık aktif gücün AA bileşenini gösterir. Denklem (3.12)'de verilen q reaktif güç denkleminde; $\bar{q}$ çekilen reaktif gücün DA bileşenini, $\tilde{q}$ ise reaktif gücün AA bileşenini gösterir. Aktif gücün AA bileşeni, harmonikleri içeren bileşendir. Referans akımların bastırılacak harmoniklerle eşit özellikli harmonikleri içermesi, p gücünün AA bileşeninin yüksek geçiren filtre kullanılarak süzülmesiyle gerçekleşir. α - β eksen sisteminde hesaplanan p ve q değerleri AGF'nin tasarım amacına uygun olarak alçak geçiren, yüksek geçiren ve bant geçiren filtrelerle maruz bırakılarak $\bar{p}$, $\bar{q}$, $\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$ değerleri bulunur. Örneğin sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılması istenirse $\bar{q}$ 'nin hesaplanması yeterlidir.

Bir filtrenin hem reaktif güç kompanzasyonu hem de harmonik kompanzasyon yapması için anlık reaktif gücün AA ve DA bileşenleri ile aktif gücün AA bileşenlerini yok etmesi gerekir. Bunun için aşağıda belirtilen kompanzasyon akım denklemlerini sağlaması gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

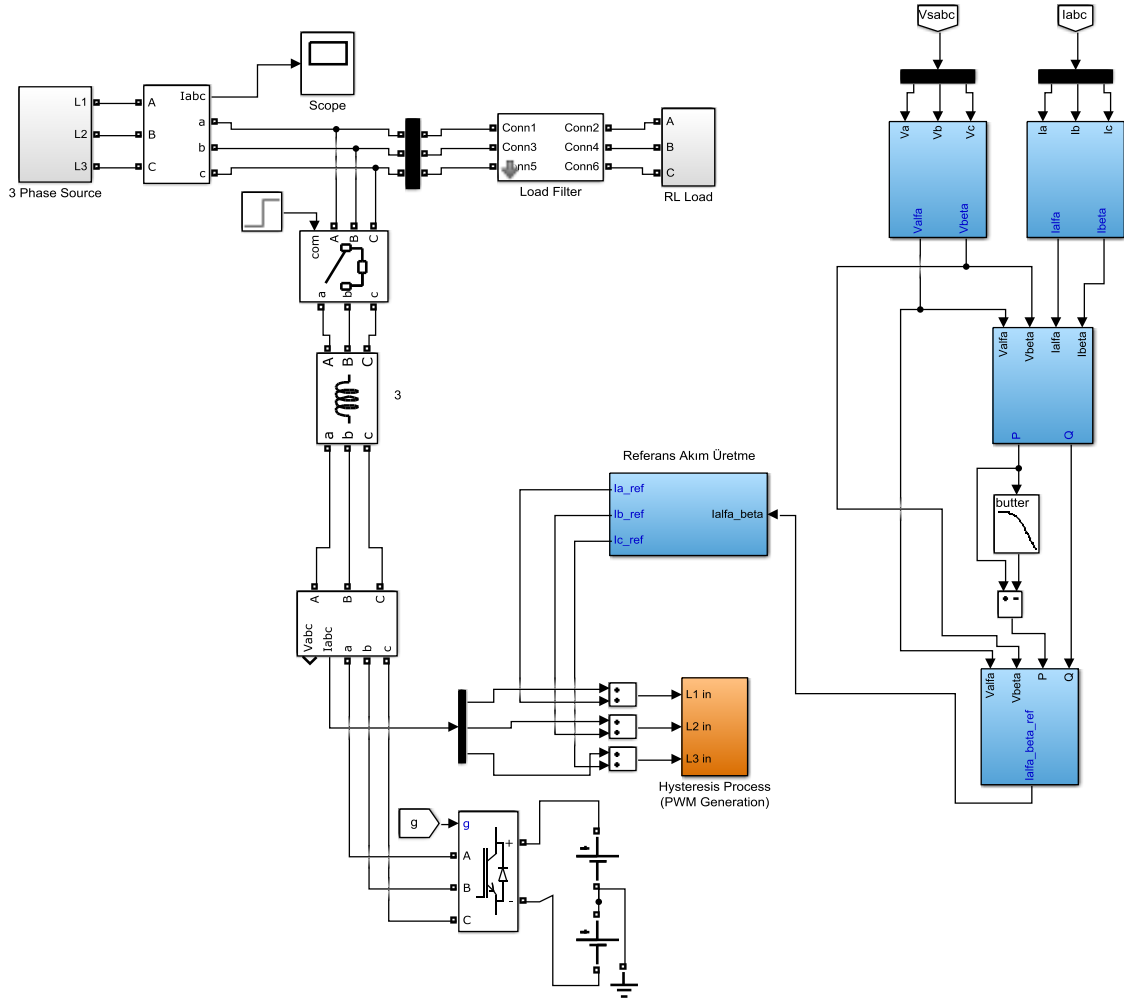
$$i_{c\alpha} = \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{q} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} + \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{q} \quad (3.23)$$

$$i_{c\beta} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{q} + \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{q} \quad (3.24)$$

3.3.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi Yöntemi İçin Matlab/Simulink Benzetim Modeli

Şekil 3.14'te ARGT yöntemini kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli verilmiştir. Sistem; üç fazlı gerilim kaynağı, ayrı ayrı zamanlarda devreye giren iki farklı yük, gerilim kaynaklı evirici, bağlantı endüktansları ve kontrol bloklarından oluşmaktadır. Birinci yük hemen devreye girmekte ve 10 Ω , 1 mH değerinde bir RL yüküdür. İkinci yük

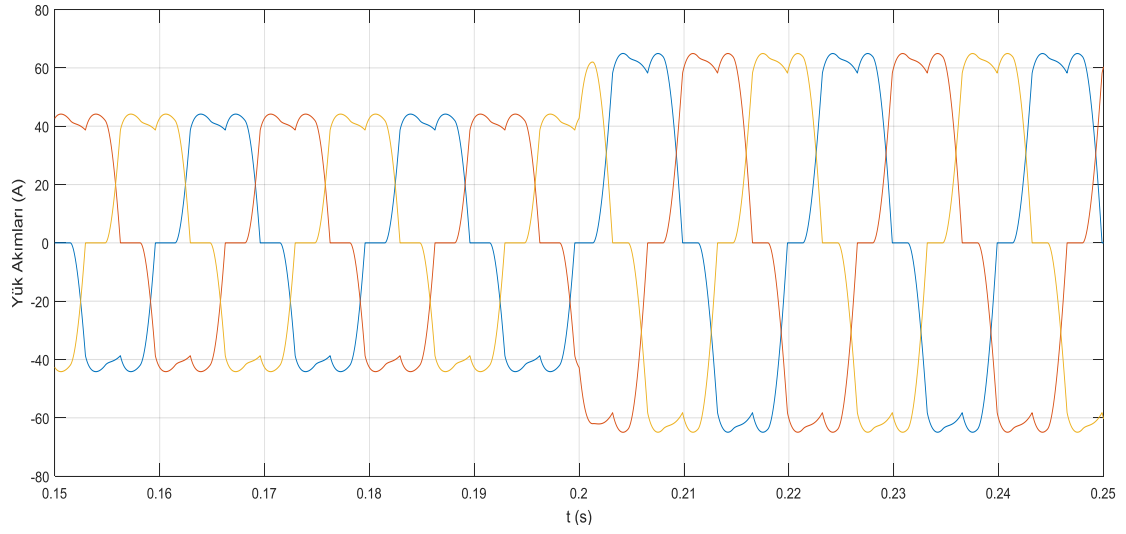
20 ms’de devreye girmekte ve 15 Ω , 3 mH değerindedir. İkinci yükün devreye alınmasının nedeni farklı yük koşullarında PAGF’nin performansını ölçmektir.



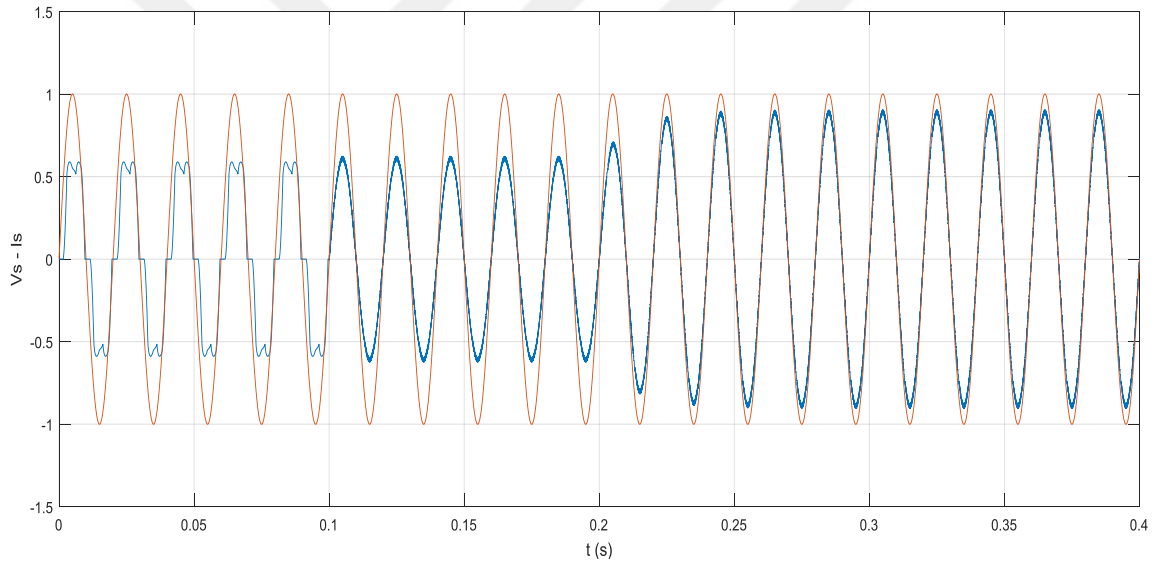
Şekil 3.14. ARGF’yi kullanan PAGF’nin Matlab/Simulink benzetim modeli

Şekil 3.15, doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın üç fazına ait dalga şeklini göstermektedir. Yüklerin doğrusal olmayan karakteristiklerinin sonucu olarak şebekeden çektikleri akımın dalga şeklinin de sinüzoidal yapıda olmadığı görülmektedir.

Şekil 3.16’da ilk yük devrede iken ve 0,2’inci saniye sonra ikinci yükün de devreye alındığı durumlara ait, yük akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz ilişkisi, birim değer (p.u.) cinsinden gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi PAGF devreye girmeden önceki faz kayması, yükün harmonikli akım çekmesinin yanında reaktif güç de çektiğini göstermektedir. 0,1’inci saniyede ARGF yöntemini kullanan PAGF’nin devreye girmesiyle hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır.

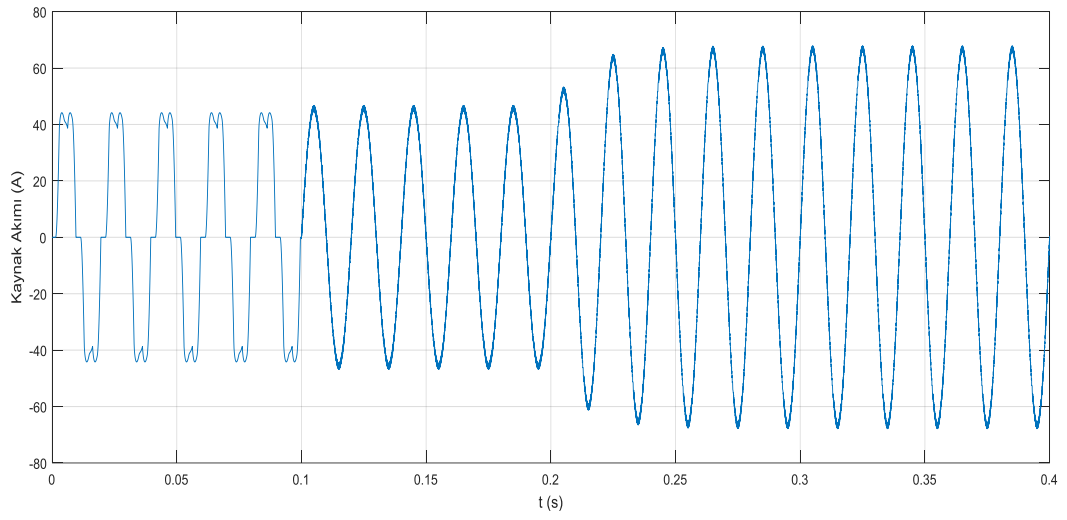


Şekil 3.15. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (ARGT)

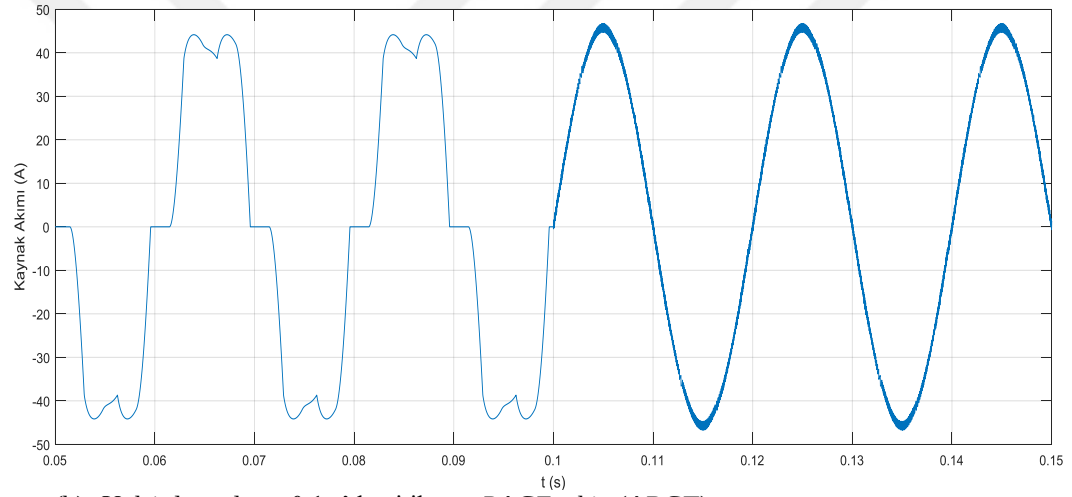


Şekil 3.16. Her iki yük devrede iken kaynak gerilimi ve akımının değişimi (ARGT)

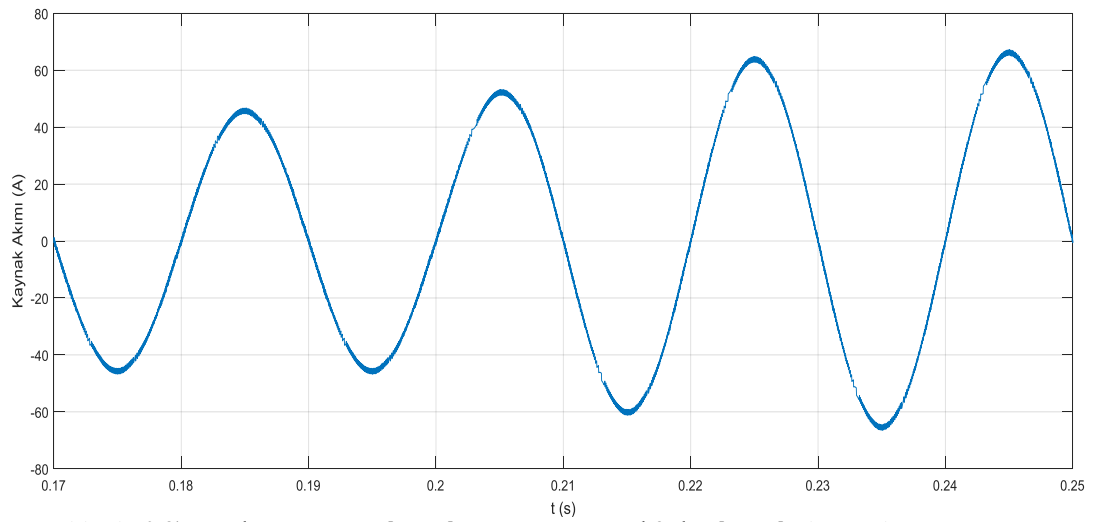
Şekil 3.17’de birim değer (p.u.) cinsinden kaynak akımının dalga şekli, PAGF öncesi ve sonrası için gösterilmiştir. 0,1’inci saniyede PAGF ve 0,2 saniye sonra ise Yük2 devreye girmektedir. Bu çalışma şartları için sonucun daha iyi incelenebilmesi için Şekil 3.17 (a)’ da benzetim süresi boyunca, Şekil 3.17 (b) ve 3.17 (c)’de detay gösterim olarak ayrıca verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, ARGT yöntemini kullanan 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 kompanzasyona ek olarak birim güç faktörlü çalışma elde edilerek güç faktörü düzeltme gerçekleştirilmiştir.



(a) Yükl devrede, 0.1 s sonra PAGF etkin, 0.2 s sonra Yükl-2 devrede (ARGT)



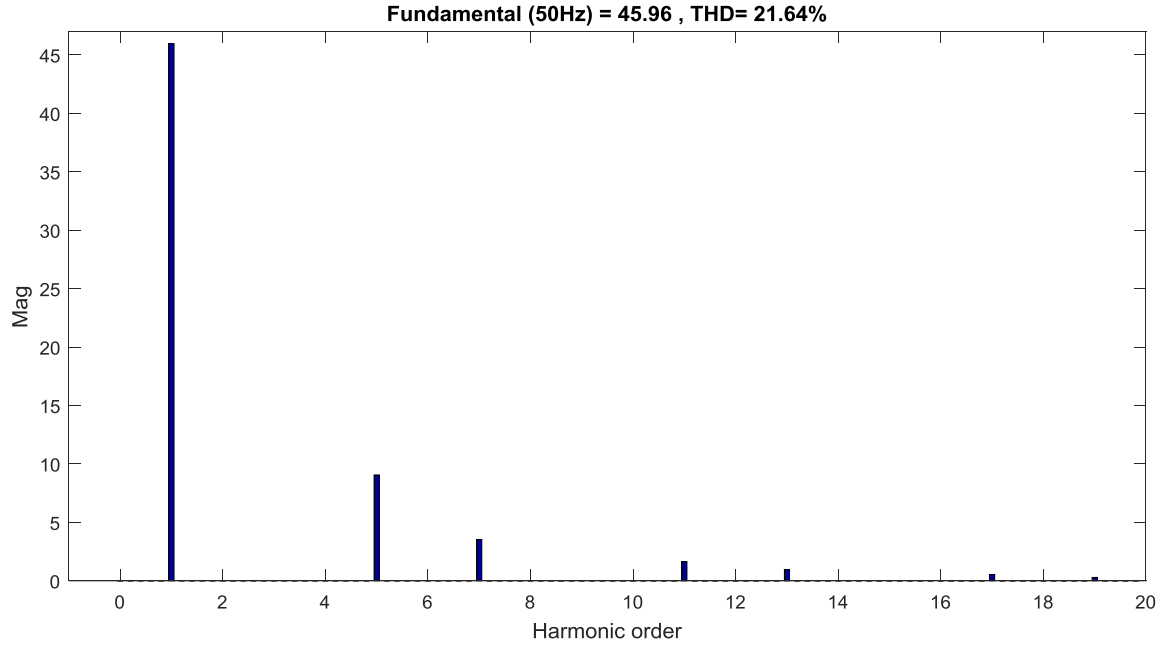
(b) Yükl devrede ve 0.1 s'den itibaren PAGF etkin (ARGT)



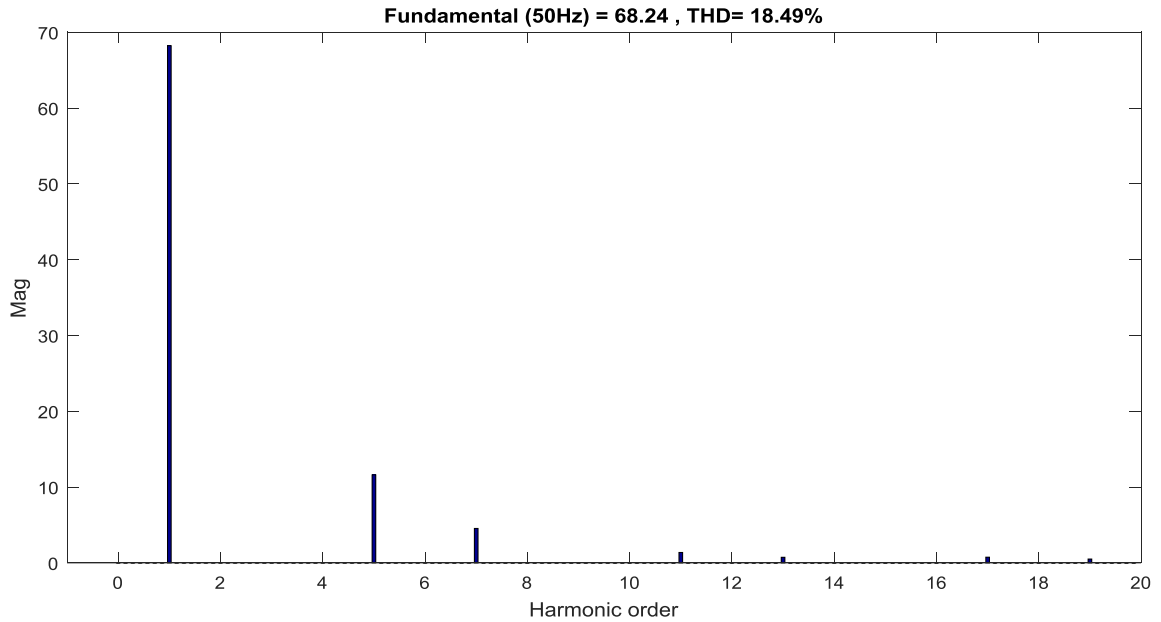
(c) (0-0,2) s Yükl ve PAGF devrede, 0.2 s sonra Yükl2 de devrede (ARGT)

Şekil 3.17. Kaynak akımlarının değişimi (ARGT)

Şekil 3.18 (a) ve (b) sırasıyla, Yük 1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için yük akımının THB'sini yüzde olarak göstermektedir. THB'nin, birinci yük devrede iken %21,64 ve iki yük birlikte devrede iken ise %18,49 olduğu görülmektedir.



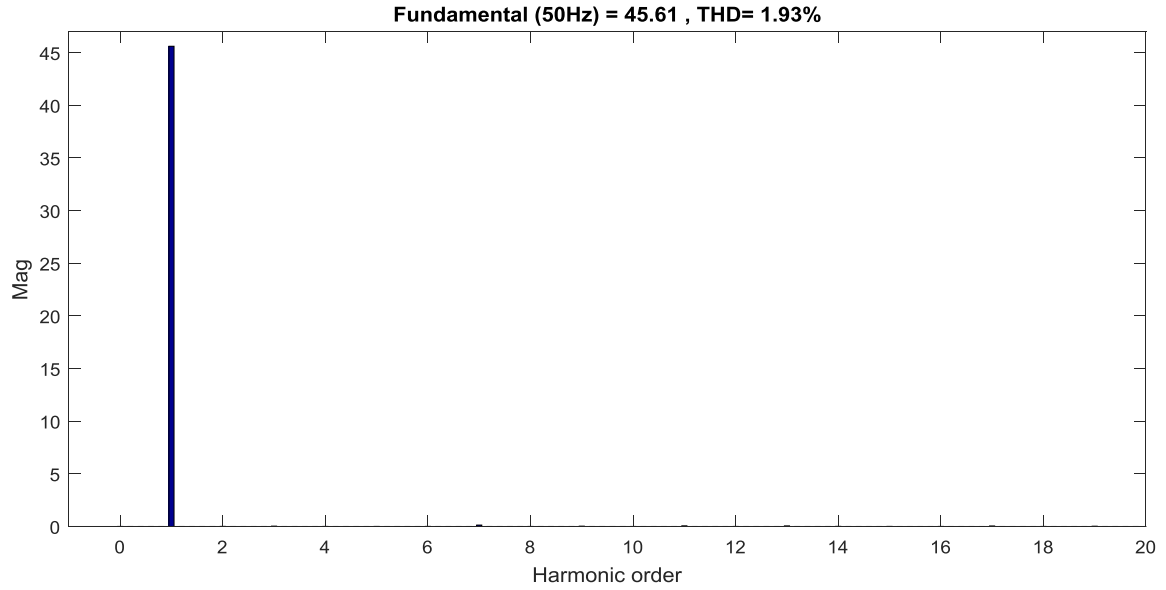
(a) Yük1 devrede iken akımın THB'si (ARGT etkin değil)



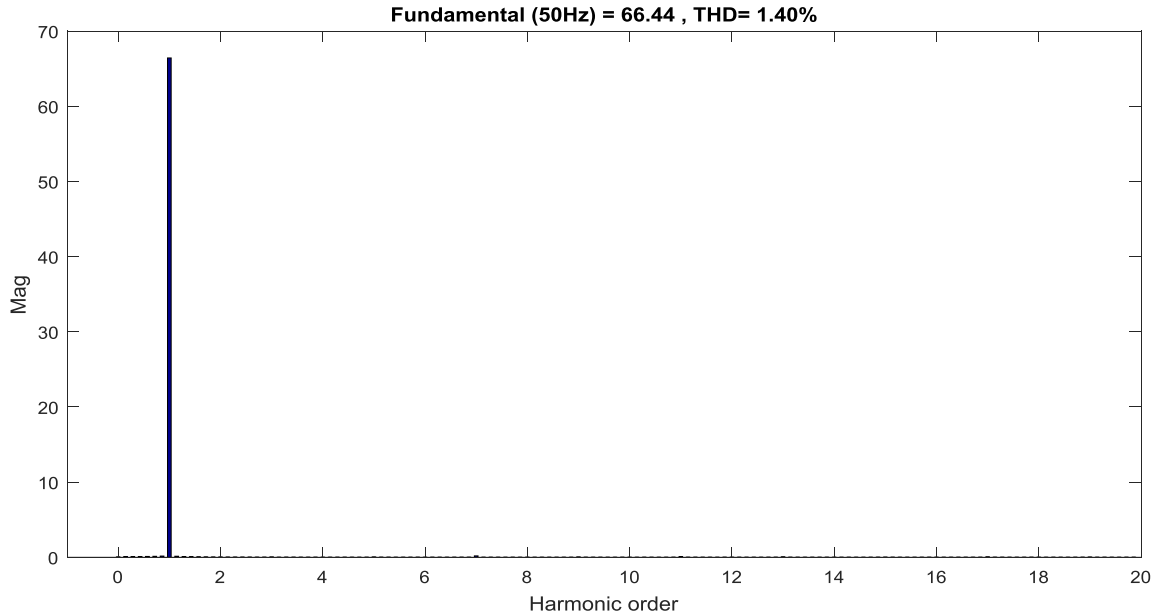
(b) Yük1 ve Yük2 devrede iken akımın THB'si (ARGT etkin değil)

Şekil 3.18. Yük1 ve Yük2 akımlarının THB'leri (ARGT etkin değil)

Şekil 3.19 (a) ve (b)'de PAGF etkinken sırasıyla, sadece Yük1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şebeke akımının %THB'si sadece Yük1 devrede iken %1,93'e, her iki yük devrede iken ise % 1,40'a düşmüştür. SRÇY yöntemi ile şebeke akımının %THB değerinin, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin altında olduğu görülmektedir.



(a) Yük1 akımının THB'si (ARGT)



(b) Her iki yük akımının THB'si (ARGT)

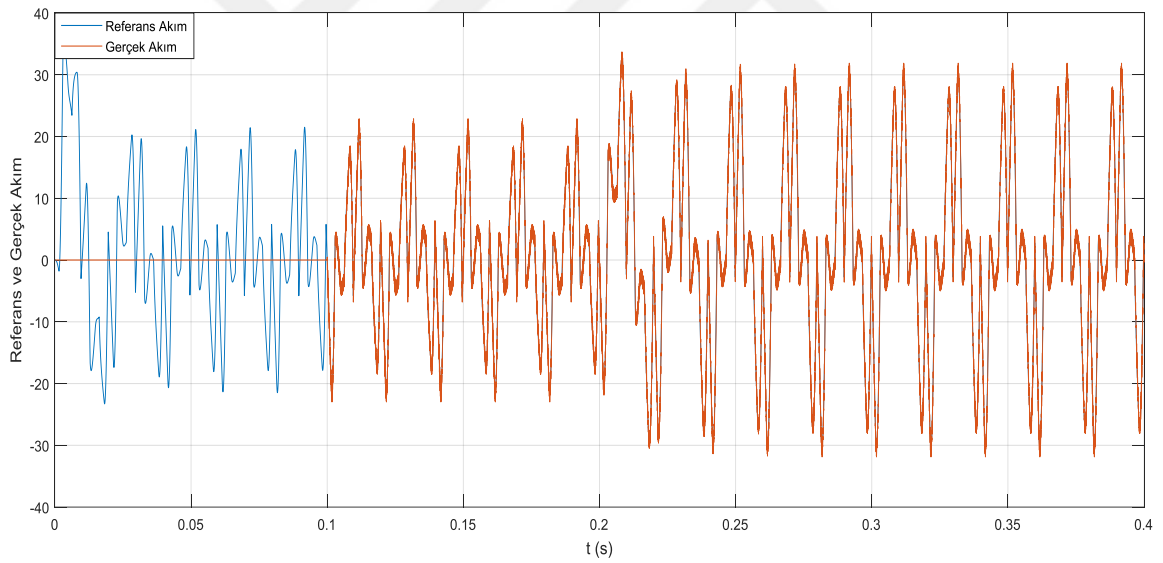
Şekil 3.19.ARGT yöntemini kullanan PAGF devrede iken kaynak akımına ait THB'ler

Tablo 3.2 referans işaret çıkarmak için kullanılan ARGV yönteminin harmonik bastırma verilerini göstermektedir. ARGV yönteminin, harmonik içeriği IEEE standartlarının önerdiği %5 değerinin altına indirdiği bu tablodan görülmektedir.

Tablo 3.2. ARGV Yöntemine Ait Harmonik Verileri

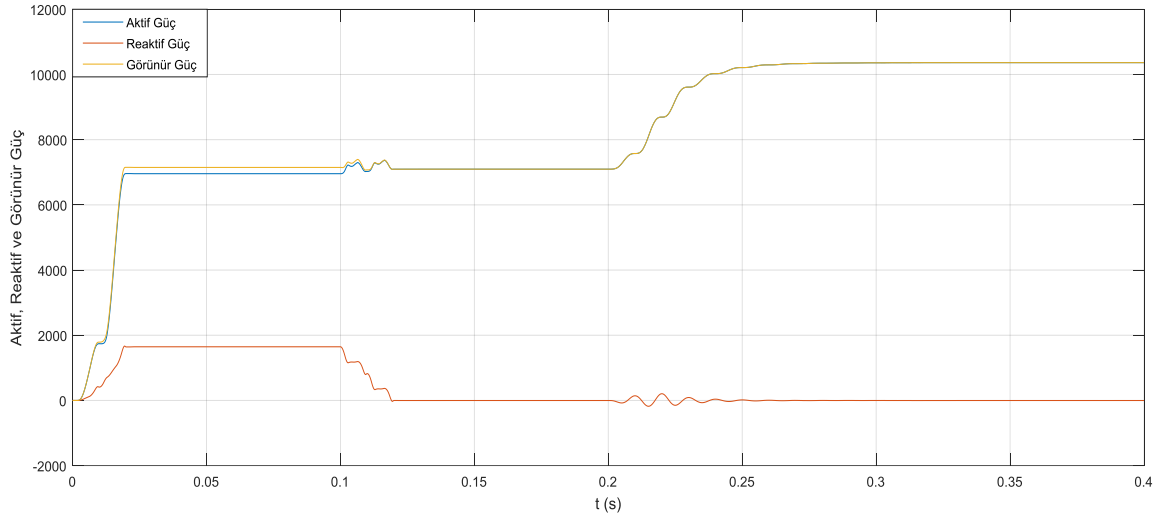
Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
ARGV	Yük1	21,64	1,93
	Yük1 ve Yük2	18,49	1,40

Şekil 3.20'de ARGV'nin referans işaretleri izleme başarısı gösterilmiştir. $t=0,10$ s anında ARGV yöntemini kullanan PAGF devreye girmiş ve mevcut referans akımları istenen şekilde yakalayarak izlemeye başlamıştır. $t=0,2$ s anında, ikinci yükün devreye girmesiyle değişen referans akımları da yüksek doğrulukla izlemiştir.



Şekil 3.20. Benzetim süresi boyunca gerçek ve referans akımların değişimi (ARGV)

Şekil 3.21'de aktif, reaktif ve görünür güçlerin benzetim süresi boyunca değişimleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0,1'inci saniyede ARGV yöntemini kullanan PAGF'nin devreye girmesiyle reaktif güç sıfıra doğru çekilmiştir.



Şekil 3.21. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (ARGT)

3.3.3. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi

SRÇY’nde, ölçülen 3 fazlı yük akımları d-q dönen referans yapıya çevrilirler. Bu yüzden bu yönteme d-q kontrol yöntemi de denilmektedir. Senkron referans yapıda, 3 fazlı AA gerilimle senkronize şekilde ve sabit hızla dönen referans yapı oluşturulur. Referans yapıyı oluşturmak için PLL sistemleri kullanılır. Böylece d-q eksenlerindeki bileşenlerin AA ve DA bileşenleri vardır. Akımların ana bileşenleri d-q eksenlerindeki DA bileşenlere karşılık gelmektedir. AA bileşenler ise akımların harmonik bileşenlerine karşılık gelir. Bu bileşenler alçak geçiren veya yüksek geçiren filtreler yardımıyla bulunur. Filtre çıkışlarından elde edilen d-q-eksen bileşenleri üç-fazlı büyüklüklere dönüştürülerek referans akımlar elde edilir. Bu kontrolde kaynak gerilim bilgisine gerek yoktur ancak faz açısı bilgileri elde edilmelidir. Senkron referans yapı tabanlı kontrolün avantajı gerilim harmoniklerinden ve dengesizliklerinden etkilenmemesidir (Mutlu, 2011).

Bu kontrolde kaynak gerilim bilgisine gerek yoktur ancak faz açısı bilgileri elde edilmelidir. SRÇY tabanlı kontrolün avantajı gerilim harmoniklerinden ve dengesizliklerinden etkilenmemesidir (Rejil vd., 2013).

3-fazlı sinüzoidal kaynakla beslenen doğrusal olmayan yük durumunda, yükün çektiği akımlar denklem (3.25)’de gösterilmiştir.

$$\dot{i}_y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (3.25)$$

Ölçülen üç fazlı yük akımları denklem (3.26)' da gösterilen Clarke dönüşümü ile iki fazlı α - β bileşenlerine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Akımlar denklem (3.26) kullanılarak denklem (3.27) ve denklem (3.28)' deki α - β referans yapıya çevrilir.

$$i_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\sqrt{3}} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) [1 - \cos(n120^\circ)] \quad (3.27)$$

$$i_\beta = \sum_{n=1}^{\infty} 2I_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \sin(n120^\circ) \quad (3.28)$$

α - β bileşenleri denk.(3.29)'da verilen Park dönüşüm matrisi ile şebeke hızına kilitlenmiş ve ω hızı ile dönen d-q eksen bileşenlerine dönüştürülür.

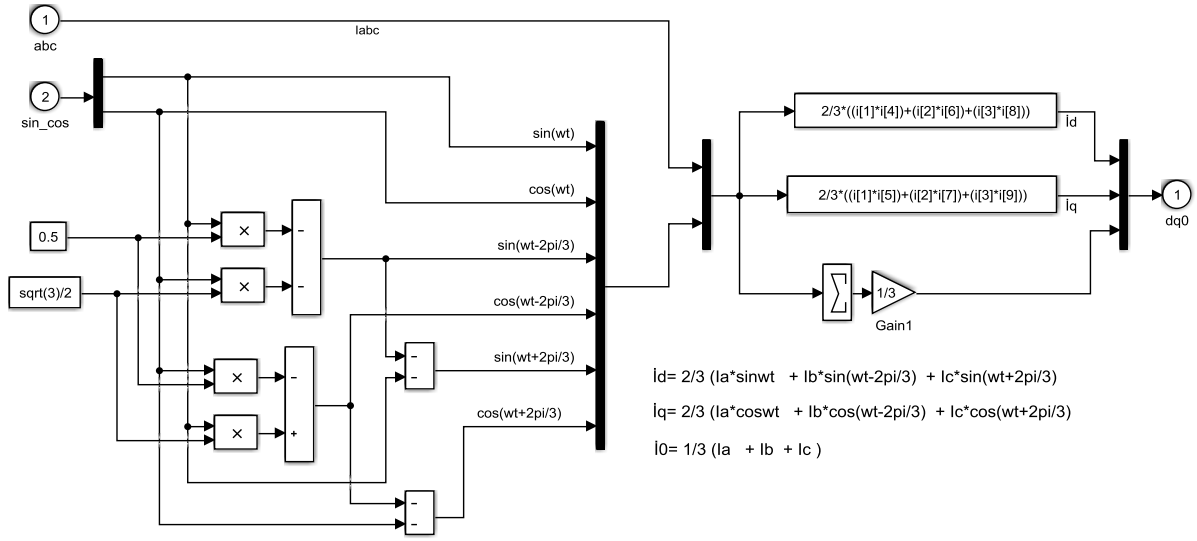
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Denklem (3.29) da verilen matris açılıp yeniden düzenlenirse denklem (3.30) ve denklem (3.31) elde edilir. Doğrusal olmayan yüklerde ise i_d ve i_q hem AA hem de DA bileşenlere sahip olduğu denklem (3.30) ve denklem (3.31)' de görülmektedir.

$$i_d = \sum_{n=1}^{\infty} I_1 \cos(\varphi_1) + I_n \cos[(n-1)\omega t \pm \varphi_n] \quad (3.30)$$

$$i_q = \sum_{n=1}^{\infty} \pm I_1 \sin(\varphi_1) + I_n \sin[(n-1)\omega t \pm \varphi_n] \quad (3.31)$$

Şekil 3.22'de gösterildiği gibi yukarıdaki denklemler kullanılarak i_d ve i_q akımlarını oluşturan Matlab/Simulink benzetim blok diyagramı elde edilmektedir.



Şekil 3.22. SRÇY kontrollü 3-fazlı 3-telli sistemde i_d ve i_q akımlarını oluşturan benzetim blok diyagramı

i_d ve i_q 'nun AA bileşenleri harmonik akımlara karşılık gelmektedir. DA bileşenleri ise aktif ve reaktif akımlara karşılık gelmektedir. i_d ve i_q 'un DA bileşenleri denklem (3.32) ve denklem (3.33) ile verilmektedir. Denklem (3.32) aktif akımı ve denklem (3.33) reaktif akımı göstermektedir.

$$i_d = I_1 \cos(\varphi_1) \quad (3.32)$$

$$i_q = \pm I_1 \sin(\varphi_1) \quad (3.33)$$

Burada sistemin dengeli üç fazlı üç telli olduğu düşünülürse i_0 sıfır olur. Bu şekilde yük akımının temel bileşeni DA işaretlere dönüşürken, harmonik bileşenler ise AA işaretlere dönüşür. Bu durum denklem (3.34)' te gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Burada i_d ve i_q 'nun AA bileşenleri akım harmoniklerini oluştururken, i_d 'nin DA kısmı aktif gücü, i_q 'nun ise DA kısmı reaktif akımı oluşturur (Amaç, 2003). Basit bir YGF ile DA kısmı i_d ve i_q 'dan kolaylıkla ayrılabilir.

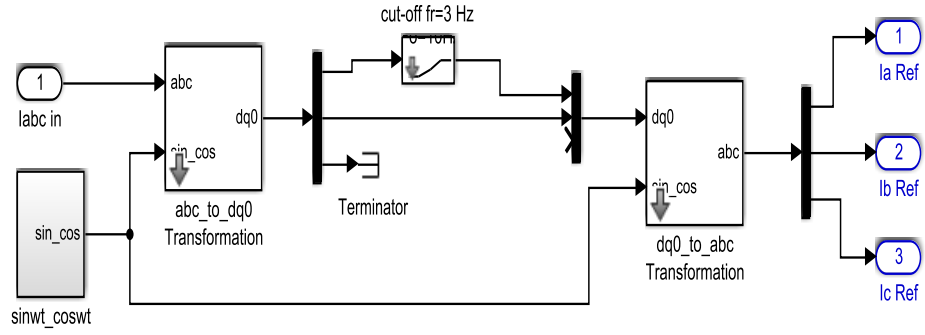
PAGF kullanarak sadece harmonik akım kompanzasyonu yapılacaksa senkron referans yapıda i_d ve i_q 'un AA bileşenleri kullanılarak referans akımlar hesaplanır. Sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılacaksa i_q 'un DA bileşeni kullanılarak referans akımlar hesaplanır. Hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılacaksa i_d ve i_q 'un AA bileşeni ve i_q 'un DA bileşeni kullanılarak referans akımlar hesaplanır. Harmonik bileşenleri oluşturan AA kısım ise denklem (3.35)' de gösterilen Ters Park dönüşümü ile önceki frekansına dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Sistem denklem (3.36)'daki gibi Ters Clarke dönüşümü kullanılarak a-b-c eksenine dönüştürülürse referans kompanzasyon akımları elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

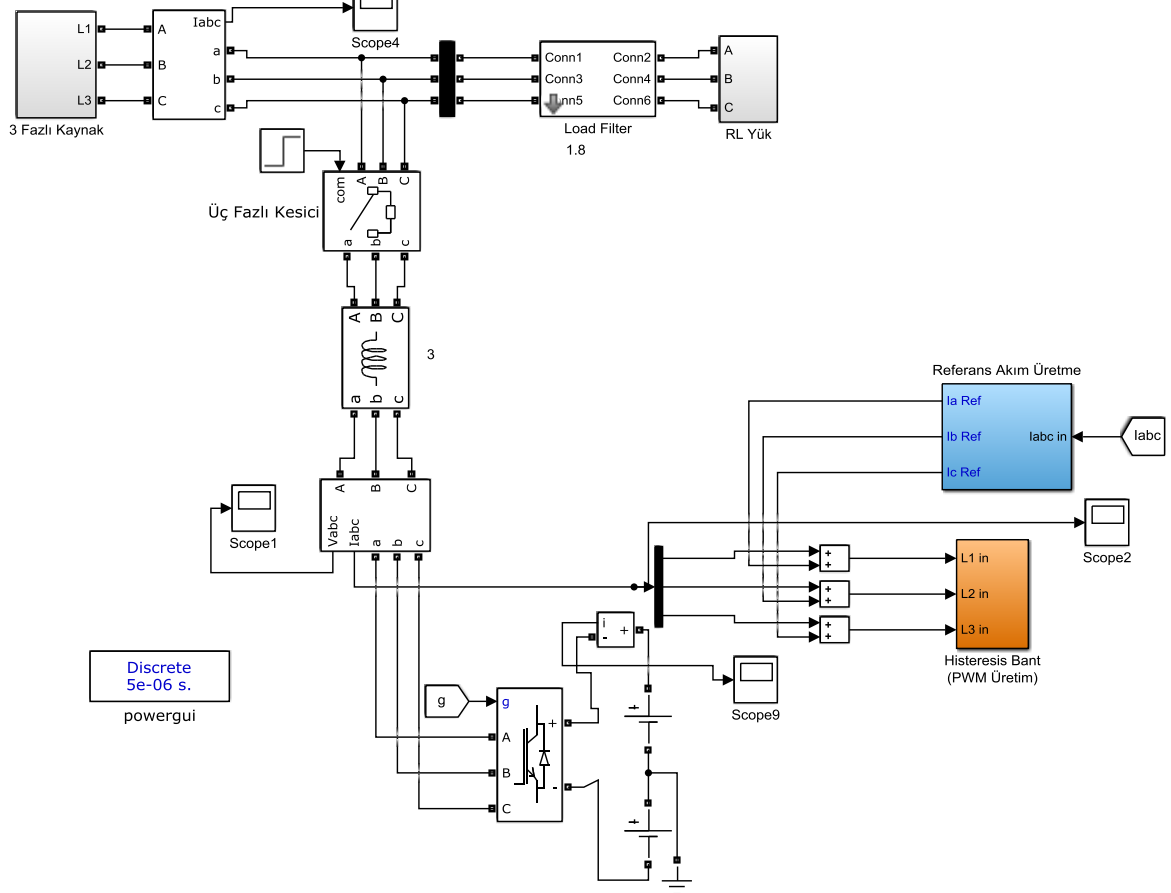
Şekil 3.23'de SRÇY yöntemini kullanarak referans kompanzasyon akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi bir YGF kullanılarak i_d 'nin AA bileşenleri yani harmonikli bileşenleri elde edilmektedir. i_q herhangi bir filtreden geçirilmeden olduğu gibi alınmaktadır. Çünkü i_q 'nun hem harmonikli bileşeni hem de reaktif kısmı sistemde istenmemektedir.



Şekil 3.23. SRÇY yöntemi ile elde edilen harmonikli akımların blok diyagramları

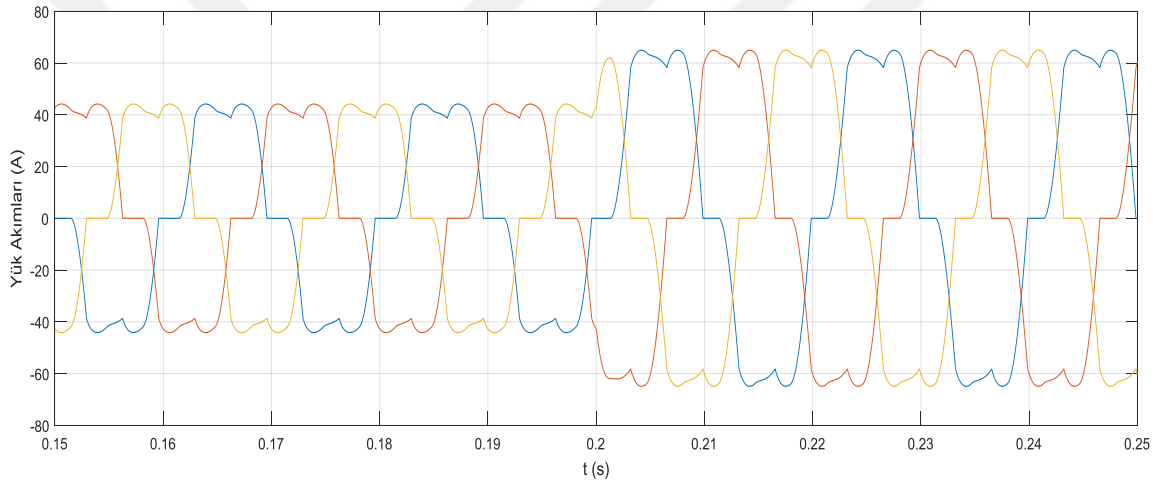
3.3.4. Senkron Referans Çatı Denetim Yöntemi İçin Simulink Benzetim Modeli

Şekil 3.24'te SRÇY yöntemini kullanan PAGF'nin Matlab/Simulinkte modellenmiş benzetim çalışması gösterilmiştir.

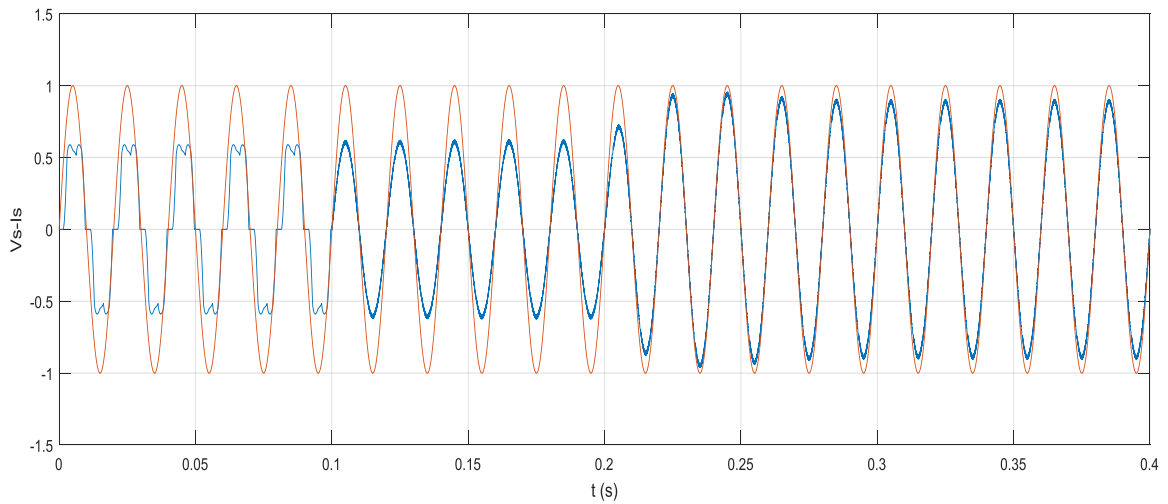


Şekil 3.24. SRÇY'yi kullanan PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli

Benzetim çalışmasındaki sistem; üç fazlı gerilim kaynağı, ayrı ayrı zamanlarda devreye giren iki farklı yük, gerilim kaynaklı evirici, bağlantı endüktansları ve kontrol bloklarından oluşmaktadır. Birinci yük hemen devreye girmekte ve $10\ \Omega$, 1 mH değerinde bir RL yüküdür. İkinci yük 20 ms 'de devreye girmekte ve $15\ \Omega$, 3 mH değerindedir. İkinci yükün devreye alınmasının nedeni farklı yük koşullarında PAGF'nin performansını ölçmektir. Doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın üç fazına ait dalga şekli Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Şekil 3.26'da ilk yük devrede iken ve 0,2'inci s'de ikinci yükün de devreye alındığı durumlara ait, yük akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz ilişkisi, birim değer cinsinden gösterilmiştir. Buradaki faz kayması, yüklerin şebekeden harmonikli akım çekmelerinin yanında reaktif güç de çektiklerini vurgulamaktadır.

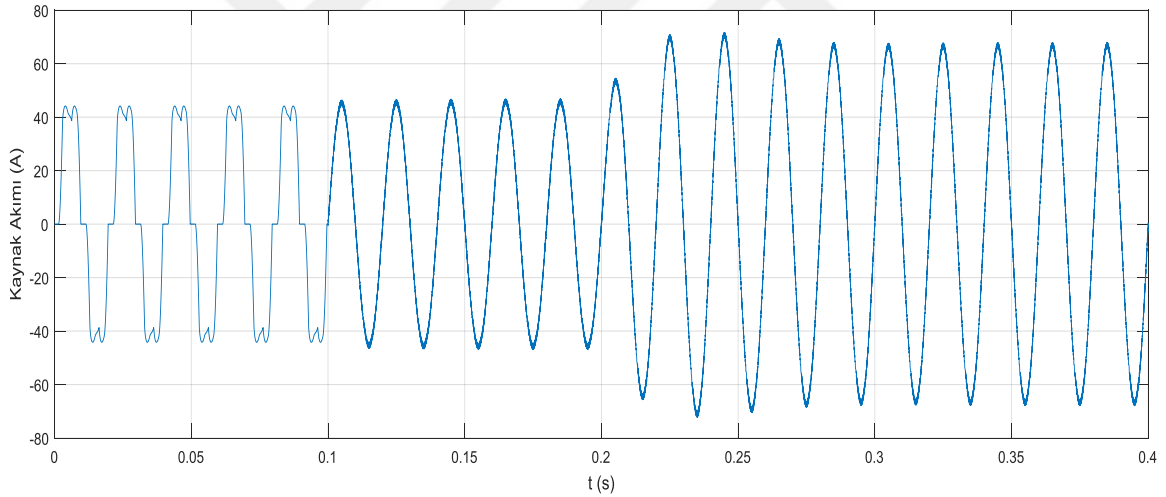


Şekil 3.25. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (SRÇY)

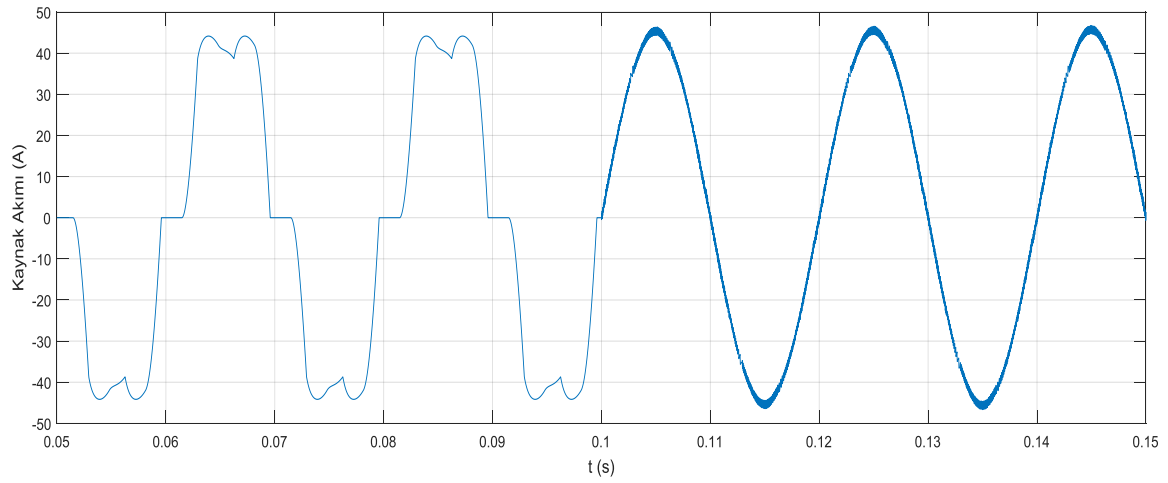


Şekil 3.26. Her iki yük devrede iken kaynak gerilimi ve akımının değişimi (SRÇY)

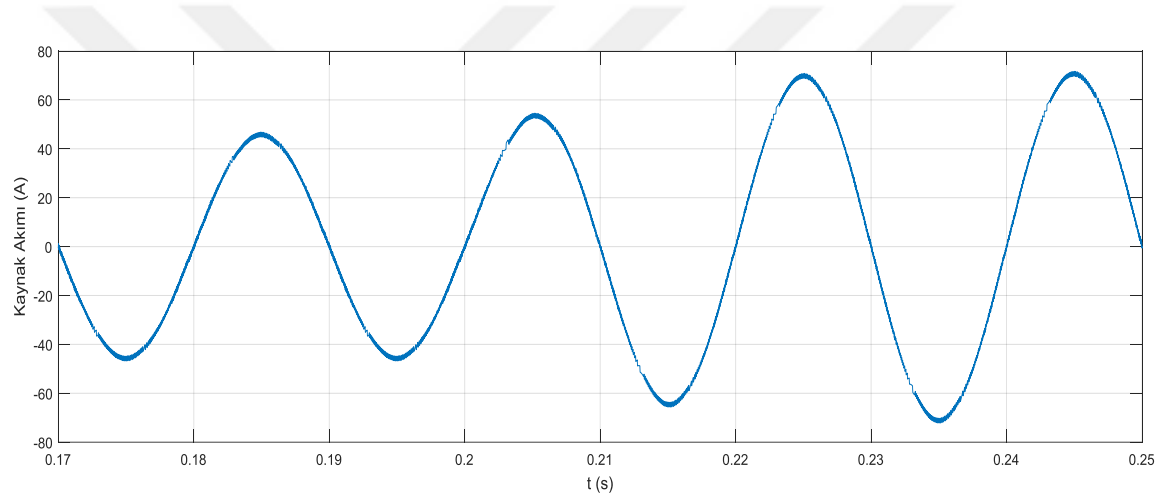
Şekil 3.27’de birim değer (p.u) cinsinden kaynak akımının dalga şekli, PAGF öncesi ve sonrası için gösterilmiştir. Şekilde, 0,10’inci saniyede PAGF devreye girdiği ve 0,2’inci saniyede Yük 2 devreye girdiği durumları göstermektedir. Bu çalışma şartları için sonucun daha iyi incelenebilmesi için Şekil 3.27 (a)’ da benzetim süresi boyunca, Şekil 3.27 (b) ve 3.27 (c)’de detay gösterim olarak ayrıca verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi, SRÇY yöntemini kullanan 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. 0,2’inci saniyede ikinci yükün devreye girmesiyle kaynaktan çekilen akım bir miktar arttığı Şekil 3.25 c’de gösterilmiştir. SRÇY kullanan PAGF her iki yük devrede iken yine harmonik filtreleme görevini başarıyla yerine getirmiştir.



(a) (0-0,1) s Yük1 devrede, 0,1 s sonra PAGF etkin, 0,2 s sonra Yük2 de devrede (SRÇY)



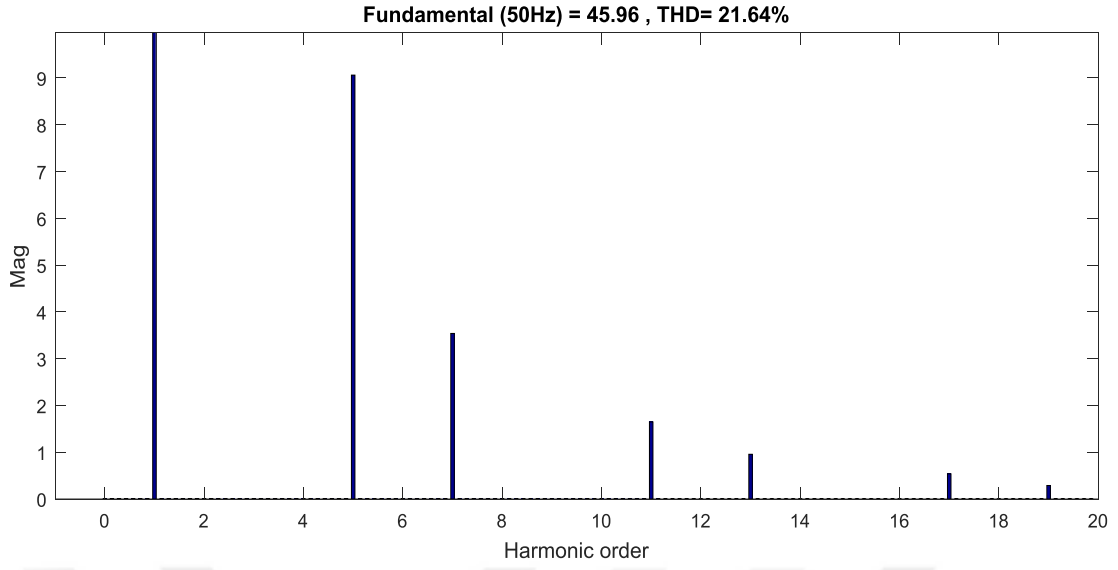
(b) (0-0,1) s Y k1 devrede ve 0,1 s'den itibaren PAGF etkin (SRÇY)



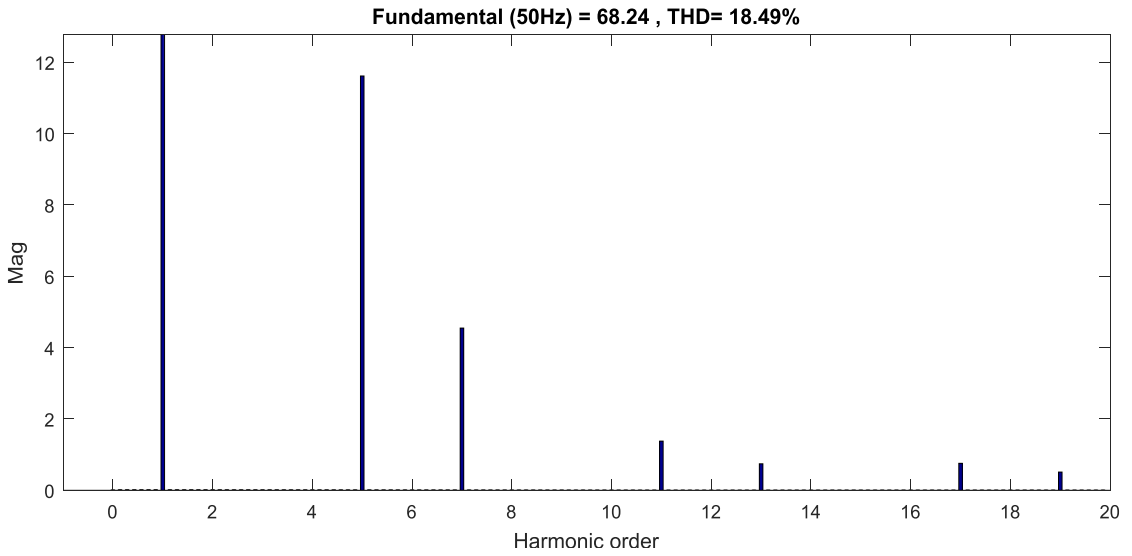
(c) (0-0,2) s Y k1 ve PAGF devrede, 0,2 s sonra Y k2 de devrede (SRÇY)

Şekil 3.27. Kaynak akımlarının değişimi (SRÇY)

Şekil 3.28 (a) ve (b) sırasıyla, Yük 1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için yük akımının THB'sini yüzde olarak göstermektedir. THB'nin, birinci y k devrede iken %21,64 ve iki yük birlikte devrede iken ise %18,49 olduğu görülmektedir.



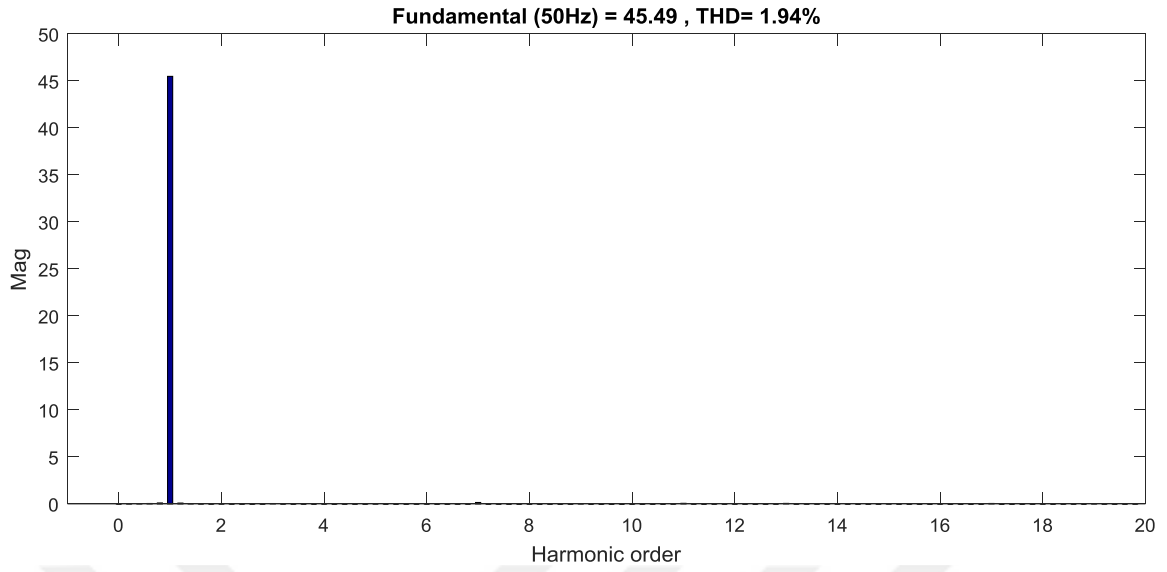
a) Yük 1 devrede iken akımın THB'si (SRÇY etkin değil)



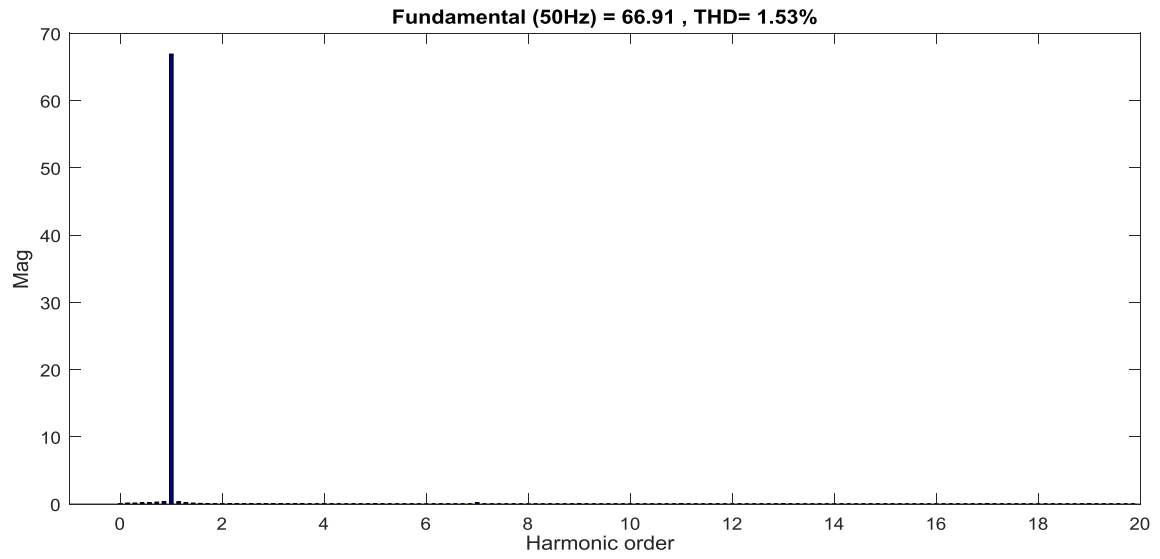
b) Yk 1 ve Yük 2 devrede iken akımın THB'si (SRÇY etkin değil)

Şekil 3.28. Yk1-2 akımlarının THB'leri (SRÇY etkin değil)

Şekil 3.29 (a) ve (b)'de PAGF etkin iken sırasıyla, sadece Yk1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için Şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şebeke akımının %THB'si sadece Yk1 devrede iken %1,94'e, her iki yük devrede iken ise % 1,53'e düşmüştür.



a) Yk1 akımının THB'si (SRÇY)



b) Her iki yük akımının THB'si (SRÇY)

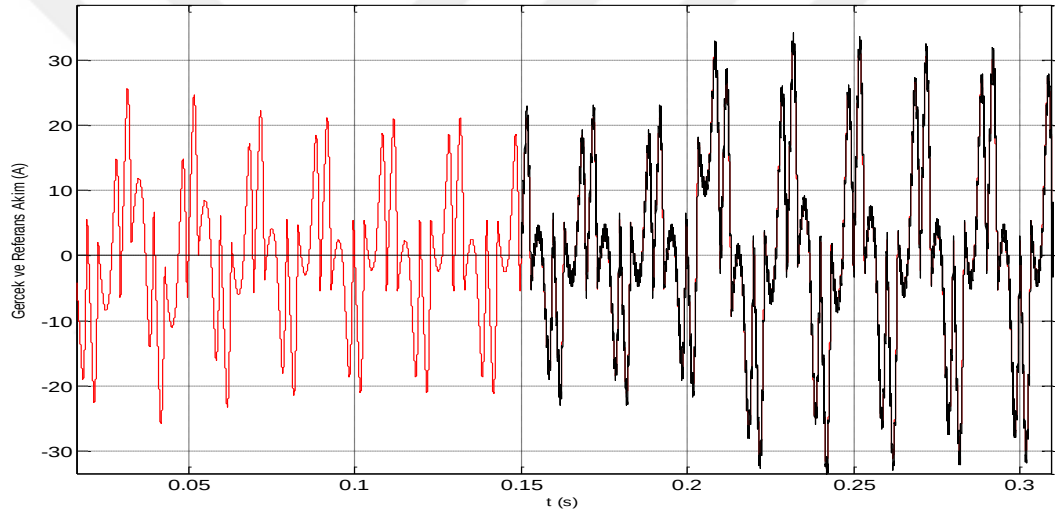
Şekil 3.29. Kaynak akımlarına ait THB'ler (SRÇY)

Tablo 3.3 bize referans işaret çıkarmak için kullanılan SRÇY yöntemin harmonik bastırma verilerini göstermektedir. Tablo incelendiğinde kullanılan yöntemin sistem harmonik içeriğini IEEE standartlarının önerdiği %5 değerinin altına indirdiği görülmektedir.

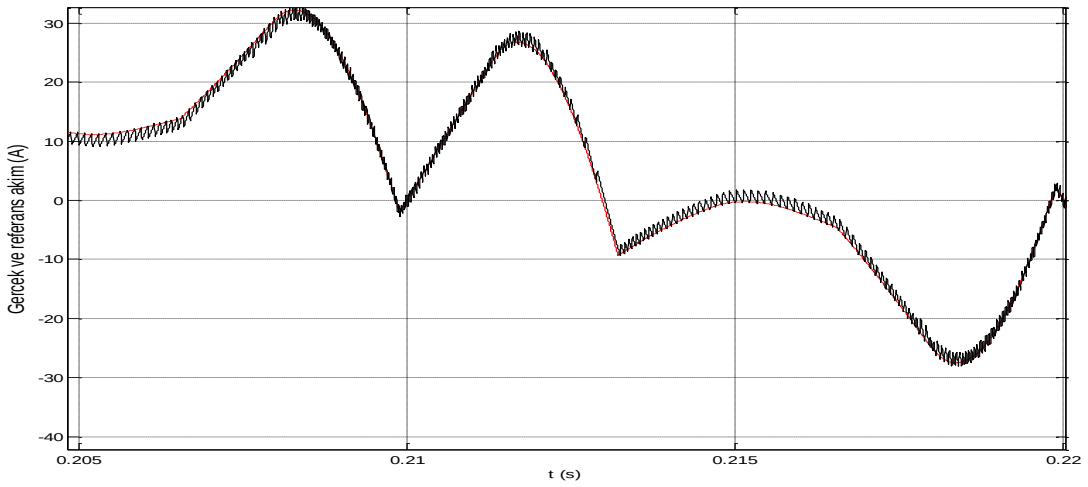
Tablo 3.3. SRÇY Yöntemine Ait Harmonik Verileri

Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
SRÇY	Yük1	21,64	1,94
	Yük1 ve Yük2	18,49	1,53

Şekil 3.30 a ve b'de SRÇY'nin referans işaretleri izleme başarısı gösterilmiştir. $t=0.10$ s anında PAGF devreye girmiş ve mevcut referans akımları istenen şekilde yakalayarak izlemeye başlamıştır. $t=0,2$ s anında, ikinci yükün devreye girmesiyle değişen referans akımları da yüksek doğrulukla izlemiştir.



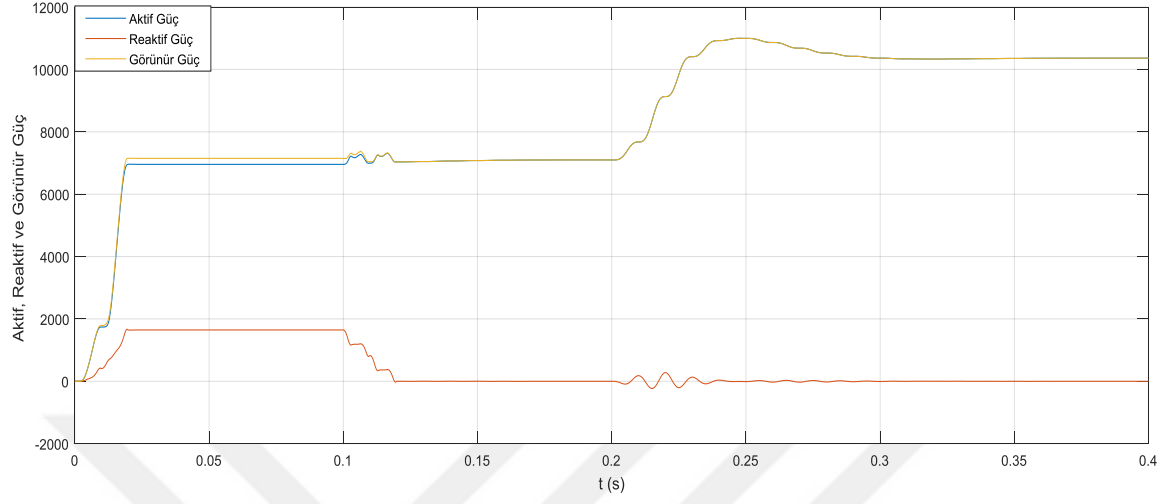
a) Benzetim süresi boyunca gerçek ve referans akım (SRÇY)



b) Detaylı gösterim (SRÇY)

Şekil 3.30. PAGF'nin referans izleme başarısı (SRÇY)

Şekil 3.31’de gösterildiği gibi 0,1’inci saniyede PAGF’nin devreye girmesiyle reaktif güç sıfıra doğru çekilmiştir.

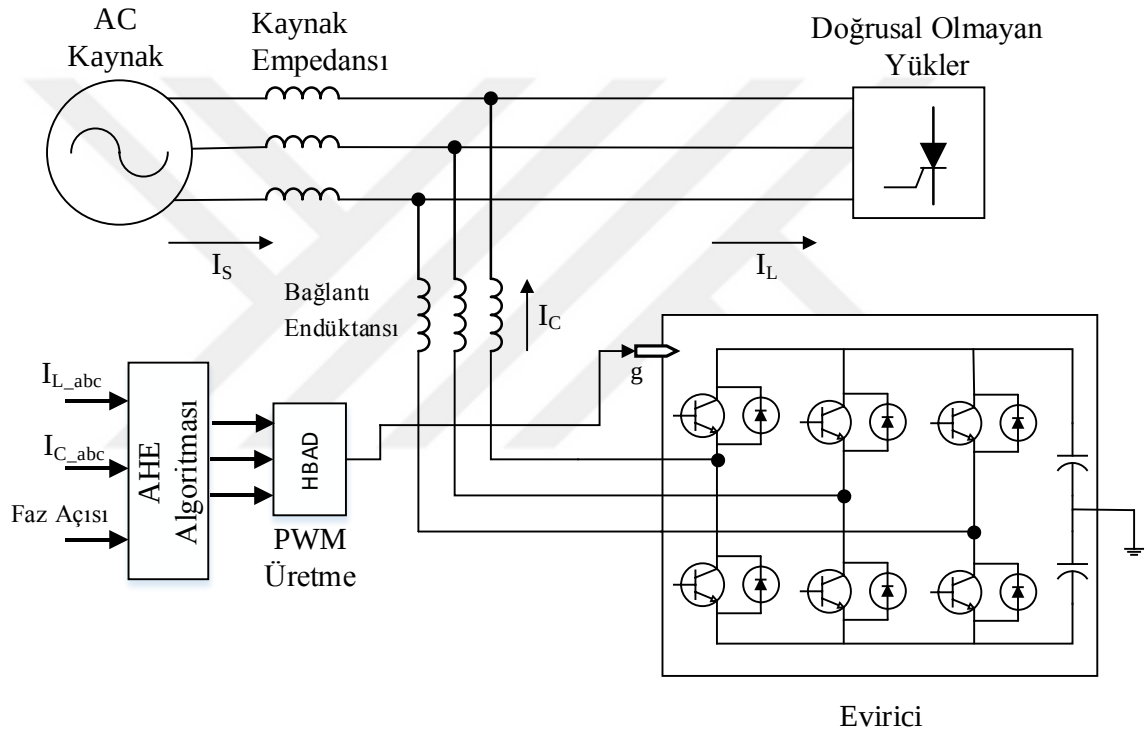


Şekil 3.31. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (SRÇY)

4. ADAPTİF HARMONİK ENJEKTE ALGORİTMA TEMELLİ PAGF DENETİM SİSTEMİ

4.1. Giriş

PAGF'nin en önemli iki aşamasından ilki harmonikli akımların tespiti için referans akım çıkartma yöntemi diğeri ise referans akıma göre evirici anahtarlama işaretlerinin üretilmesidir. Şekil 4.1'de AHE algoritmali PAGF denetim sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. AHE algoritmali PAGF denetim sistemi

Bu tez çalışmasında referans akımı tespit etmek için en küçük kareler yöntemi temelli Adaptif Harmonik Enjekte algoritması kullanılmıştır. AHE algoritmasının amacı enjekte edilecek harmoniklerin uygun genlik ve faz değerlerini, çevrimiçi ve anlık olarak doğru tahmin etmektir. Bu amaçla herhangi bir harmonik için açının sinüs ve kosinüsü uygun değerlerle çarpılarak istenilen genlik ve fazda bir harmonik değeri elde edilmektedir. Elde edilen harmonikli akımların sisteme ters fazda enjekte edilmesi için evirici anahtar işaretlerinin üretilmesi gerekmekte olup, tetiklenme kapı işaretleri, akım denetleme yöntemleri yardımıyla elde edilmektedir (Karaman vd., 2018).

Bu bölümde AHE algoritması ve alt algoritmalar detaylı bir şekilde tanımlanmakta ve hem Histerisiz Bant Akım Denetleyici hem de AHE algoritmalı PAGF'nin Matlab/Simulink benzetim modeli verilmektedir. Kaynak gerilimi olarak 311 V, 60 Hz. tepe değerli bir gerilim, yük olarak ise iki adet RL yükü kullanılmaktadır. Birinci yük (Yük1) 10 Ω , 1 mH değerinde bir RL yükü olup hemen devreye girmekte iken ikinci yük (Yük2) 15 Ω , 3 mH değerinde olup 20 ms sonra devreye girmektedir.

4.2. Akım Harmonik Analizi ve Sınırlamalar

Şebekeden çekilen akımın dalga şekli sinüzoidal yapıdan uzaklaştıkça, güç kalitesi problemlerine ek olarak şebekeden reaktif güç çekilmesi ve harmoniklerin varlığı da ortaya çıkmaktadır.

Bir fazlı yüklerde baskın olan 3 ve 3'ün katı harmonikler görülürken üç fazlı yüklerde 5, 7 ve 11 gibi yüksek frekanslı harmonikler görülür. Güç sistemlerini ve cihazları harmoniklere karşı korumak için bazı sınırlamalar getirilmiştir. IEEE ve IEC tarafından deklare edilen bu sınırlandırmalar dünyanın pek çok ülkesinde harmonik standartlar olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.1'de IEC Std 1000-3-4 tarafından getirilen 16 A ve daha yukarı giriş akımına sahip üç fazlı ekipmanlar için harmonik sınırlamalar verilmiştir. IEC Std 1000-3-4 sadece bireysel ekipmanlar için değil aynı zaman da tüm sistem için sınırlandırmalar getirir. Bu standart, kısa devre oranı R_{SCC} 'yi de nazara verir (Key ve Lai, 1998).

Tablo 4.1. IEC Std 1000-3-4 harmonik sınırlamalar

En küçük kısa devre oranı (R_{SCC})	Harmonik bozulma için üst sınırlar		Bireysel harmonikler için Sınırlar (%)			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
66	17	22	12	10	9	6
120	18	29	15	12	12	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15

14.harmonik ve yukarısı için Kısmi Ağırlıklı Harmonik Bozulma (PWhD) tanımlanmıştır. Denklem 2.1'den PWhD eşitliği;

$$PWhD = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir. IEEE Std 519, ortak bağlanma noktasındaki akım ve gerilim harmoniklerine sınırlamalar getirir. Tablo 4.2'de IEEE Std 519-1992 tarafından akım harmonik sınırları verilmiştir. Bu standartların amacı güç sistemine bağlı alıcıları olumsuz etkileyen harmonik akımları belli sınırlar içinde tutmaktır. Düşük kısa devre oranı SCR'ye sıkı sınırlamalar uygulanır. SCR; maksimum kısa devre akımı I_s ve ortalama maksimum aylık talep edilen yük akımı I_L olarak tanımlanır.

Tablo 4.2. IEEE Std 519-1992 akım harmonik sınırları

$SCR = I_s / I_L$	H<11	11-16	17-22	23-34	35<	THD
<20	4	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7,0	6	2,5	1,4	20

Elektrik şebekelerindeki harmonikler genellikle periyodiktir. Bu yüzden doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu akım harmonikleri bastırmanın en etkili yöntemlerden birisi de en uygun akım harmoniklerinin şebekeye enjekte edilmesidir. Elektrik şebekelerine bağlanan doğrusal olmayan bir fazlı yüklerin farklı çalışma koşullarında 3 ve 3'ün katları harmonikler üretir. Üç fazlı doğrusal olmayan yükler 5, 7 ve 11 gibi yüksek frekanslı harmonikler üretir (15). Bu 3, 5, 7, 11. Harmonikleri uygunluk faz ve genlikle şebekeye enjekte ederek harmonikler bastırılabilir. Enjekte edilecek harmoniğin genlik ve fazı;

$$i_h = i_m \sin(h\omega t + \varphi) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada h harmonik derecesini, i_m harmonikli akımın genliğini, φ harmoniğin fazını ve ω açısal frekansı göstermektedir. Örneğin 1.harmonik için;

$$i_m \sin(h \omega t + \varphi) = i_m [\sin(h \omega t) \cos(\varphi) + \sin(\varphi) \cos(h \omega t)] \quad (4.3)$$

yazılabilir. Denklem (4.3) ifadesinde, sabit harmonikli akımın genlik ve fazı için $i_m \cos(\varphi) = w_1$ ve $i_m \sin(\varphi) = w_2$ yazılacak olursa h. harmonik için;

$$i_m \sin(h \omega t + \varphi) = w_1 \sin(h. \omega t) + w_2 \cos(h. \omega t) \quad (4.4)$$

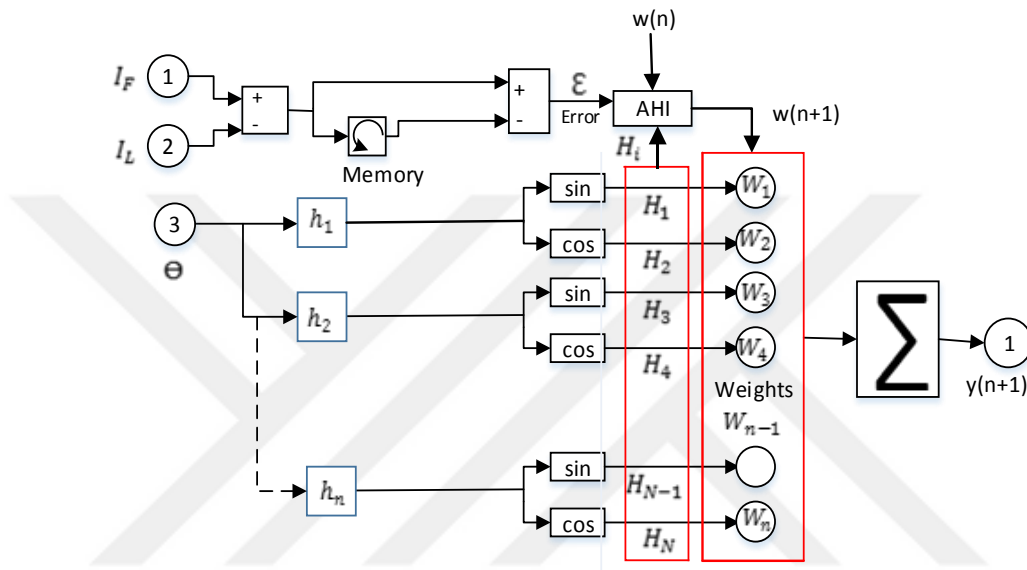
elde edilir. Görüldüğü gibi herhangi bir harmonik için açının sinüs ve kosinüsü uygun değerlerle çarpılırsa istenilen genlik ve fazda bir harmonik değeri elde edilebilir. Uygun değerler ağırlık olarak isimlendirilip w ile gösterilir ve ağırlıkların belirlenmesinde Adaptif Harmonik Enjekte (AHE) algoritması kullanılır (Karaman vd.,2018).

4.3. AHE Algoritması

AHE algoritması doğrusal olarak çalışan birçok alt algoritmaların birleşiminden oluşmuş özel bir amaç için geliştirilmiş yeni ve özgün bir algoritmadır. Başlangıçta bilgisayarların görme problemi, çeşitli görüntü işleme analizlerinde ve kablosuz haberleşme uygulamalarında başarı ile uygulanmış bir algoritma çeşididir. AHE algoritması birden fazla alt algoritmadan veya girişten gelen verilerin birleştirilmesi esasına dayanır. Veri değerleri, çevrimiçi olarak alt algoritmaları tanımlayan dış büyük kümeler üzerine izdüşümler yapmaya dayalı bir aktif birleştirme yöntemi ile güncellenen ağırlıklar kullanılarak doğrusal olarak birleştirilir (Erken vd., 2015).

Harmonik dalgalanmaları genellikle periyodiktir. Bu nedenle uygulanan yöntem, harmonikleri azaltmak amacıyla, sisteme ait istenilen bir büyüklüğe harmonik enjekte edilmesi esasına dayanır. Enjekte edilecek harmoniklerin uygun genlik ve faz değerleri, çevrimiçi olarak her an doğru olarak tahmin edilmektedir. Herhangi bir harmonik için açının sinüs ve kosinüsü uygun değerlerle çarpılırsa istenilen genlik ve fazda bir harmonik değeri elde edilebilir. Uygun değerler ağırlık olarak isimlendirilir ve ağırlıkların belirlenmesinde Adaptif Harmonik Enjekte (AHE) algoritması kullanılır. AHE algoritması sürekli çevrimiçi güncellenen ağırlıkları birleştirir. Bu yöntemde çalışan alt algoritma ve değerler vasıtası ile büyüklüğe ait muhtemel harmonik dereceleri önceden belirlenir ve her bir harmonik derecesinin sinüs ve kosinüs değerleri ağırlıklara çarpılarak o büyüklüğe eklenir. Şekil 4.2' de görüldüğü gibi hata terimini elde etmek için yük akımı ile filtre akımı farkı alınır. Elde edilen fark değerinin o andaki değerinden bir önceki değeri çıkarılarak hata terimi elde edilmektedir. Hata terimi direkt kullanılmaz. Ama herhangi bir zamanda AHE algoritması harmonik bileşenin ağırlığını güncelleme (artırıp azaltma) işlemini hata

terimine bakarak yapar. Bu yöntemde alt girişlerden gelen verilerin ağırlıkları çevrimiçi olarak her an güncellenmektedir. Alt girişlerden gelen veriler, ortalama değeri sıfır olan veriler olmalıdır. Yine AHE algoritmasında herhangi bir zamandaki harmonikli bileşenler, faz açısı θ 'ya göre çeşitlenirler. Böylece harmonikleri minimize etmek için harmonikli büyüklüklerin genlik ve fazı tahmin edilerek, sistem kontrolünde bu tahmin değeri kullanılır.



Şekil 4.2. Adaptif harmonik enjekte algoritması uygulama blok şeması

4.4. Alt Verileri Birleştirme Algoritması

Bileşik algoritmanın N tane alt girişten (harmonikten); $H_1, H_2, \dots, H_N$ oluştuğunu varsayalım. n zaman adımında her alt giriş, örnek bir x girdisi için, sıfır ortalamalı bir giriş değeri ($H(x, n) \in \mathbb{R}$) oluşturur. $H(x, n) = [H_1(x, n) \dots H_N(x, n)]^T$ ifadesini, x girdisi için, alt girişlerin n zaman adımındaki değerinin vektörü ve $w(x, n) = [w_1(x, n) \dots w_M(x, n)]^T$ 'i de o andaki ağırlık vektörü olarak tanımlayalım. Olması gereken $y(x, n)$ değerinin tahminini denklem (4.5)'daki gibi tanımlayabiliriz.

$$\hat{y}(x, n) = H^T(x, n)w(n) = \sum_i w_i(n)H_i(x, n) \quad (4.5)$$

olması gereken değer $y(x, n)$ ile tahmin edilen $\hat{y}(x, n)$ değeri arasındaki fark, sistem tarafından yapılan hata; $e(x, n) = y(x, n) - \hat{y}(x, n)$ olarak tanımlanır. Ağırlık vektör değerleri, ortalama karesel hata (OKH), değerinin minimize edilmesi ile güncellenir.

$$\min_{w_i} E[y(x, n) - \hat{y}(x, n)]^2, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

Burada E beklenti operatörüdür. İfadenin ağırlığa göre türevi alınacak olursa;

$$\frac{\partial E}{\partial w} = -2E[(y(x, n) - \hat{y}(x, n))H_i(x, n)] = -2E(e(x, n)H_i(x, n)) \quad i = 1, \dots, N \quad (4.7)$$

ve ifade sıfıra eşitlenecek olursa;

$$-2E(e(x, n)H_i(x, n)) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.8)$$

N adet denklem dizisi elde edilir. Bu denklem dizisinin çözümüne Wiener Çözümü denir. Ancak denk.(4.7)'deki gradyan, denk.(4.8)'i minimize etmek amacıyla yinelemeli bir çözüm elde etmek için en dik iniş algoritması adı verilen bir tür optimizasyon algoritması içinde kullanılarak,

$$w(n+1) = w(n) + \lambda E[e(x, n)H_i(x, n)] \quad i = 1, \dots, N \quad (4.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada λ adım boyudur. Algoritmada denk.(4.9)'daki büyüklüklerin kullanılması yerine daha kolay hesaplanan anlık değerlerin kullanılması daha uygun olduğundan, ifadedeki beklenti değerleri anlık değerler ile değiştirilebilir.

$$w(n+1) = w(n) + \lambda e(x, n)H_i(x, n) \quad (4.10)$$

Denk. (4.10)'deki adım boyutu λ 'nın yerine denklem (4.11) yazılabilir;

$$\frac{\mu}{\|Hx, n\|^2} \quad (4.11)$$

Normalize edilmiş En Küçük Kareler (EKK) yönteminde olduğu gibi denklem (4.12) ile ifade edilebilir;

$$w(n+1) = w(n) + \mu \frac{e(x, n)}{\|H(x, n)\|^2} H(x, n) \quad (4.12)$$

Harmoniklerin ağırlıkları denk.(4.12)'e göre kolayca ve hızlı bir şekilde güncellenir. Burada μ güncelleme parametresidir ve normalize edilmiş EKK algoritması $0 < \mu < 2$ olması halinde Wiener çözümüne yakınsar.

4.5. Algoritmanın Yakınsaması

Algoritmanın yakınsaması, OKH yüzeyine göre analiz edilebilir;

$$E[e^2(x, n)] = P_y(x, n) - 2w^T p - w^T R w \quad (4.13)$$

Burada $y(x, n)$ ve $H(x, n)$ 'in geniş anlamda durağan rasgele işlemler olması varsayımıyla $P_y = E[y^2(x, n)]$, $p = E[y(x, n)H(x, n)]$, ve $R = E[H(x, n)H^T(x, n)]$ yazılabilir. OKH yüzeyi ağırlık vektörü w 'nin bir fonksiyonudur. $E[e^2(x, n)]$ fonksiyonu, ikinci dereceden bir fonksiyon olduğundan tek bir küresel minimumu olup, hiçbir yerel minimumu yoktur. Bu nedenle Denk.(4.9) ve (4.10)'daki en dik iniş algoritması, Denk.(4.14)'de λ 'nın aşağıdaki şartı sağlaması koşuluyla Wiener çözümüne yakınsamasını garanti eder.

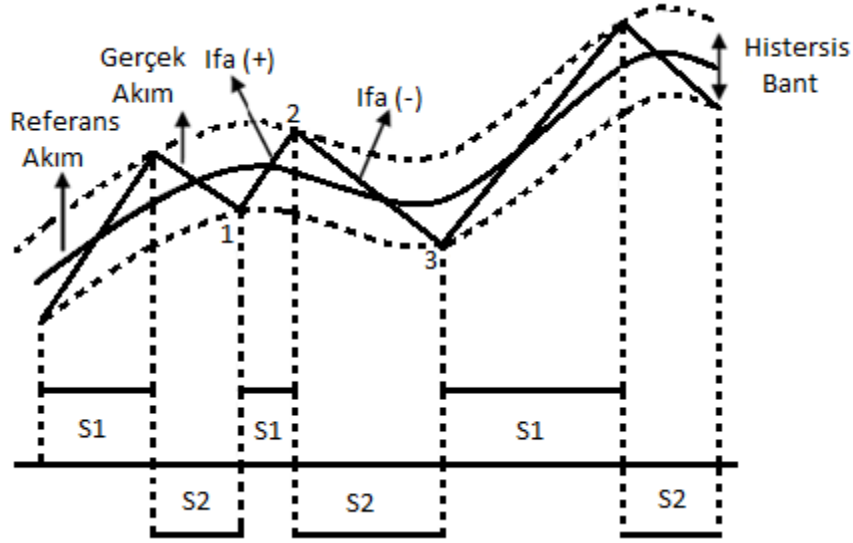
$$0 < \lambda < \frac{1}{\alpha_{max}} \quad (4.14)$$

Burada α_{max} , R 'nin en büyük özdeğeridir. Aynı şekilde Denk.(4.12)'deki güncelleme parametresi $0 < \mu < 2$ olması halinde Wiener çözümüne yakınsar.

4.6. Evirici Anahtarlarının Elde Edilmesi

Çıkarılan referans akıma göre evirici anahtarlama sinyalleri Histerisiz Bant Akım Denetleyici (HBAD) ile üretilmiştir. HBAD gerilim beslemeli invertöre sahip aktif güç filtrelerinin tüm uygulamalarında etkin bir kapı işaretleri üretme tekniği olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca bu teknik istikrarlı, hızlı ve doğruluk oranı iyi olan bir tekniktir (Suresh vd., 2012; Lam vd.,2012). Referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımının bir histerezis bantta karşılaştırılarak anahtarlama sinyallerinin üretildiği kontrol tekniğidir. Bu çalışmada eviricinin anahtarlarını sürmek için kapı işaretleri, HBAD kullanılarak elde edilmiştir. Doğrusal olmayan bir akım denetim yöntemi olan HBAD, eviricinin çıkış akımının belirli bir bant aralığında kalmasını sağlar. Evirici çıkışındaki akımı denetlemek için çıkış akımlarıyla referans akımlar karşılaştırılır. Elde edilen hata sinyalleri histerezis denetleyicilere uygulanarak anahtarlama sinyalleri üretilir. Şekil 4.3'de görüleceği gibi hata sinyali histerezis bandın üst sınırına (2 no'lu sınır) ulaştığında S2 anahtarı iletime geçerek akımın düşmesini sağlar, hata sinyali histerezis bandın alt sınırına (3 no'lu sınır) ulaştığında ise S1 anahtarı iletime geçerek akımın artması sağlanır.

Bu çalışmada referans akımlar ile evirici çıkış akımları karşılaştırılır ve elde edilen hata işaretleri HBAD'ye giriş işareti olarak uygulanır. HBAD 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 HBAD kullanılarak toplam 6 adet kapı işareti üretilmiştir.



Şekil 4.3. Histerezis bant akım kontrol şeması

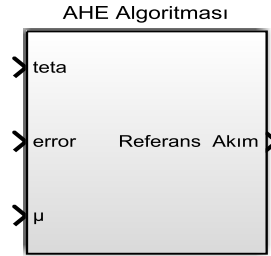
HBAD yapısında, seçilen bant aralığına göre anahtarlama frekansı değişkenlik göstermektedir. Bantın dar seçilmesi durumunda anahtarlama işaretlerinin sıklığı artmakta böylece eviricinin referans akımları daha iyi takip edebilmesi sağlanmaktadır. Bununla beraber yarı iletken anahtarlarda meydana gelen anahtarlama kayıpları da artmaktadır. Bant aralığının geniş seçilmesi durumunda ise evirici çıkışındaki akımların harmonik kirliliği artmakta ve AGF'nin dinamik performansı kötüleşmektedir (Uçar, 2012).

4.7. AHE Algoritmali PAGF'nin Matlab/Simulink Benzetim Modeli

AHE algoritmali PAGF'nin Şekil 4.4'te gösterildiği gibi Matlab/Simulinkte benzetim modeli kurulmuştur. Benzetim çalışması yapılan bu sistem; üç fazlı gerilim kaynağı, ayrı ayrı zamanlarda devreye giren iki farklı yük, gerilim kaynaklı evirici, bağlantı endüktansları ve evirici anahtar sinyallerini üreten HBAD ve referans akımlarını üreten AHE algoritması kontrol bloklarından oluşmaktadır. Birinci yük hemen devreye girmekte ve 10 Ω , 1 mH değerinde bir RL yüküdür. İkinci yük 20'inci ms'de devreye girmekte ve 15 Ω , 3 mH değerindedir. İkinci yükün devreye alınmasının nedeni farklı yük koşullarında PAGF'nin performansını ölçmektir.

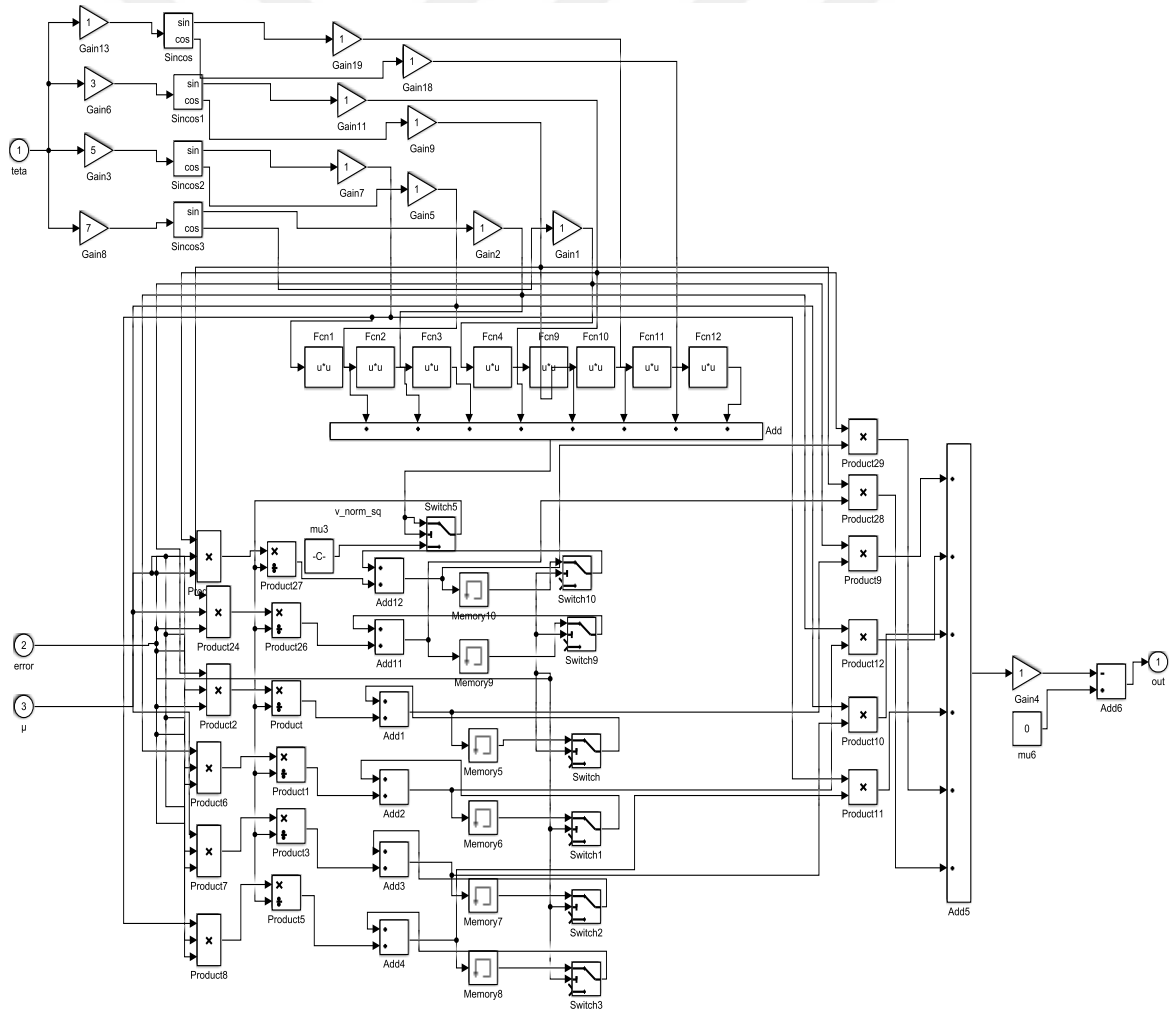
Harmonikleri üretmek için Şekil 4.5' te görüldüğü gibi R-L yükünü besleyen 6 darbeli köprü diyot doğrultucu kullanılmıştır. Böylece doğrusal olmayan yükler elde edilmiştir. Birinci yük hemen devreye girmekte iken ikinci yük 0.2'inci saniyede devreye girmektedir.

Denklem (4.1) ile (4.14) arasında ifade edilen AHE algoritmasına ait denklemlerin Simulinkte modellenmiş blok halı Şekil 4.6’da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. AHE algoritması Matlab/Simulink benzetim modeli

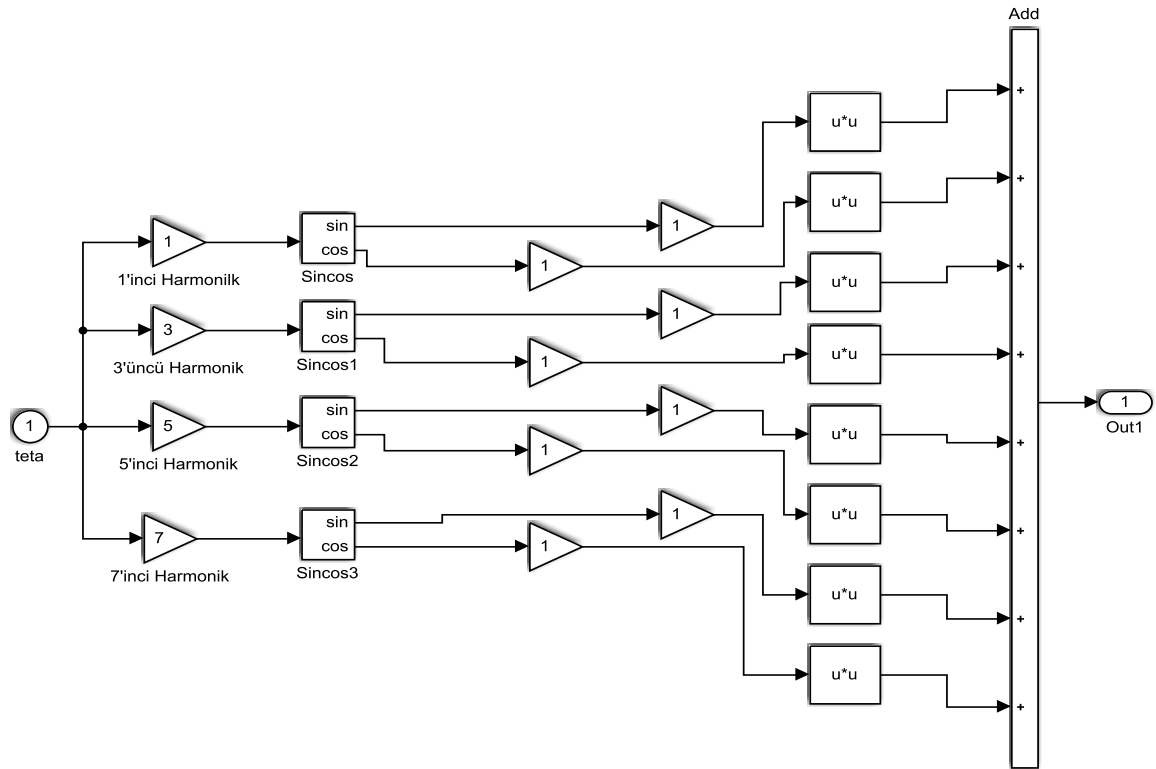
Matlab/Simulinkte modellenen AHE algoritmasına ait alt bloklar, Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. AHE algoritmasına ait alt blokların Matlab/Simulink benzetim modeli

Bu modelin giriş parametreleri; teta açısı, akım hatası (error) ve harmonik genliğini adaptif olarak hesaplamak için gerekli olan bir μ değerinden oluşmaktadır. Girilen bu üç parametreye göre hesaplama blokları her bir fazın adaptif olarak harmoniklerini hesaplayıp çıkışa aktarırlar. Burada başlangıçta μ değerine sabit bir değer verilir. Daha sonra sistem μ değerini girilen hata değeri ve teta açısına bakarak kendi içerisindeki alt algoritmalar vasıtasıyla her an günceller Dolayısıyla AHE algoritması her yük değişmesi durumunda μ 'yu güncelleyerek yeni duruma kolayca uyum sağlamak ve yük değişimlerinden etkilenmemektedir.

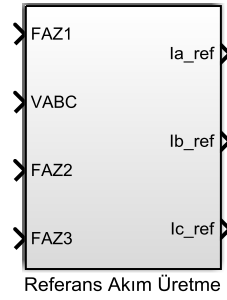
Şekil 4.7'de görüldüğü gibi istenilen harmonik değeri adaptif olarak algoritma tarafından hesaplanabilmektedir. Bu benzetim çalışmasına ait olarak Şekil 4.8'de 1'inci, 3'üncü, 5'inci ve 7'inci harmoniklerin genliklerini hesaplayan detaylı Matlab/Simulink benzetim çalışması verilmiştir.



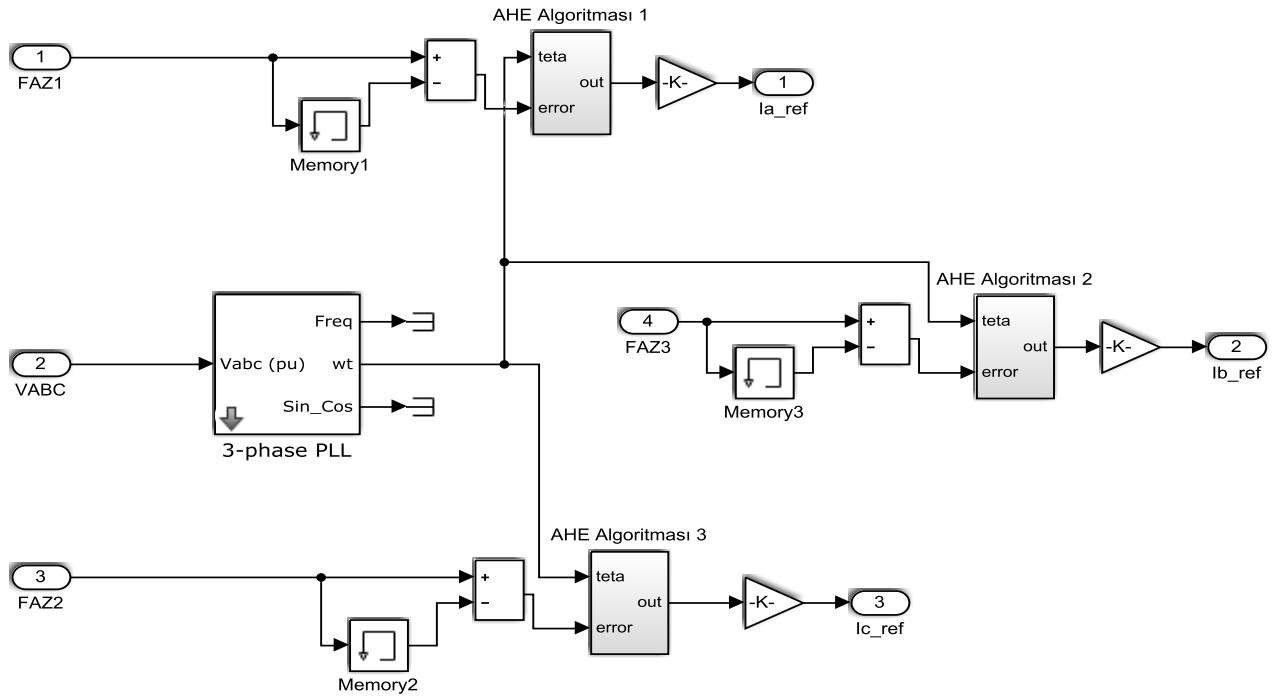
Şekil 4.8. Harmoniklerin genliklerini hesaplayan Matlab/Simulink benzetim modeli

Her üç faz için ayrı ayrı AHE algoritmasını kullanarak referans akım üreten blok Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Referans akım üretme bloğu daha detaylı bir şekilde Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her bir faza AHE algoritması uygulanmıştır. Burada teta açısı 3-faz PLL bloğu kullanılarak elde edilirken, error değerini elde etmek için her bir fazın yük akımı ile invertör çıkışındaki akımı arasındaki fark alındıktan sonra

memory bloğundan geçirilmektedir. Böylece bir önceki değer ile bir sonraki değer arasındaki fark alınıp error girişine verilir.

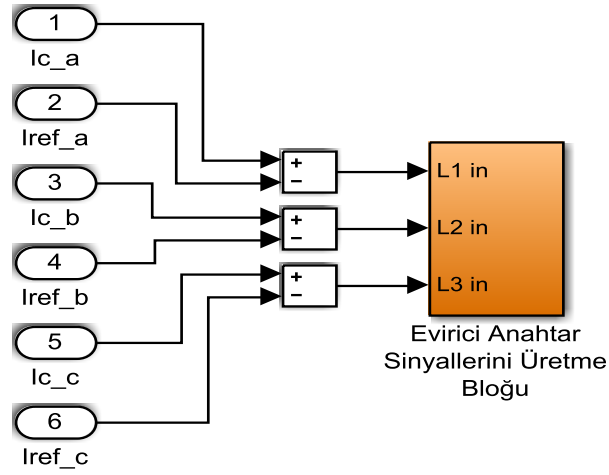


Şekil 4.9. AHE Algoritması ile Referans Akım Üretme Bloğu



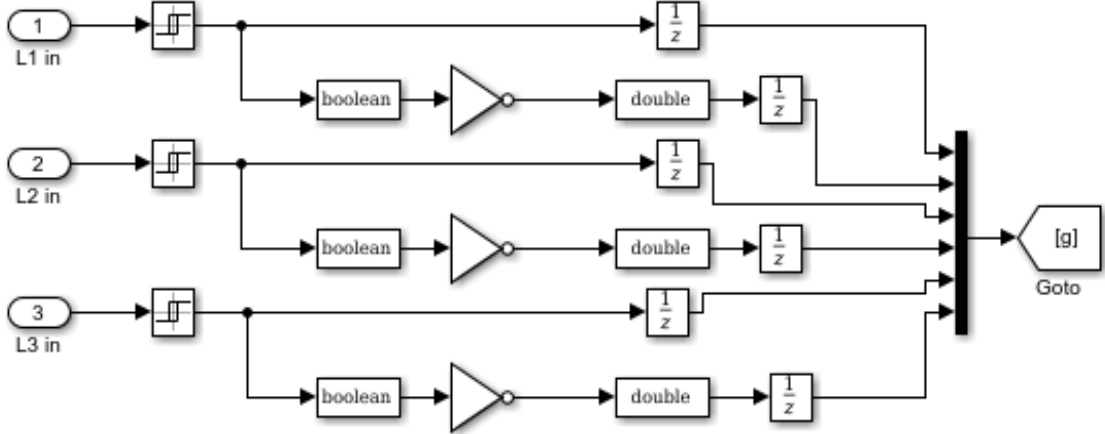
Şekil 4.10. AHE algoritması ile referans akım üretme bloğu detaylı şekli

Evirici anahtarlama sinyallerini üretmek için Histeresiz bant akım denetleyici (HBAD) kullanılmıştır. Doğrusal olmayan bir akım denetim yöntemi olan HBAD, eviricinin çıkış akımının belirli bir bant aralığında kalmasını sağlar. Evirici çıkışındaki akımı denetlemek için çıkış akımlarıyla referans akımlar karşılaştırılır. Elde edilen hata sinyalleri histerezis denetleyicilere uygulanarak anahtarlama sinyalleri üretilir. Şekil 4.11’de evirici anahtar sinyallerini üretme bloğu gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Evirici anahtar sinyallerini üreten HBAD bloğu

Evirici anahtar sinyallerini üretme bloğuna ilişkin olarak detaylı alt bloklar Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’den de görüleceği gibi evirici akımları ile referans akımlar karşılaştırılıp elde edilen hata sinyalleri HBAD’a verilmekte, HBAD ise hata sinyallerine göre eviriciyi anahtarlayacak sinyalleri üretmektedir.

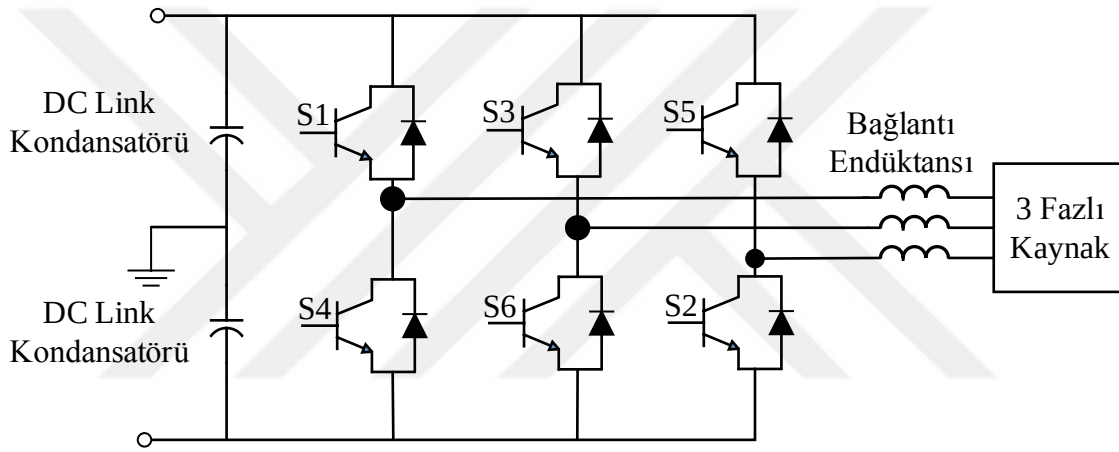


Şekil 4.12. HBAD bloğunun detaylı alt blokları

PAGF güç devresinin en önemli parçalarından biri de 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-link bağında bir kapasitör içerirler. Bunun yanında DA-link 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 (Uçar, 2012).

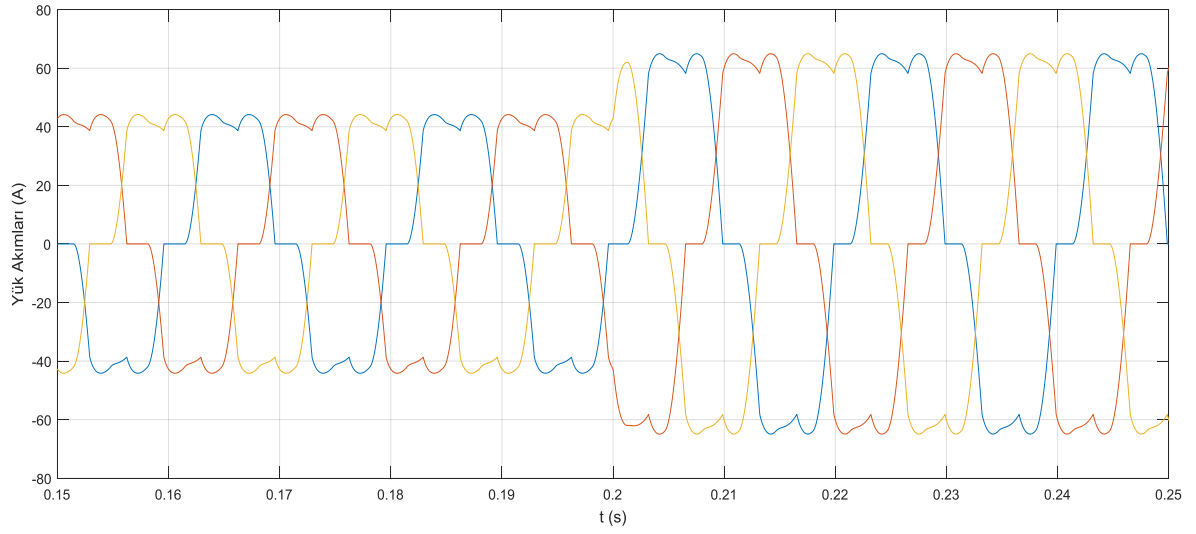
Şekil 4.13'te iki seviyeli gerilim beslemeli evirici gösterilmiştir. PAGF'nin performansını etkileyen etkenlerden bir tanesi de eviriciye bağlı olan DA link gerilimidir. Bu gerilim şebeke geriliminin maksimum (tepe) değerinden büyük olduğu bir referans gerilimde sabit tutulmalıdır. Bu nedenle DA link kondansatör geriliminin değeri PAGF için son derece önemlidir. Sistemde meydana gelen aktif güç kayıpları şebekeden karşılanarak, DA link kondansatör gerilimi referans değerinde tutulur. DA link kondansatörünün değeri, eviricinin DA gerilimindeki dalgalanmaya göre belirlenmektedir (Uçar, 2005).

Bu çalışmada, kaynak geriliminin tepe değeri 311 V olduğu için DA link gerilimi 380 V olarak seçilmiştir.



Şekil 4.13. İki seviyeli gerilim beslemeli evirici

Doğrusal olmayan yüklerin çektiği akımın üç fazına ait dalga şekli Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

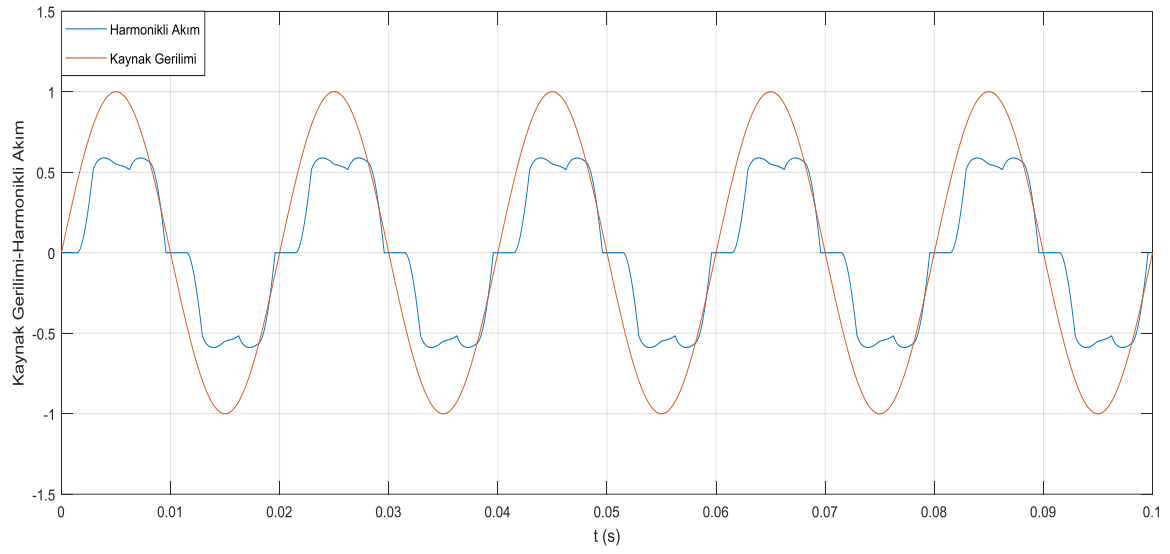


Şekil 4.14. Üç fazlı yük akımlarının değişimi (AHE)

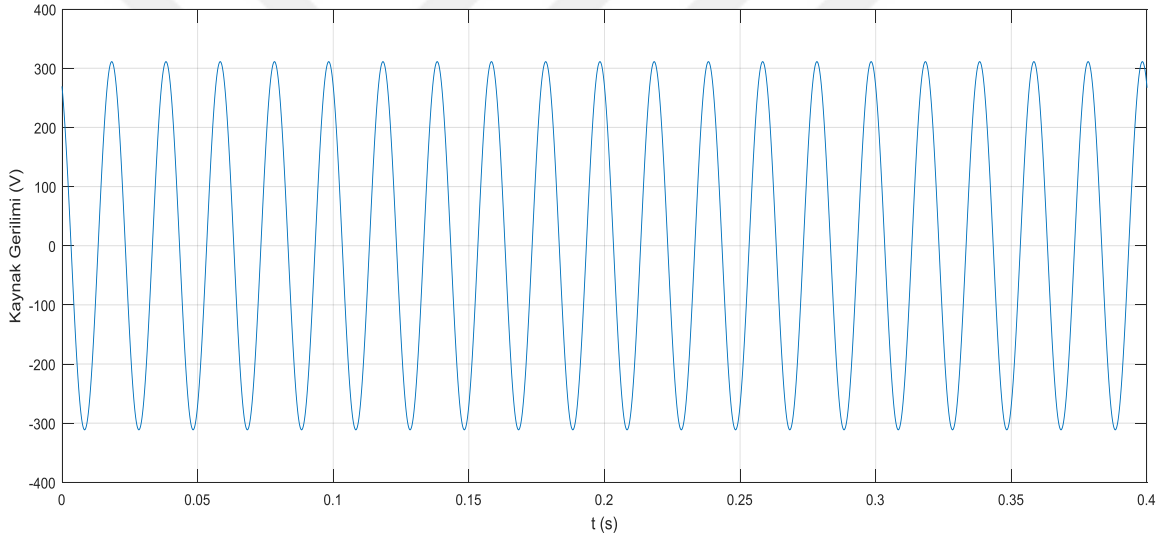
Bu çalışmada, $t=0.2$ s anında akımda meydana gelen artış, birinci doğrusal olmayan yüke ilave olarak ikinci yük de devreye alındığı için ortaya çıkmıştır. Ayrıca yüklerin doğrusal olmayan karakteristiklerinin sonucu olarak şebekeden çektikleri akımın dalga şeklinin de sinüzoidal yapıda olmadığı görülmektedir.

Şekil 4.15’de gösterildiği gibi akım ve gerilim arasında bir faz farkı vardır. Bu durum doğrusal olmayan yüklerin harmonikli akım çekmesinin yanı sıra reaktif güç çektiğini de göstermektedir. AHE algoritmalı PAGF’nin devreye girmesiyle hem harmonikler giderilmekte hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır.

Şekil 4.16’da ise kaynak geriliminin dalga şekli gösterilmiştir.



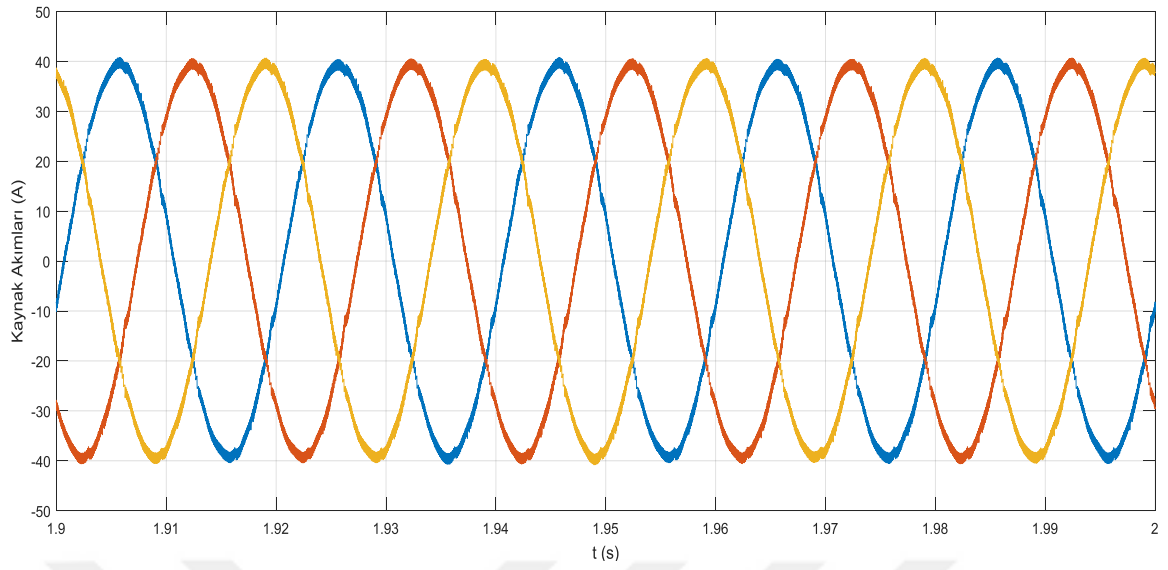
Şekil 4.15. Kaynak geriliminin ve harmonikli akımın değişimi (AHE)



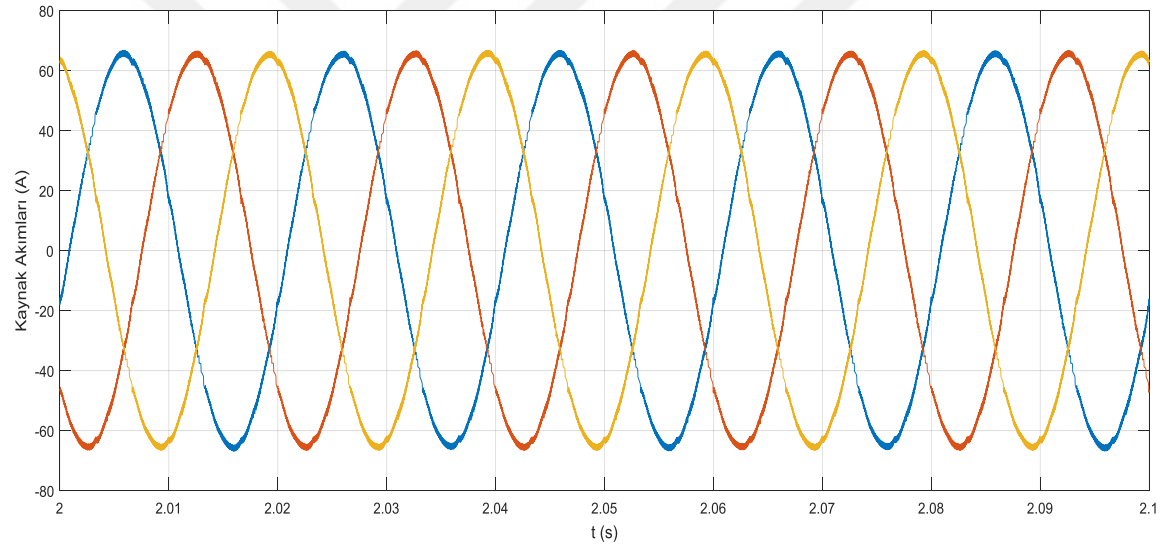
Şekil 4.16. Kaynak geriliminin değişimi (AHE)

Kaynak akımları ilk önce birinci yük devrde iken ve harmonikli akım çekerken 0.1'inci saniyede AHE algoritmali PAGF'nin devreye girmesiyle Şekil 4.17'de gösterildiği gibi kaynak akımlarının şekli sinüsoidal hale gelmiştir.

Şekil 4.18'de gösterildiği gibi 0,2'inci saniyede ikinci yük de devreye girmesiyle akım bir miktar yükselmektedir. Ancak PAGF, her iki yük devrede iken başarılı bir şekilde harmonikleri gidermektedir.

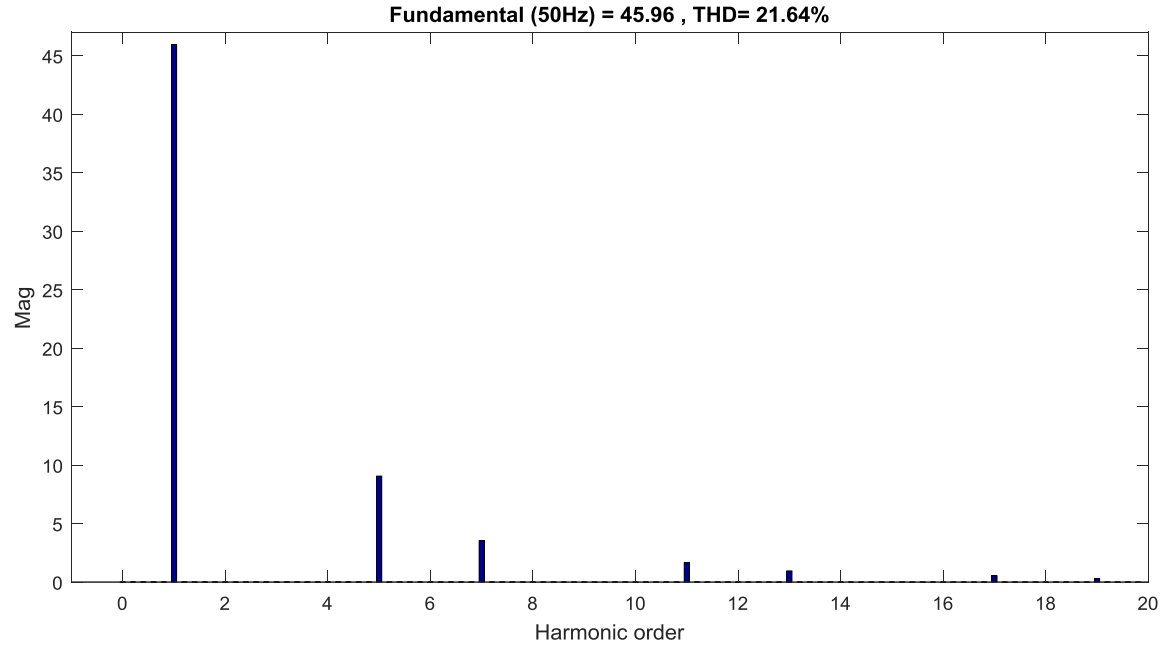


Şekil 4.17. Yük1 devrede iken kaynak akımları (AHE)

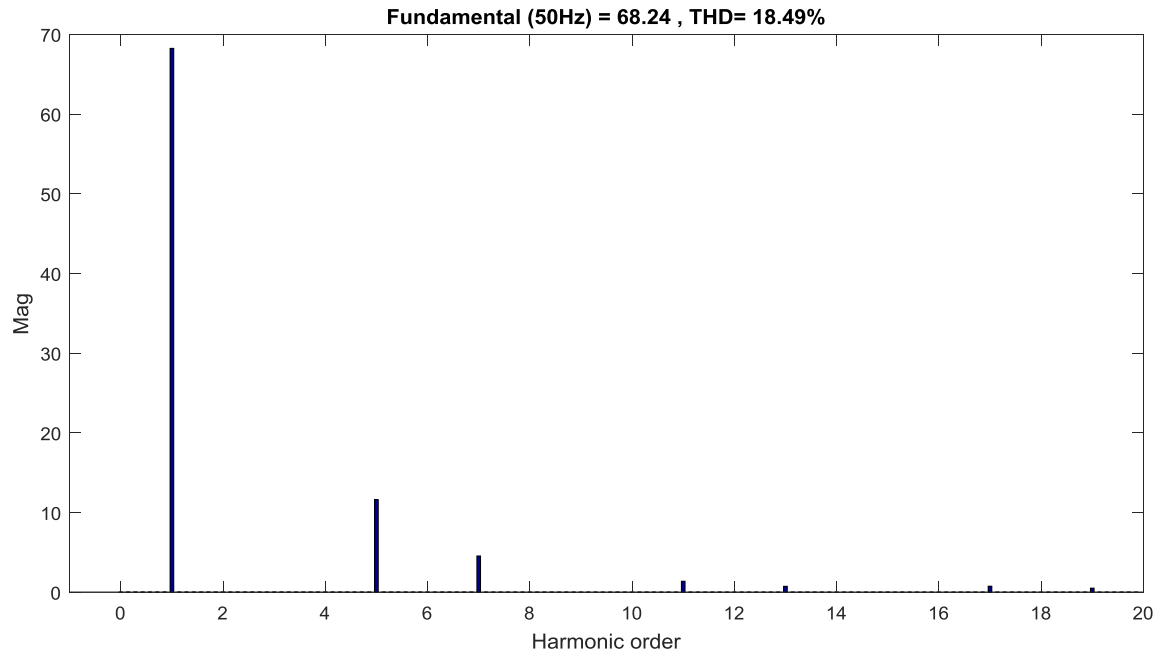


Şekil 4.18. Her iki yük devrede iken kaynak akımları (AHE)

Şekil 4.19 (a) ve (b) sırasıyla, Yük 1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için yük akımının THB'sini yüzde olarak göstermektedir. THB, birinci yük devrede iken %21,64 ve iki yük birlikte devrede iken ise %18,49 olmaktadır.



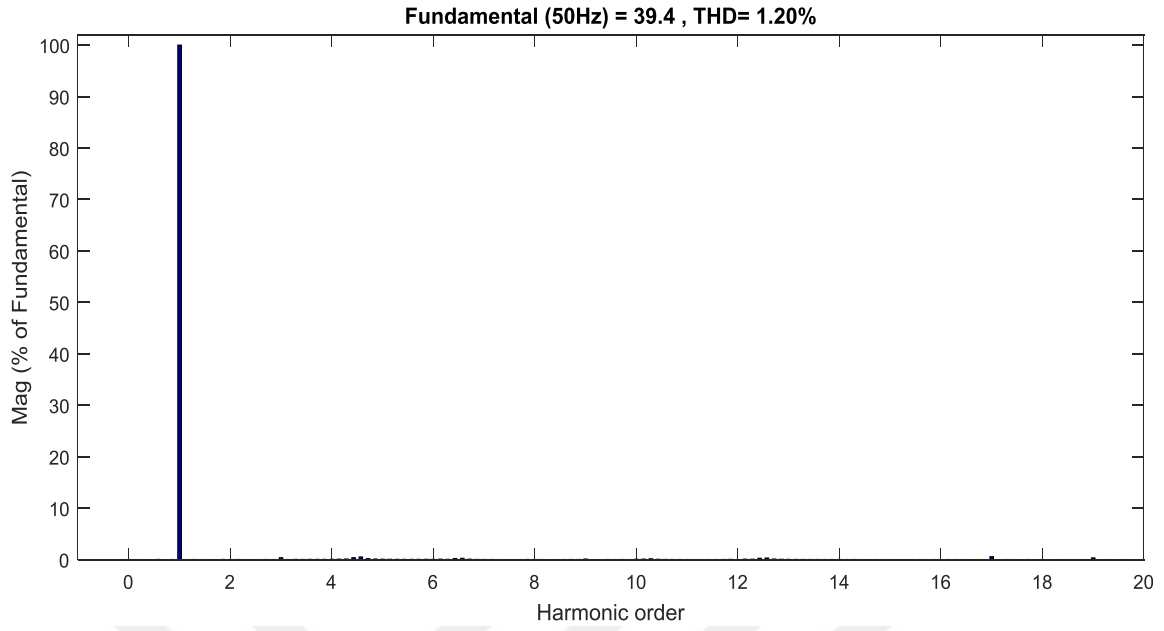
a) Yükl Devrede iken Akımın THB'si (AHE etkin değil)



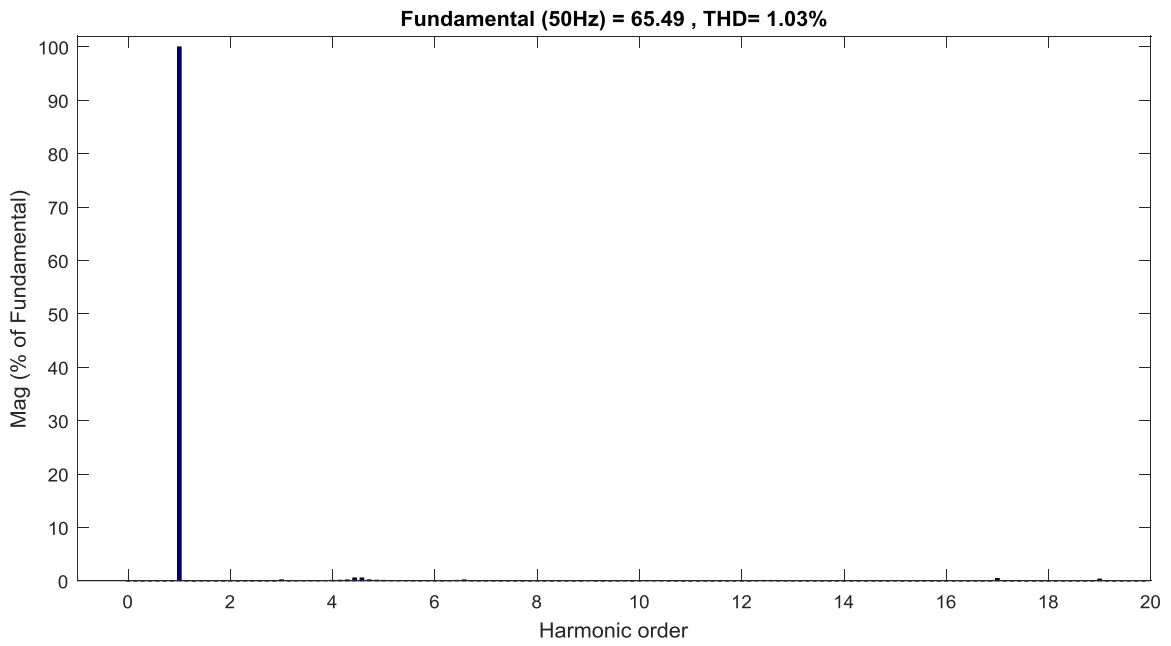
b) Yükl ve Yükl2 Devrede iken Akımın THB'si (AHE etkin değil)

Şekil 4.19. Yükl-2 akımlarının THB'leri (AHE etkin değil)

Şekil 4.20 (a) ve (b)'de AHE algoritmasını kullanan PAGF etkin iken sırasıyla, sadece Yükl 1 ve her iki yükün birlikte devrede olduğu durumlar için şebeke akımının harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şebeke akımının THB'si sadece Yükl1 devrede iken %1,20'ye, her iki yük devrede iken ise % 1,03'e düşmüştür.



a) Yükl Akımının THB'si (AHE)



b) Her iki yük Akımının THB'si (AHE)

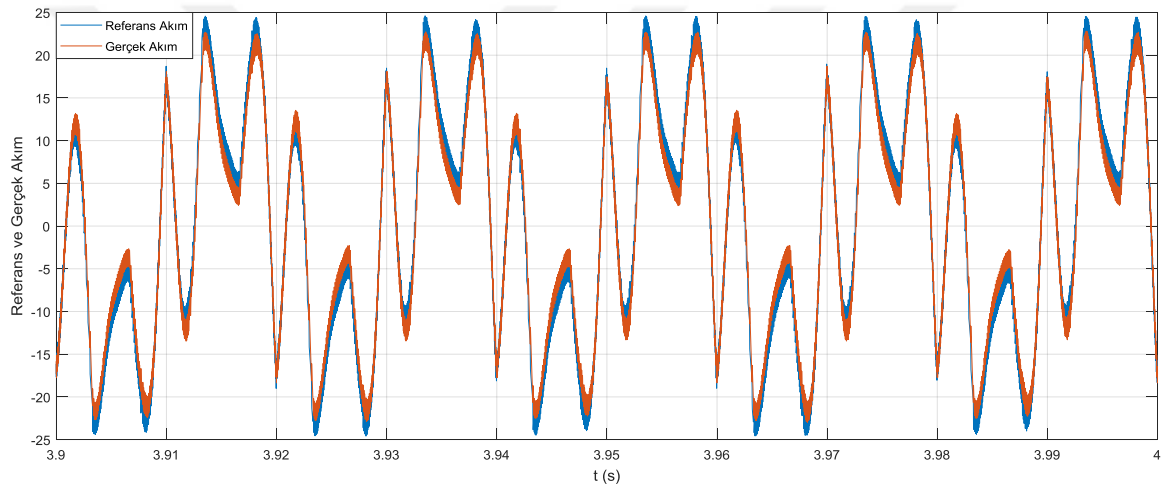
Şekil 4.20. Yükl ve Yükl2 akımlarının THB'leri (AHE)

Tablo 4.3, referans işaret çıkarmak için kullanılan AHE yöntemini kullanan PAGF'nin harmonik bastırma verilerini göstermektedir. Bu verilerden, kullanılan yöntemin sistem harmonik içeriğini IEEE-519 standartlarının önerdiği %5 değerinin altına indirdiği görülmektedir.

Tablo 4.3. AHE yöntemine ait harmonik verileri

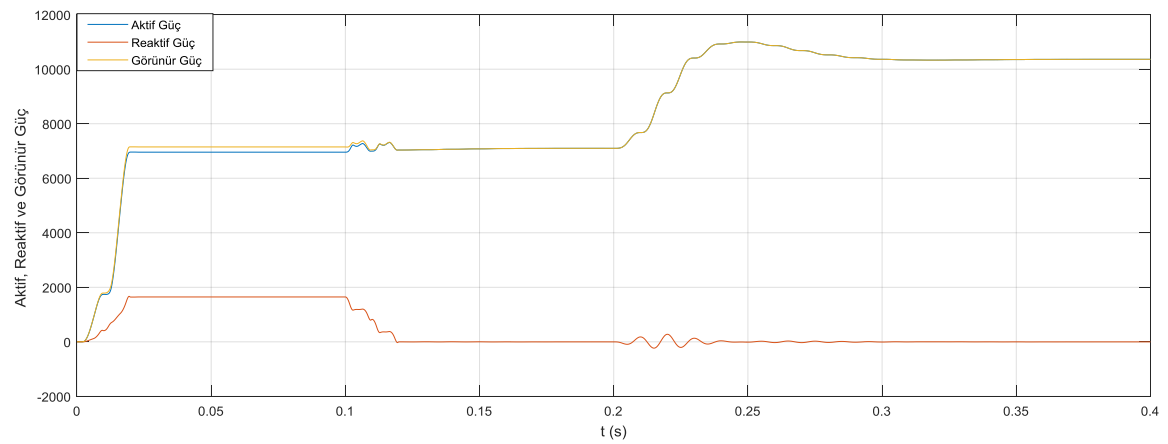
Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
AHE	Yük1	21,64	1,20
	Yük1 ve Yük2	18,49	1,03

Şekil 4.21’de AHE algoritmasının referans işaretleri izleme başarısı gösterilmiştir. $t=0,10$ s anında PAGF devreye girmiş ve mevcut referans akımları istenen şekilde yakalayarak izlemeye başlamıştır. $t=0,2$ s anında, ikinci yükün devreye girmesiyle değişen referans akımları da yüksek doğrulukla izlemiştir.



Şekil 4.21. AHE algoritmasını kullanan PAGF’nin referans işaret izleme başarısı

Şekil 4.22’de gösterildiği gibi 0,1’inci saniyede PAGF’nin devreye girmesiyle reaktif güç sıfıra doğru çekilmiştir.



Şekil 4.22. Aktif, reaktif ve görünür güçlerin değişimi (AHE)

Kullanılan her dört yöntemin de referansları izleme bakımından yüksek performansları şekillerden görülmektedir. FFT yönteminin reaktif güç kompanzasyonu işlemini tam olarak gerçekleştiremiyor olması bu yöntemin en büyük olumsuzluğudur. AHE, ARGT 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 sırasıyla AHE, ARGT, SRÇY ve FFT yöntemleri göstermiştir. Tablo 4.4 bize referans işaret çıkarmak için kullanılan her dört yöntemin harmonik bastırma verilerini birlikte göstermektedir. Tablo incelendiğinde kullanılan her dört yöntemin de sistem harmonik içeriğini IEEE standartlarının önerdiği %5 değerinin altına indirdiği görülmektedir. AHE algoritmasını kullanan PAGF THB'yi %1,03 gibi çok küçük bir değere indirerek iyi bir performans sergilemiştir.

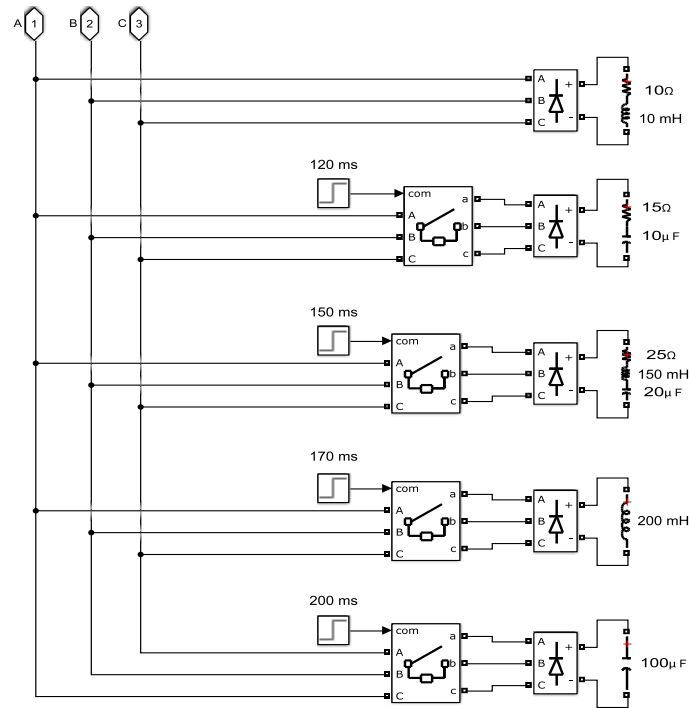
Tablo 4.4. Dört yönteme ait harmonik verileri

Yöntem	Yük Durumu	Yük Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
FFT	Yük1	21,64	2,84
	Yük1+Yük2	18,49	2,77
SRÇY	Yük1	21,64	1,94
	Yük1+Yük2	18,49	1,53
ARGT	Yük1	21,64	1,93
	Yük1+Yük2	18,49	1,4
AHE	Yük1	21,64	1,2
	Yük1+Yük2	18,49	1,03

5. AKIM HARMONİK BOZULMALARINA KARŞI GELİŞTİRİLEN AHE ALGORİTMASININ BAŞARIMI

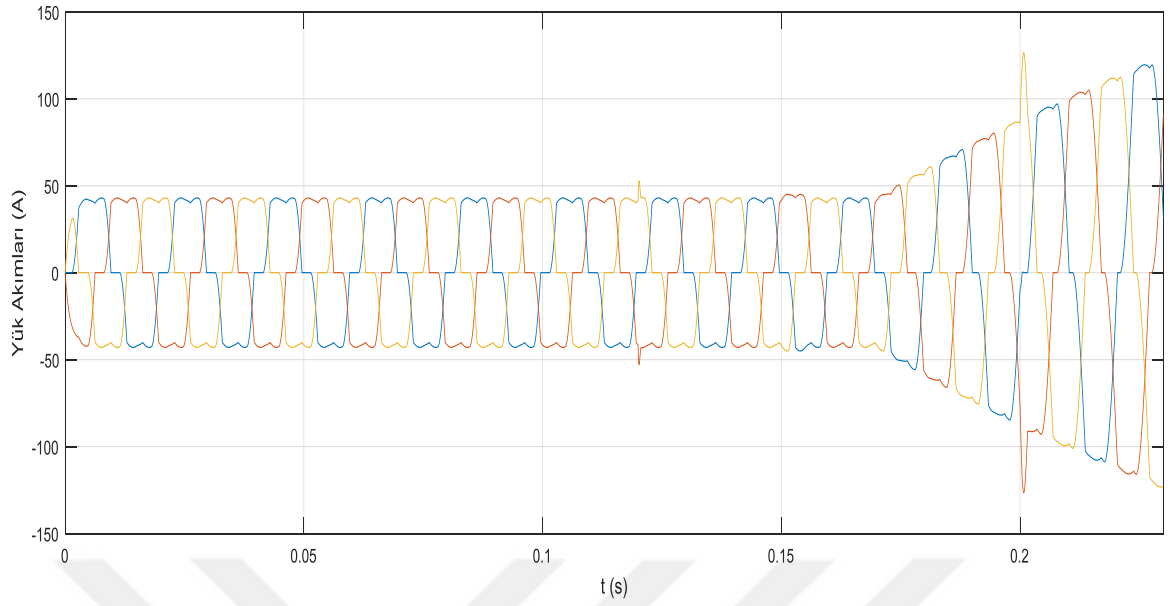
5.1. SRÇY, ARGT, FFT ve AHE Algoritmalarının Performans Karşılaştırması

Bu bölümde harmonik bozulmaların düzeltilmesine yönelik olarak literatürde tanımlanan yöntemler ile bu tez çalışmasında geliştirilen AHE algoritmasının Matlab/Simulinkte benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yükler üç şekilde devreye alınmaktadır. İlk durumda Şekil 5.1’de gösterildiği gibi sırasıyla, ikinci durumda tüm yüklerin %50’si (3 yük grubu), son durumda tüm yüklerin %90’ı (4 yük grubu) ani olarak aynı anda devreye alınarak dört yöntemin gösterdikleri performanslar incelenmiştir. Bütün benzetim çalışmalarında 100 ms sonra PAGF etkin olmaktadır.



Şekil 5.1. Çeşitli yük gruplarının Matlab/Simulink benzetim modeli

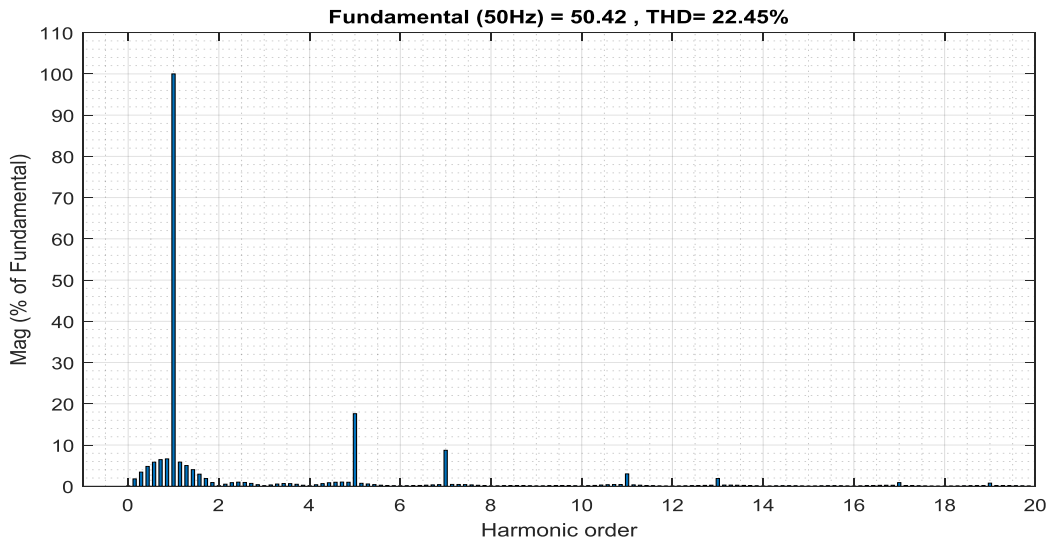
Bütün yöntemler için yük değişmediğinden, çekilen akımın değişimi aynı olup Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Harmonikli yük akımları

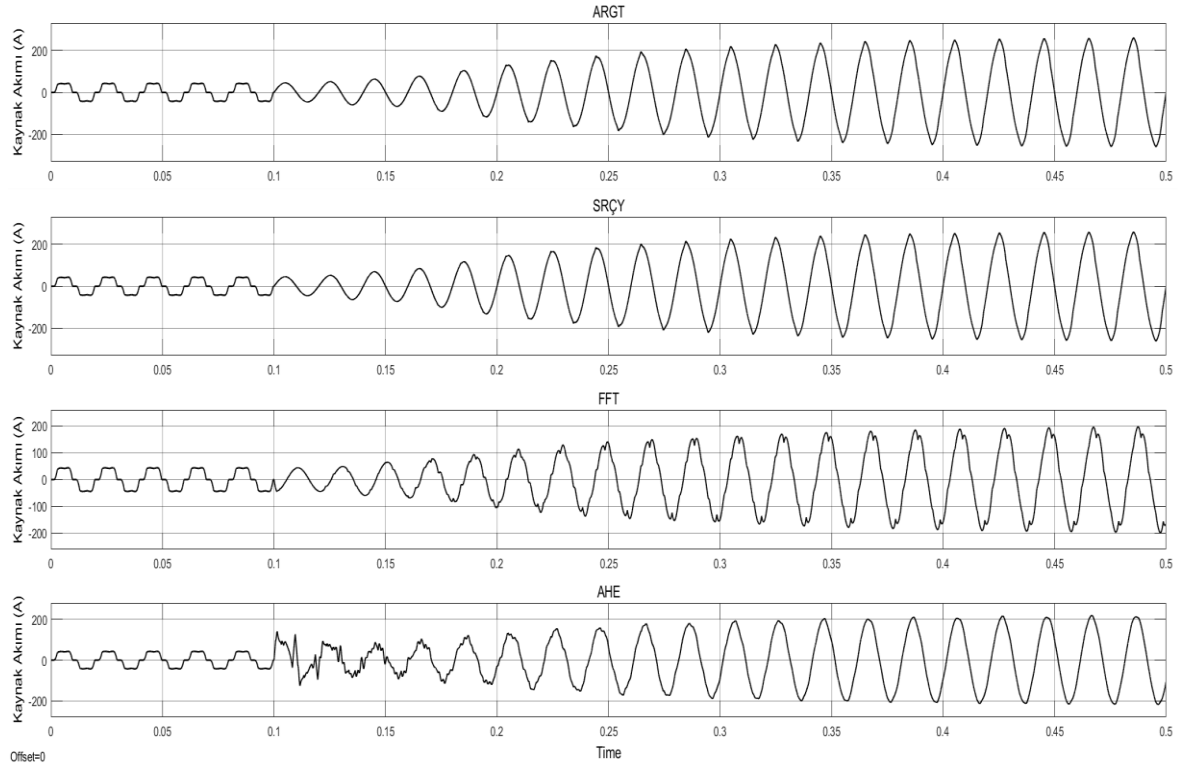
5.1.1. Yüklerin Sırasıyla Devreye Alınması Durumunda Yöntemlerin Performansı

Başlangıç anından itibaren $10\ \Omega$, $10\ \text{mH}$ değerinde bir R-L yükü; $120\ \text{ms}$ sonra da $15\ \Omega$, $10\ \mu\text{F}$ değerindeki R-C yükü; $150\ \text{ms}$ sonra $25\ \Omega$, $150\ \text{mH}$, $20\ \mu\text{F}$ değerindeki R-L-C yükü; $170\ \text{ms}$ sonra $200\ \text{mH}$ 'lik L yükü ve $200\ \text{ms}$ sonra da $100\ \mu\text{F}$ 'lık C yükü sırayla devreye girmektedir. Şekil 5.3'te çekilen yük akımlarının THB'si %22,45 olduğu gösterilmektedir.

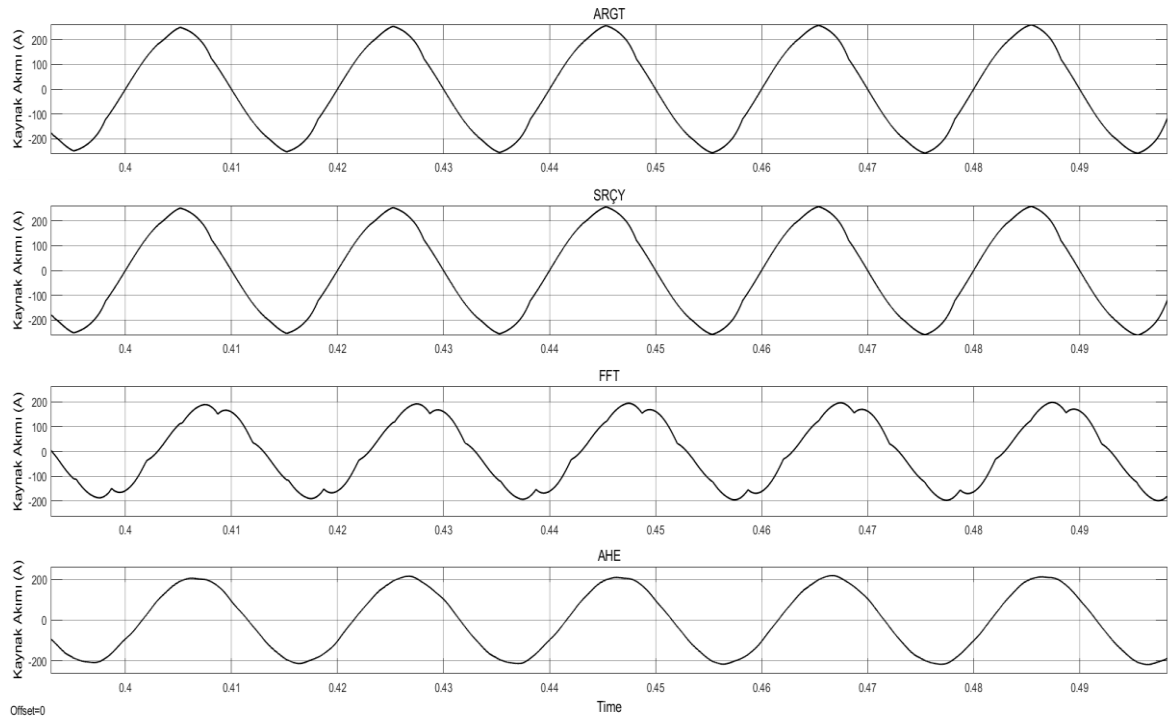


Şekil 5.3. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda yük akımlarının THB'si

Şekil 5.4, yüklerin sırasıyla devreye alınması durumu için ARGT, SRÇY, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının değişimini göstermektedir.



(a) Tüm değişim

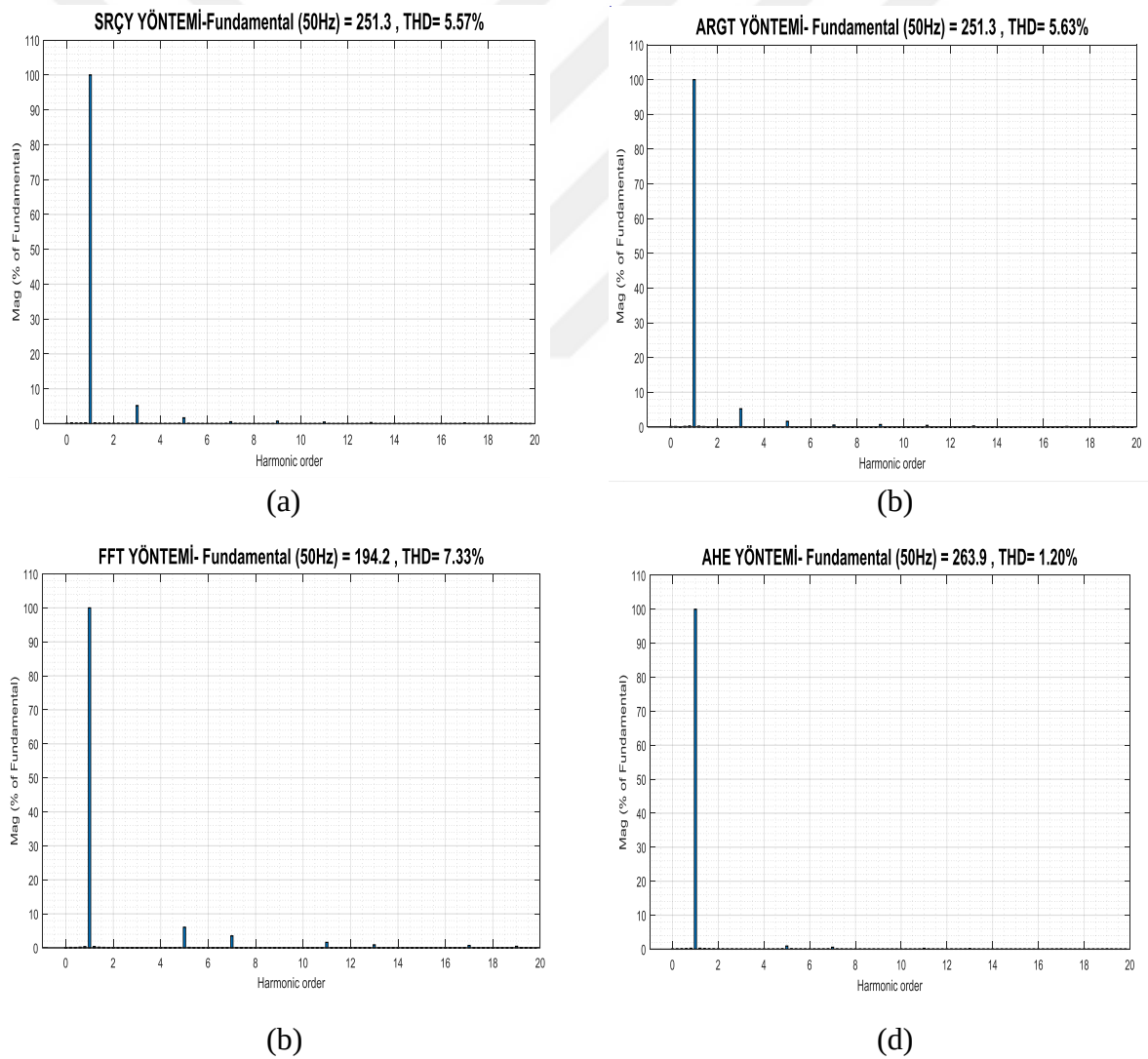


(b) Yakın gösterim

Şekil 5.4. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi

Şekil 5.4'den görüldüğü üzere ARGT, SRÇY, ve FFT yöntemleri ilk yük gruplarında iyi bir harmonik kompanzasyon yaparken, daha sonra diğer yük gruplarının devreye girmesiyle performansları düşmektedir. Özellikle FFT yöntemi daha kötü bir performans göstermektedir. AHE yönteminde, başlangıçta ağırlıkların güncellenmesinden dolayı bir dalgalanma görülmekte, ancak kısa bir süre içinde algoritmanın toparlandığı ve diğer yöntemlere göre daha iyi bir harmonik kompanzasyon yaptığı görülmektedir.

Şekil 5.5'te sırasıyla SRÇY, ARGT, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının THB grafikleri gösterilmektedir. THB değerleri SRÇY için %5,57, ARGT için %5,63, FFT için %7,33 ve AHE için %1,2'dir. Yüklerin sırasıyla alınması durumu için THB değerleri içerisinde %1,2 değeri ile en iyi performansı AHE algoritması sergilemektedir.



Şekil 5.5. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri

Yüklerin sırasıyla devreye girmesi koşulları altında THB değerlerine bakıldığında AHE haricindeki bütün yöntemler IEEE-519 standartlarında önerilen akım için %5 değerinin üzerinde kalmaktadır.

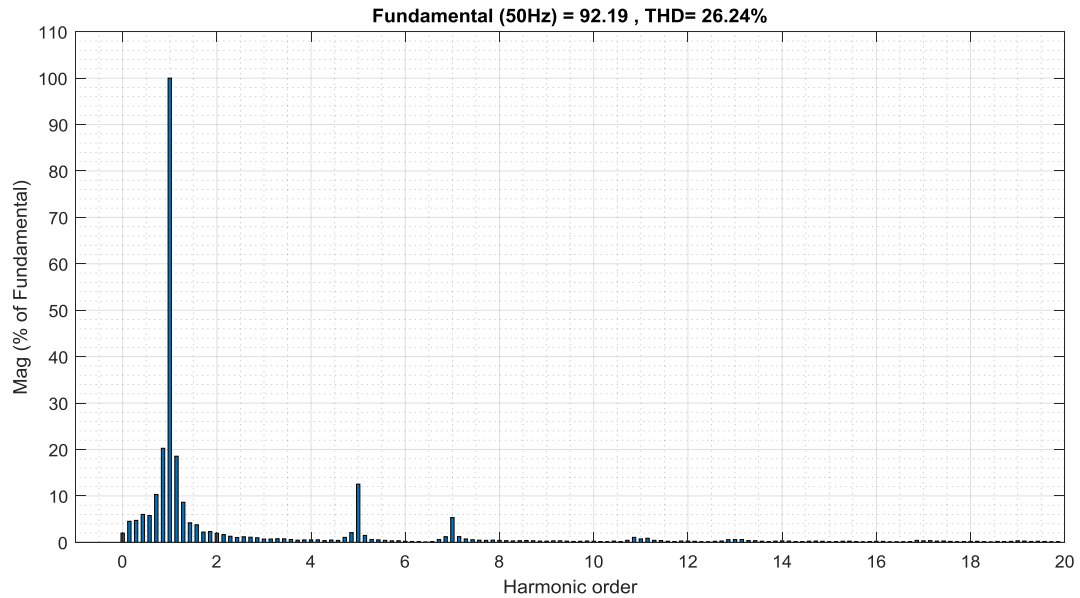
5.1.2. Yüklerin %50'sinin Aynı Anda Devreye Alınması Durumu

Yüklerin %50'si aynı anda devreye alınarak yöntemler karşılaştırılacaktır. Tablo 5.1'de gösterildiği gibi ilk 3 yük 0.12'inci saniyede bir anda devreye alınmaktadır. Daha sonra geriye kalan 2 yük ise sırasıyla devreye alınmaktadır.

Tablo 5.1. Üç yükün aynı anda devreye alınması durumundaki yük değerleri

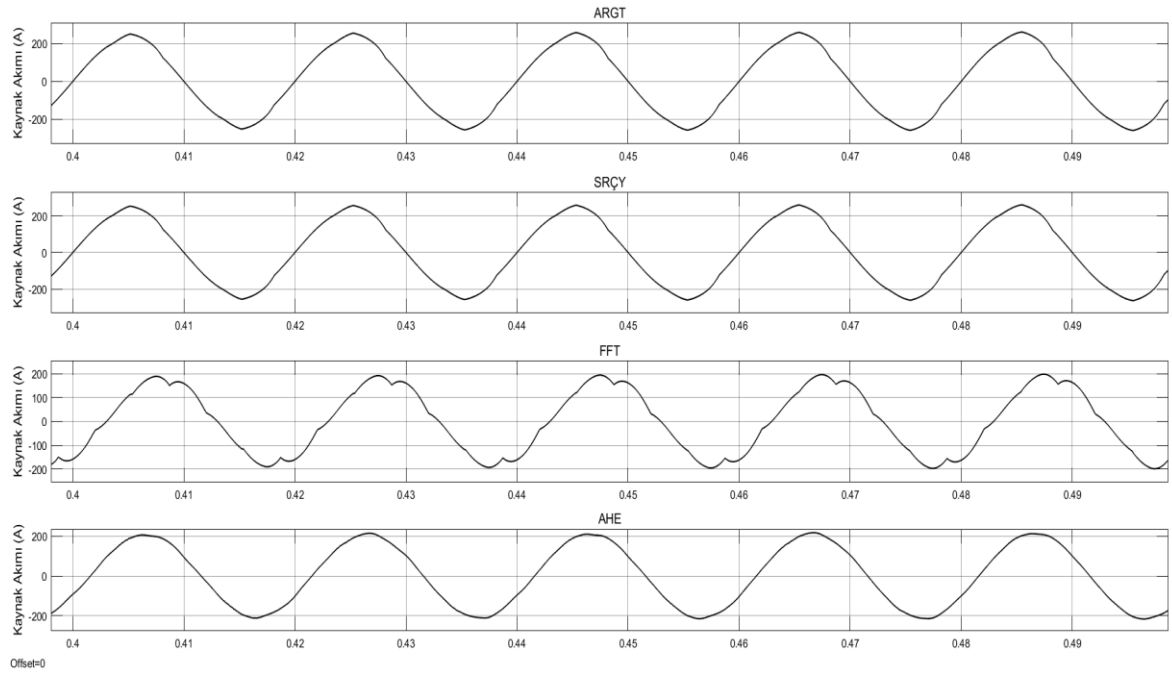
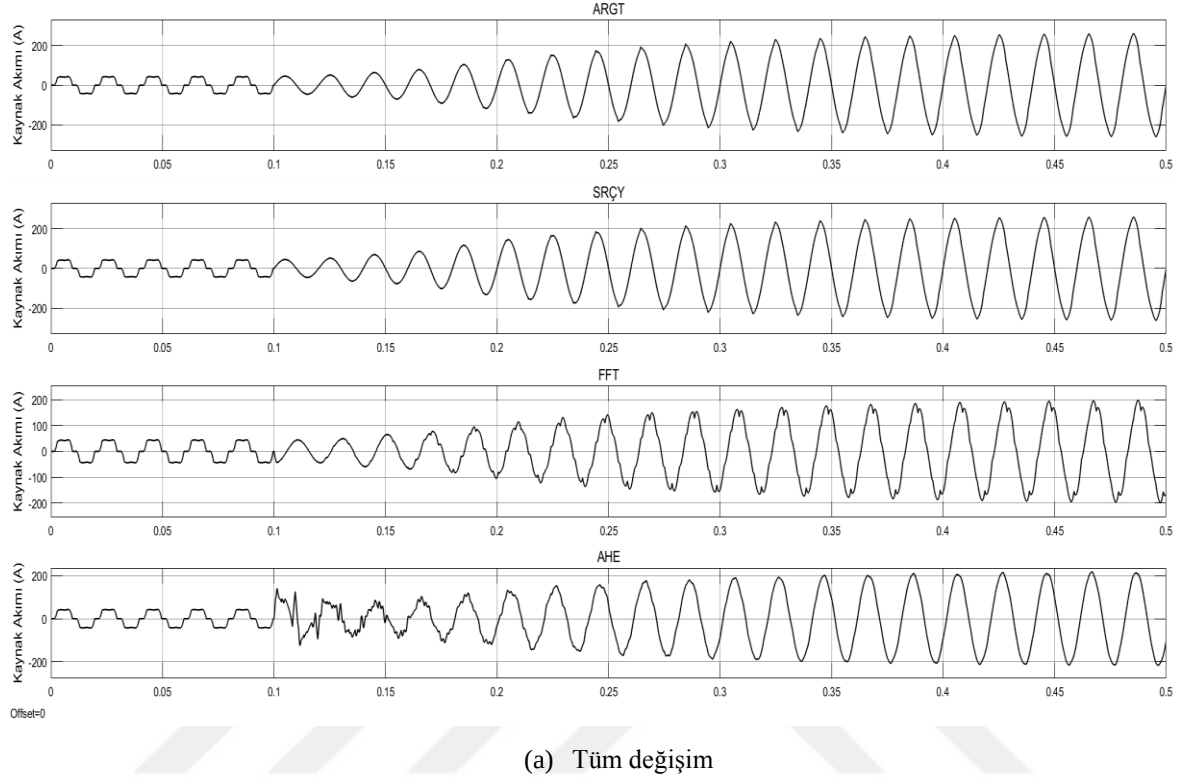
Devreye Alınma Anı (s)	Yükler	Yük Değerleri
0,12	Yük1	10 Ω - 10 mH
0,12	Yük2	15 Ω - 20 mH
0,12	Yük3	25 Ω - 10 μ F
0,20	Yük4	150 mH
0,23	Yük5	100 μ F

Ele alınan sistemde yüklerin %50'sinin devreye alınmasıyla elde edilen yük akımlarının THB'si %26,24 olduğu Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



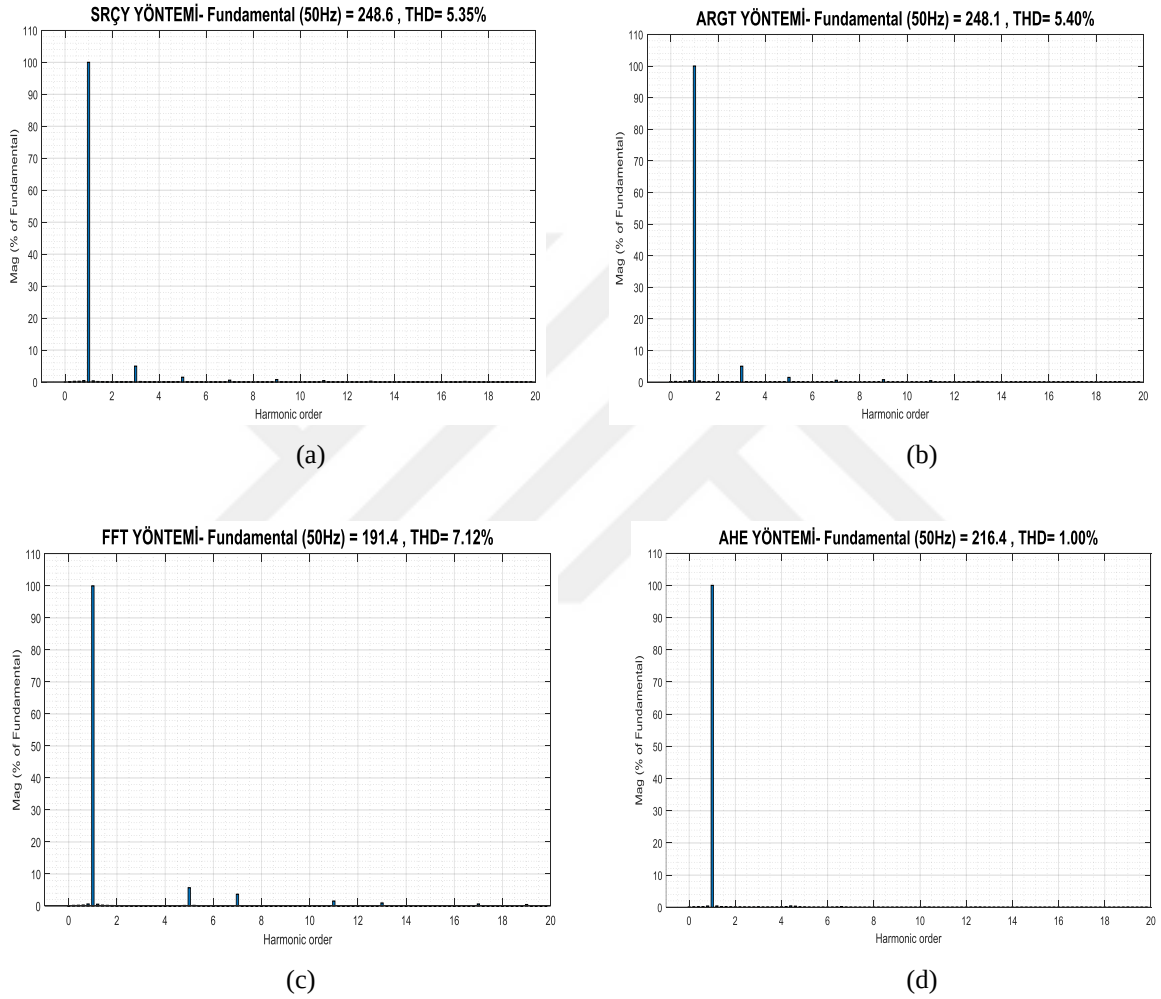
Şekil 5.6. Yüklerin %50'si devreye alınması durumunda yük akımlarının THB'si

Tüm yüklerin %50'si devreye alınması durumunda Şekil 5.7'de görüleceği gibi yukarıdan aşağıya doğru ARGT, SRÇY, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Yüklerin %50'si devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi

Şekil 5.8’de sırasıyla SRÇY, ARGT, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının THB grafikleri gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında THB değerleri SRÇY için %5,35, ARGT için %5,40, FFT için %7,12 ve AHE için %1 olduğu görülmektedir. Yüklerin sırasıyla alınması durumu için THB değerleri içerisinde %1 değeri ile en iyi performansı AHE algoritması göstermektedir. En kötü performansı ise %7,33 ile FFT yöntemi sergilemektedir.



Şekil 5.8. Yüklerin %50’si devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri

Yüklerin %50’si devreye alınması koşulları altında THB değerlerine bakıldığında AHE haricindeki bütün yöntemler IEEE-519 standartlarında önerilen akım için %5 değerinin üstünde kaldığı için harmonik kompanzasyon yapmasına rağmen başarısız olmuşlardır. AHE ise %1 değeri ile iyi bir performans sergilemektedir.

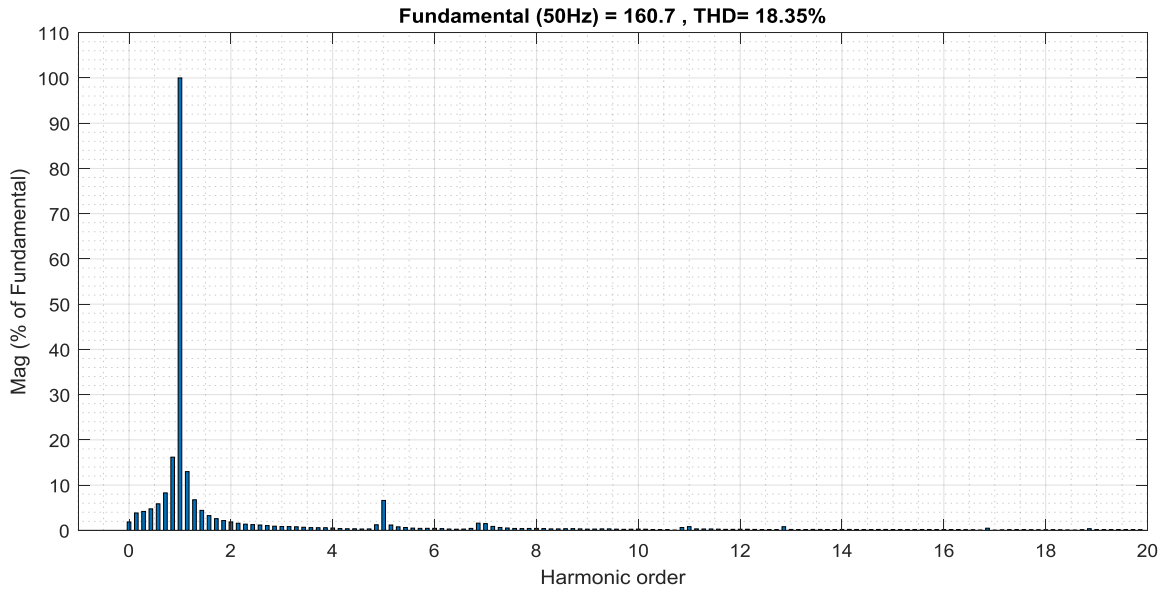
5.1.3. Yüklerin %90'ının Aynı Anda Devreye Alınması Durumu

Yüklerin yaklaşık %90'ı yani 4 yk aynı anda devreye alınarak yöntemler karşılaştırılacaktır. Tablo 5.2'de gösterildiği gibi ilk 4 yk 0,12'inci saniyede bir anda devreye alınmaktadır. Geriye kalan 1 yük ise 0,23'nc saniye sonra devreye alınmaktadır.

Tablo 5.2. Dört yükün aynı anda devreye alınması durumundaki yük değerleri

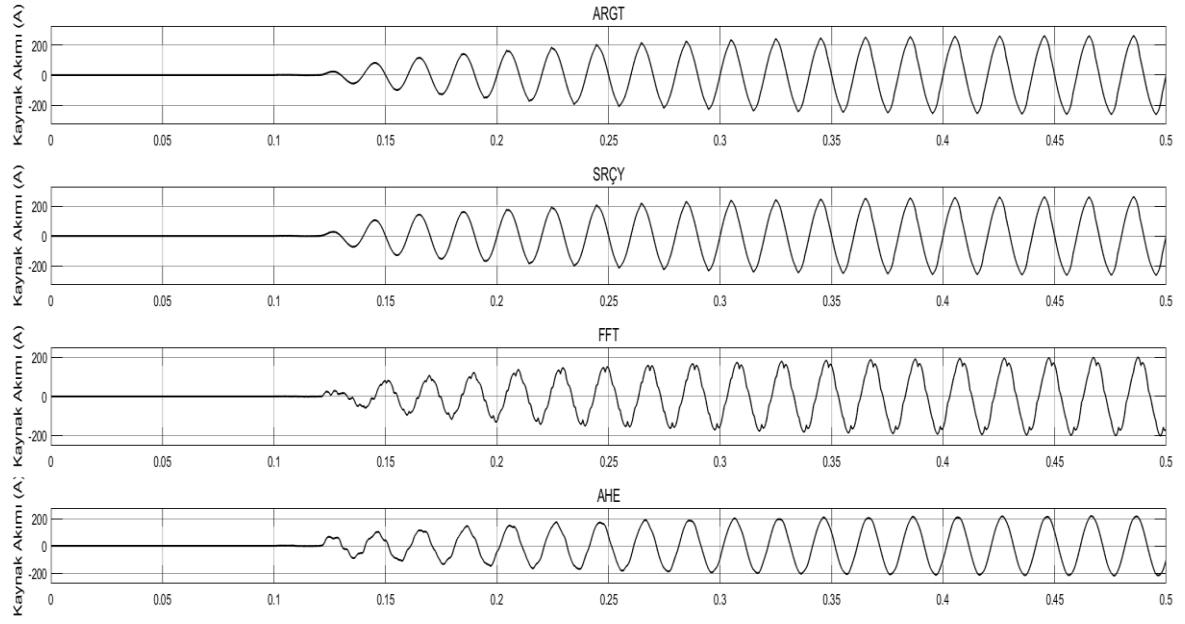
Devreye Alınma Anı (s)	Yükler	Yük Değerleri
0.12	Yk1	10 Ω - 10 mH
0.12	Yk2	15 Ω - 20 mH
0.12	Yk3	25 Ω - 10 μ F
0.12	Yk4	150 mH
0.23	Yk5	100 μ F

Ele alınan sistemde dört yükün (tüm yüklerin %90'nı) devreye alınmasıyla elde edilen yük akımlarının THB'si %26,24 olduğu Şekil 5.9'da gösterilmektedir.

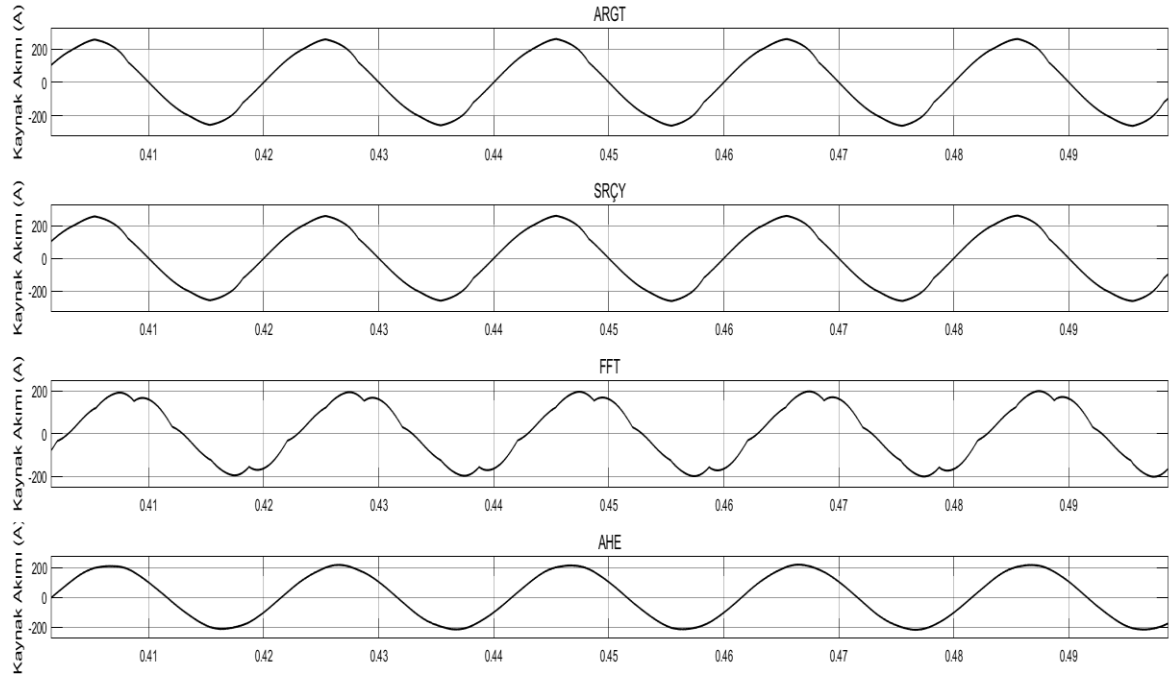


Şekil 5.9. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda yk akımlarının THB'si

Tüm yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda Şekil 5.10'da görüleceği gibi yukarıdan aşığıya doğru ARGT, SRÇY, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının değişimi gösterilmektedir.



(a) Tüm değişim

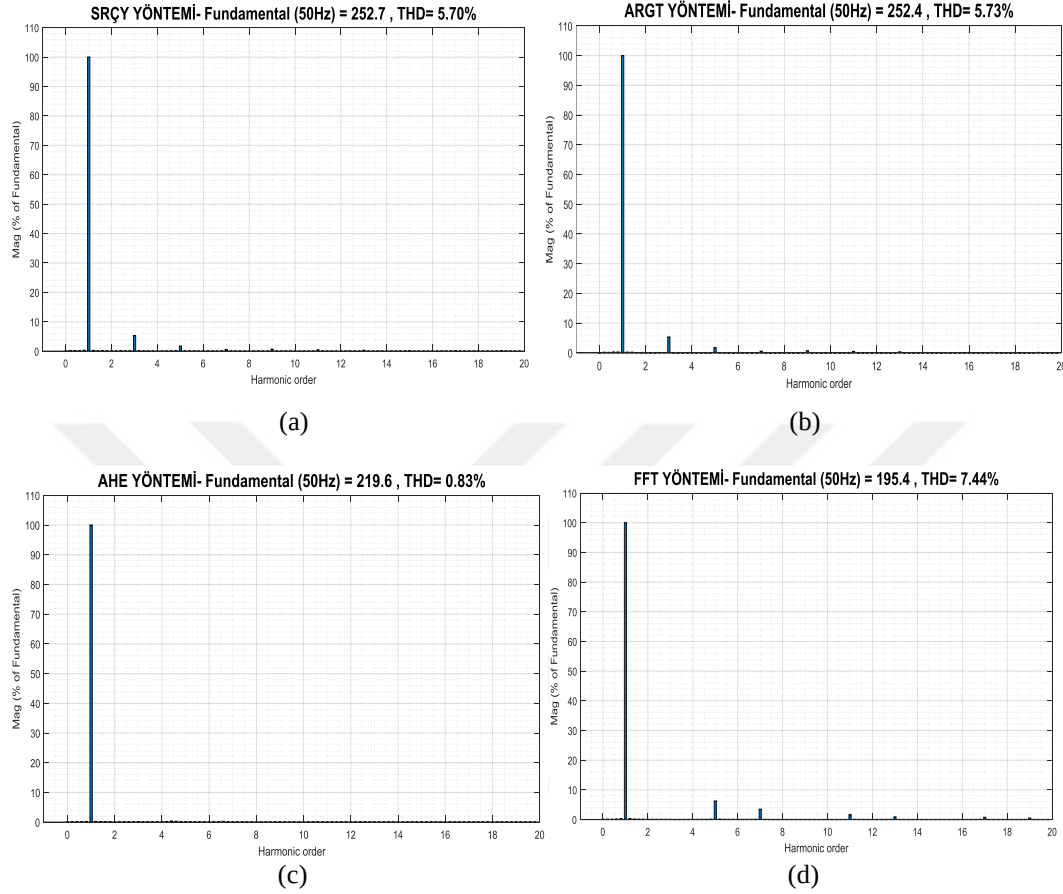


(b) Yakın gösterim

Şekil 5.10. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda kaynak akımlarının değişimi

Şekil 5.11'de tüm yüklerin %90'ı aynı anda devreye alınması durumunda sırasıyla SRÇY, ARG, FFT ve AHE yöntemlerine ait kaynak akımlarının THB grafikleri gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında THB değerleri SRÇY için %5,70, ARG için %5,73, FFT için %7,44 ve AHE için %1 olduğu görülmektedir. Yüklerin sırasıyla alınması durumu için

THB değerleri içerisinde %0,83 değeri ile en iyi performansı AHE algoritması göstermektedir. En düşük performansı ise %7,44 ile FFT yöntemi sergilemektedir.



Şekil 5.11. Yüklerin %90'ı devreye alınması durumunda yöntemlere ait THB değişimleri

5.2. Algoritmaların Genel Karşılaştırması

AHE algoritması yüklerin sırasıyla, üç ve dört yükün aynı anda devreye alınması durumlarında diğer üç algoritma ile karşılaştırıldığında harmonik kompanzasyon performansı olarak çok daha iyi bir performans sağlamaktadır.

Yüklerin sırasıyla alınması durumuna ait sonuçlar Tablo 5.3'te gösterilmektedir. Tabloya bakıldığında diğer üç yöntem harmonik kompanzasyon yapmalarına rağmen IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin biraz üstünde kalarak standartlara uymayı başaramamaktadırlar. AHE algoritması ise THB değerini %22,45'ten %1,20'ye düşürerek IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin çok altında kalarak iyi bir harmonik kompanzasyon yapmayı başarmıştır.

Tablo 5.3. Yüklerin sırasıyla devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı

Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
FFT	Bütün Yükler devrede	22,45%	7,33%
SRÇY	Bütün Yükler devrede	22,45%	5,57%
ARGT	Bütün Yükler devrede	22,45%	5,63%
AHE	Bütün Yükler devrede	22,45%	1,20%

Yüklerin %50'si aynı anda devreye alınması durumuna ait sonuçlar Tablo 5.4'te gösterilmektedir. Önerilen sistemde kullanılan beş yükten üçü aynı anda devreye alınarak yöntemlerin performansları incelenmiştir. Tabloya bakıldığında diğer üç yöntem harmonik kompanzasyon yapmalarına rağmen IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin biraz üstünde kalarak standartlara uymayı başaramamaktadırlar. AHE algoritması ise THB değerini %26,24'ten %1'e düşürerek IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin çok altında kalarak iyi bir harmonik kompanzasyon yapmayı başarmıştır.

Tablo 5.4. Yüklerin %50'si aynı anda devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı

Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
FFT	İlk üç yük aynı anda devreye alındı	26,24%	7,12%
SRÇY	İlk üç yük aynı anda devreye alındı	26,24%	5,35%
ARGT	İlk üç yük aynı anda devreye alındı	26,24%	5,40%
AHE	İlk üç yük aynı anda devreye alındı	26,24%	1%

Yüklerin %90'ı aynı anda devreye alınması durumuna ait sonuçlar Tablo 5.5'te gösterilmektedir. Önerilen sistemde kullanılan beş yükten üçü aynı anda devreye alınarak yöntemlerin performansları incelenmiştir. Tabloya bakıldığında diğer üç yöntem harmonik kompanzasyon yapmalarına rağmen IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin biraz üstünde kalarak standartlara uymayı başaramamaktadırlar. AHE algoritması ise THB

değerini %18,35'ten %0,83'e düşürerek IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin çok altında kalarak iyi bir harmonik kompanzasyon yapmayı başarmıştır.

Tablo 5.5. Yüklerin %90'ı aynı anda devreye alınması durumunda farklı yöntemlerin performansı

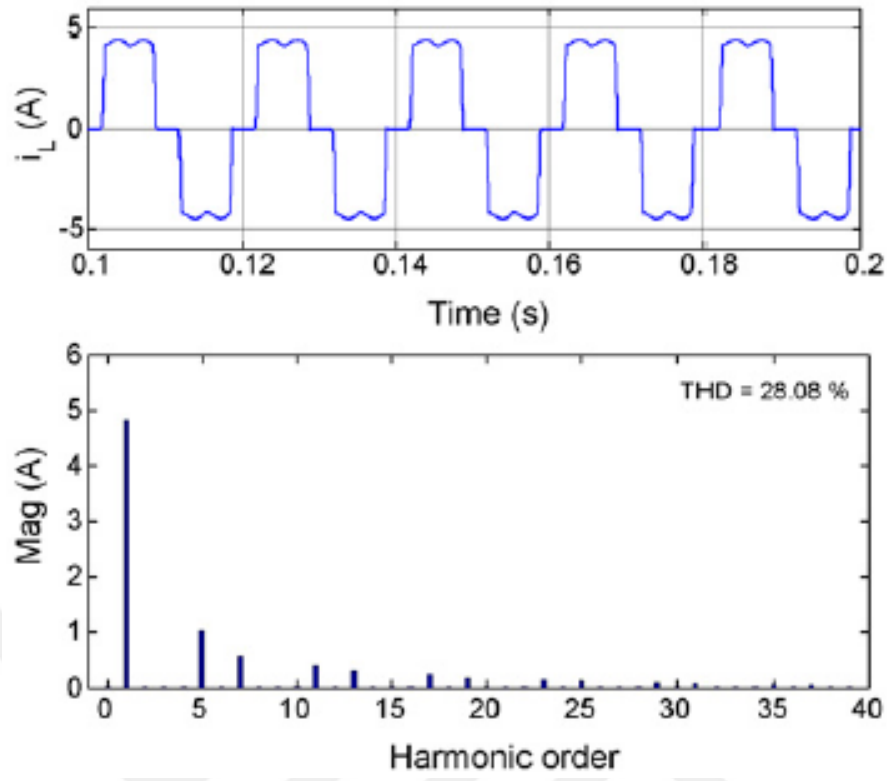
Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB'si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
FFT	İlk dört yük aynı anda devreye alındı	26,24%	7,44%
SRÇY	İlk dört yük aynı anda devreye alındı	26,24%	5,70%
ARGT	İlk dört yük aynı anda devreye alındı	26,24%	5,73%
AHE	İlk dört yük aynı anda devreye alındı	26,24%	0,83%

Yukarıdaki tablolarda da gösterildiği gibi bütün yük koşullarında AHE algoritması IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin çok altında başarılı bir harmonik kompanzasyon yapmayı başarmıştır. SRÇY, ARGT ve FFT yöntemleri ise, IEEE-519 standartlarında önerilen %5 değerinin üzerinde kalmışlardır.

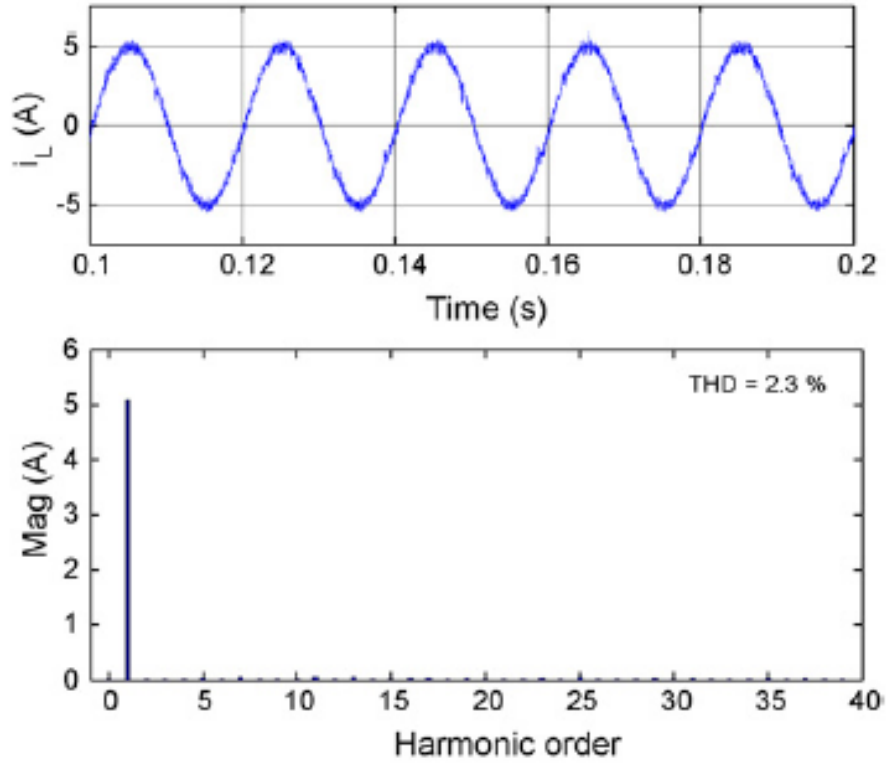
Bu karşılaştırmalara ek olarak, harmonik bozulmaların düzeltilmesi amacıyla literatürde yapılan bir çalışma ile tezde geliştirilen AHE algoritmasının performans karşılaştırması aşağıda verilmiştir:

Literatürde Abdusalam ve arkadaşları bozuk gerilim koşulları altında paralel aktif güç filtresi kontrolü için yeni bir referans akım çıkartma yöntemi önermişlerdir (Abdusalam vd., 2009). İlk önce bilgisayar simülasyonu ile yaptıkları bu çalışmayı, daha sonra DS1104 kartını kullanan deneysel bir çalışma ile desteklemiş ve iyi bir performans elde etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada elektriksel değerler olarak; 130 V etkin değer, 50 Hz frekansa sahip bir kaynak gerilimi, bu kaynağa bağlı doğrusal olmayan 48,6 Ω , 40 mH değerinde bir RL yükü ve 400 V evirici DC-link gerilimi kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonikli yük akımının THB değerinin %28,08 olduğu Şekil 5.12'den görülmektedir. Bu araştırmacıların önerdiği PAGF'nin devreye girmesiyle harmonikli akımın sinüsoidal yapıya dönüştüğü ve kaynak akımının THB değerinin %2,3'e düştüğü Şekil 5.13'te gösterilmektedir (Abdusalam vd., 2009).

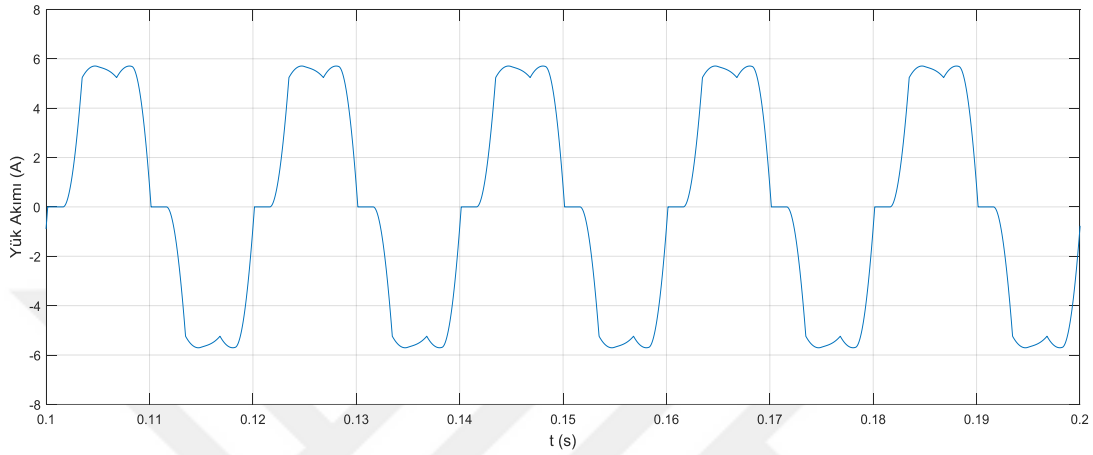


Şekil 5.12. Harmonikli yük akımı ve bu akıma ait THB değeri (Abdusalam vd., 2009)

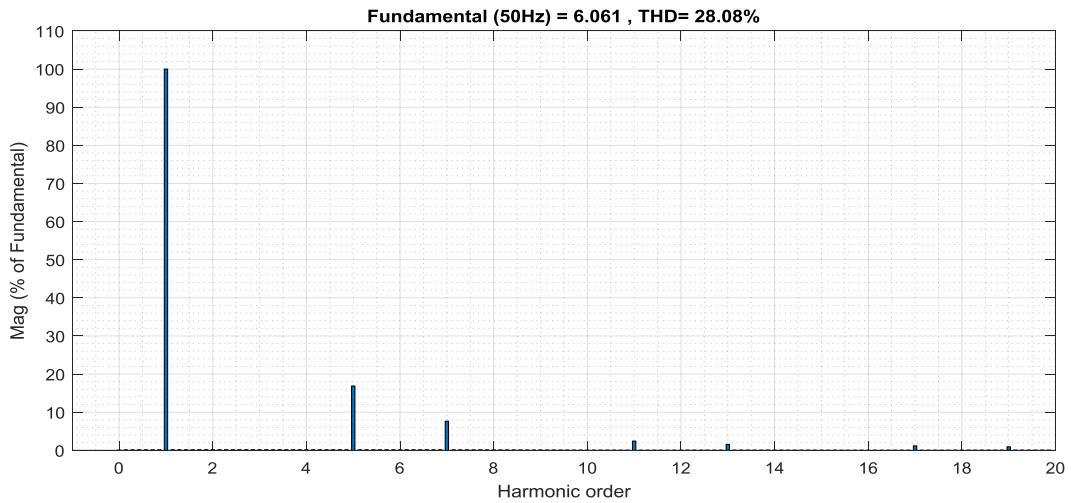


Şekil 5.13. Kaynak akımı ve bu akıma ait THB değeri (Abdusalam vd., 2009)

Bu tezde geliştirilen AHE algoritmali PAGF, aynı kaynak değerleri ve doğrusal olmayan yük şartlarında çalıştırılmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. AHE algoritmali PAGF devreye girmeden önce doğrusal olmayan yüklerin çektiği harmonikli yük akımı ve THB grafiği Şekil 5.14 ve Şkil 5.15'te gösterilmektedir.

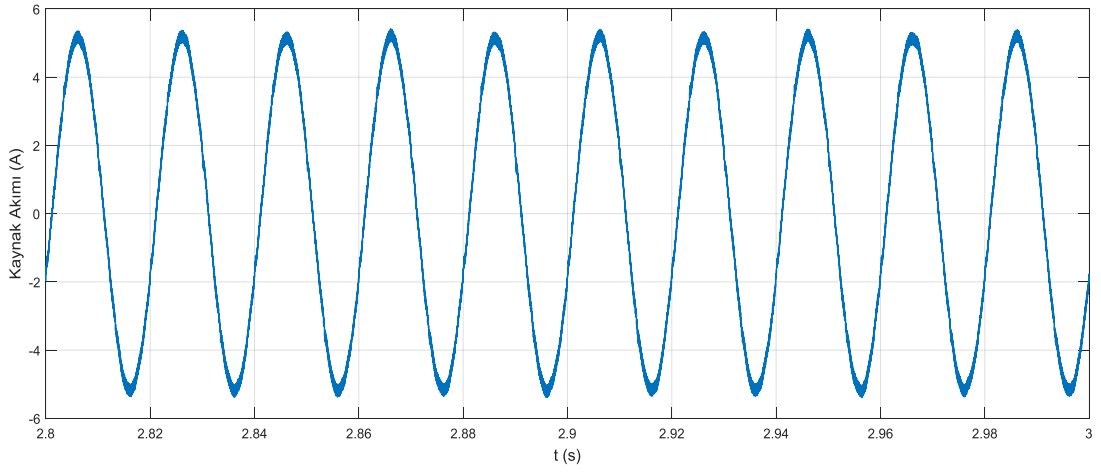


Şekil 5.14. Harmonikli Yük Akımı

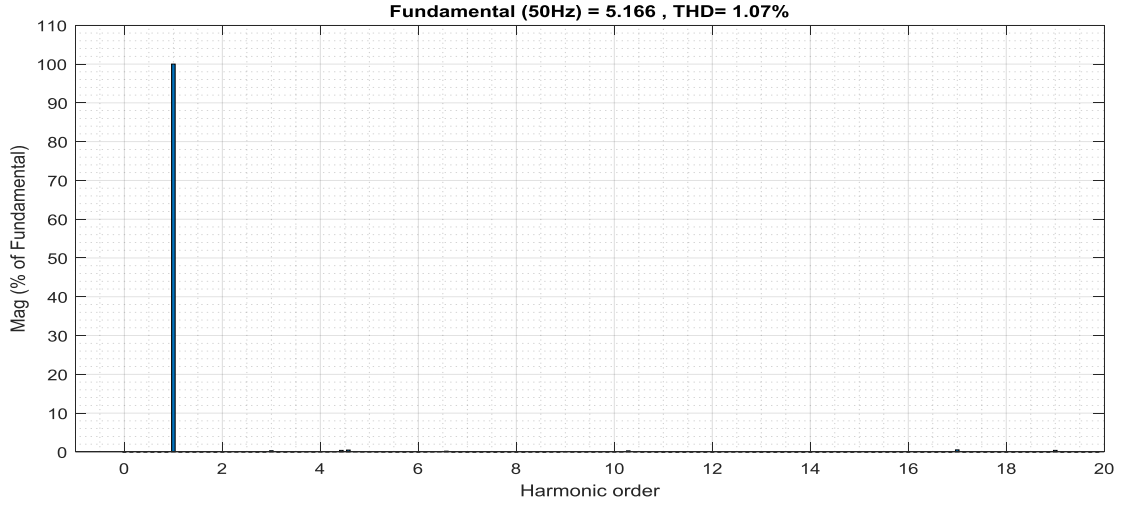


Şekil 5.15. Harmonikli kaynak akımının THB'si (AHE etkin değil)

0,5'inci saniyede AHE algoritmali PAGF'nin devreye girmesiyle harmonikli kaynak akımı Şekil 5.16'da gösterildiği gibi sinüsoidal hale dönüşmektedir. AHE algoritmali PAGF'nin devreye girmesiyle THB %28,08'den %1,07'ye düştüğü Şekil 5.17'den görülmektedir.



Şekil 5.16. Kaynak Akımı (AHE)



Şekil 5.17. Kaynak akımının THB'si (AHE)

Sonuçlar irdelendiğinde, Abdusalam ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada THB %28,08'den %2,3'e düşmekte iken, AHE algoritmali PAGF'nin THB değeri %28,08'den %1,07'ye düşmektedir. Böylece AHE algoritmali PAGF'nin, yüksek bir harmonik kompanzasyon performansı gösterdiği anlaşılmaktadır..

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada referans akımları çıkartmak amacıyla kullanılan en küçük kareler temelli yeni bir algoritma olan AHE algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada, akım harmoniklerini gideren ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilen PAGF için yeni adaptif bir denetim yöntemi olan AHE algoritmasının performansını göstermek amaçlanmıştır. Bu yöntemi kullanmanın temel özelliği, hızlı değişken yüklerde dahi PAGF'nin bu değişimlere her an kendisini uyarlayarak harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesidir. AHE algoritmali PAGF'nin benzetim çalışması Matlab/Simulink 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 değişimlere karşı dayanıklıdır.

PAGF'nin dinamik performansını göstermek için iki ayrı doğrusal olmayan yük farklı zamanlarda devreye alınmıştır. Altı darbeli diyot doğrultuculardan oluşan bu yüklerden birincisi hemen devreye girmekte ve 10 Ω , 1 mH değerinde bir RL yüküdür. İkinci yük 20 ms'de devreye girmekte ve 15 Ω , 3 mH değerindedir.

Önerilen AHE algoritmasını diğer yöntemlerle aynı şartlarda kıyas etmek amacıyla zaman domeninden SRÇY ile ARGT yöntemleri ve frekans domeninden FFT yönteminin benzetim çalışması Matlab/Simulink paket programı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra iki yük grubu koşullarında AHE yöntemi diğer üç yöntemle karşılaştırılıp benzetim sonuçları grafikler halinde sunulmuştur. Birinci çalışmada, her iki yük devrede iken THB değerleri AHE yöntemi için %1,03; ARGT için %1,4; SRÇY için %1,53 ve FFT için %2,77 bulunmuştur. Bu dört yöntem de, IEEE-519 standartlarında akım için önerilen %5 değerinin altında bir sonuç ile başarılı bir harmonik kompanzasyon yapmışlardır. THB değerleri itibariyle kendi aralarında kıyaslandığında, %1,03 ile performansı en iyi yöntem olarak AHE ve performansı en kötü yöntem olarak %2,77 ile FFT olmuştur.

Daha sonra ikinci çalışmada ard arda giren beş yük ile çeşitli referans akım çıkartma yöntemlerini kullanan PAGF'lerin dinamik performansı test edilmiştir. Bu ikinci çalışma için çeşitli yük gruplarının Matlab/Simulink'te benzetim çalışması yapılarak AHE, SRÇY, ARGT ve FFT yöntemlerine tatbik edilmiştir. Yükler ilk önce sırasıyla daha sonra ise tüm yüklerin %50'si ve %90'ı devreye alınmak suretiyle bu dört yöntemin harmonik

bastırabilme performansları incelenmiştir. SRÇY, ARGY ve FFT yöntemleri IEEE-519 standartlarında akım için önerilen %5 değerinin üstüne çıkarak harmonik kompanzasyon yapmakta yetersiz kalmışlardır. AHE algoritması ise bütün yük koşullarında IEEE-519 standartlarında akım için önerilen %5 değerinin altında kalarak çok iyi bir performans sergilemiştir. Bu ikinci çalışmada bütün yük koşullarında THB'si en düşük olan yöntem FFT yöntemi olmuştur.

AHE algoritmasının literatüre kazandırdığı en önemli katkılarından birisi her türlü yük koşullarında algoritma kendi içerisindeki alt algoritmaları çalıştırarak sürekli adaptif olarak hızlı bir şekilde kendisini güncellemesi ve yeni duruma çabucak uyum göstererek harmonik kompanzasyon yapmaya devam etmesidir.

Sonuç olarak zaman domenindeki referans işaret çıkarma yöntemlerinin frekans domeninde kullanılan FFT yöntemine göre %THB değeri ve şebekenin birim güç faktöründe tutulması gibi ölçütlerde daha üstün performans gösterdikleri benzetim sonuçlarından görülmektedir. Özellikle AHE algoritmasının daha dinamik ve daha iyi bir harmonik kompanzasyon yaptığı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Referans akım çıkartma algoritmalarında, Aşırı Öğrenme Makinaları (AÖM) gibi akıllı yöntemlerden yararlanılabilir. Ayrıca derin öğrenme metodları kullanılarak, yük değişikliklerinden fazla etkilenmeyen adaptif ve dinamik performanslar elde edilebilir. Önerilen bu yöntemler evirici anahtarlama sinyalleri üretme biriminde de kullanılabilir.
- AHE algoritmasının devreye ilk girmesi anında, adaptif olarak ağırlıklar güncellenirken bir miktar dalgalanma meydana gelmektedir. Bu dalgalanmaların optimum ağırlıklar seçilerek azaltılması amacıyla yeni optimum ağırlık belirleme yöntemleri geliştirilebilir.
- AGF'nin dinamik performansını etkileyen bir diğer faktör de DA-link geriliminin kontrol edilmesi olduğundan, DA-link gerilim kontrolöründen en iyi performansı elde etmek amacıyla, yeni optimizasyon tekniklerinden faydalanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdusalam, M., Poure, P., Karimi, S., ve Saadate, S.,** 2009. New digital reference current generation for shunt active power filter under distorted voltage conditions, *Electric Power Systems Research*, **79**, 759-765.
- Açıkgöz, H., Keçecioglu, O.F., Gani, A., Tekin, M., Sekkeli, M.,** 2017. Robust Control Of Shunt Active Power Filter Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller For Power Quality Improvement. *Technical Gazette*, **2**, 363-368.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A.,** 1984. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components, *IEEE Transaction on Industry Application*, **20**, 625-630.
- Akagi, H.,** 2005. Active Harmonic Filters, *Proceedings Of The IEEE*, **93**, No. 12, December.
- Akagi, H., Watanabe, E. H. ve Aredes, M.** 2007. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, IEEE-Wiley Press, New Jersey, USA.
- Akçay, M. T.,** 2010. Dengesiz Çalışma Koşulları İçin Seri Aktif Güç Filtre Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Alaşahan, Y.,** 2014. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Kritik Değerlere Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Alfonso-Gil, J. C., Pérez, E., Ariño, C., ve Beltran, H.,** 2015. Optimization Algorithm for Selective Compensation in a Shunt Active Power Filter, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, **62**, 3351-3361.
- Akmaz, D.,** 2012. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi Ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması İçin Aktif Güç Filtre Tasarımları, *Yüksek Lisans Tezi*, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.
- Akmaz, D., and Erişti, H.,** 2014. Design of Active Power Filters for Harmonics on Power System and Reducing Harmonic Currents, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering* Vol:8, No:7.
- Amaç, A. E.,** 2003. Yeni Aktif Filtre Topolojileri Kullanılarak Akım ve Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması ve Kesintisiz Güç Kaynağı Sistemlerine Uygulanması, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- 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.
- Badoni, M., Singh, A., ve Singh, B.,** 2016. Adaptive recursive inverse-based control algorithm for shunt active power filter, *IET Power Electron.*, **9**, 1053–1064.
- Bhattacharya, S., Divan, D.M., ve Banerjee, B.,** 1991. Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filter, *Proc. 4th EPE, Florence*, Vol. 3, pp 030-035, 1991.
- Bozabalı, M.,** 2009. Üç Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımı ve Simülasyonu, *Yüksek lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Chen, D., Xie, S.,** 2004. Review of the control strategies applied to active power filters, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)* April, Hong Kong.
- Chou, C., Liu, C., Lee, J., ve Lee, K.,** 2000. Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level, *Power Systems, IEEE Transactions on*, **15**, 433–441.
- Corasaniti, V. F., Barbieri, M. B., Arnera, P. L. ve Valla, M. I.,** 2009. Hybrid active filter for reactive and harmonics compensation in a distribution network, *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, **56**, 670-677.

- Çetin, S.**, 2018. Power Factor Corrected and Fully Soft Switched PWM Boost Converter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **54**, 3508-3517.
- Das, J.**, 2004. Passive filters-potentialities and limitations, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, **40**, 232–241.
- Das S, R., Ray,P, K., Mohanty, A.**, 2017.Enhancement of Power Quality Disturbances using Hybrid Power Filters, *2017 International Conference on circuits Power and Computing Technologies (ICCPCT)*.
- Demirdelen, T., İnci, M., Bayındır, K, Ç., ve Tümay, M.**, 2013. Review of Hybrid Active Power Filter Topologies and Controllers, *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey.
- Depenbrock, M.**, 1993. The FBD method a generally applicable tool for analyzing power relations, *IEEE Transactions on Power Systems*, **8**, 381-387.
- Doğan, H.**, 2016. Aktif Güç Filtreleri İçin FPGA tabanlı bir Kontrolörün tasarımı ve gerçekleştirilmesi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- El-Habrouk, M., Darwish, M.K., ve Mehta, P.**, 2000. Active power filters: A review, *IEE Proc-Electr. Potrer. Appl.*, **147**,403-413.
- El Shatshat,R, A.**, 2001. A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution S ystems”, *Doctor of Philosophy thesis*, University of Waterloo.
- Erken, F., Öksüztepe, E., ve Kürüm, H.**, 2015. Online adaptive decision fusion based torque ripple reduction in permanent magnet synchronous motor, *IET Electr. Power Appl.*, 1–8.
- Feng, L., and Wang, Y.**, 2017. Modeling and Resonance Control of Modular Three-Level Shunt Active Power Filter, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, **64**, 7478-7486.
- Gali, V., Gupta, N. ve Gupta, R. A.**, 2017. Mitigation of Power Quality Problems using Shunt Active Power Filters: A Comprehensive Review, *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*.
- Guzman, R., Vicuña, L, G., Morales, J., Castilla, M., ve Miret, J.**, 2016. Model-Based Control for a Three-Phase Shunt Active Power Filter, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, **63**, 3998-4007.
- Gyugyi, L.** 1992. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. In *IEEE proceedings C (generation, transmission and distribution)*, IET Digital Library, **4**, pp. 323-331.
- Hamad, M, S., Gadoue, S, M., ve Williams, B, W.**, 2012. Harmonic compensation of a six-pulse current source controlled converter using neural network-based shunt active power filter, *IET Power Electron.*, **5**, 747–754.
- Hashim, H, F., Omar, R., Rasheed, M.**, 2016. Design and Analysis of a Three Phase Series Active Power Filter (SAPF) Based On Hysteresis Controller”, *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, 1-5.
- Herrera, R.S., ve Salmeron, P.**, 2007. Instantaneous Reactive Power Theory: A Comparative Evaluation of Different Formulations, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, **22**,.595-604.
- Hoadley, F.**, 2008. Curb the disturbance, *Industry Applications Magazine, IEEE*, **14**, 25–33.
- Jin, T., Chen,X., ve Smedley, K, M.**, 2003. A New One-Cycle Controlled FACTS Element with the Function of STATCOM and Active Power Filter”, *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*.
- Karaman, Ö.A., Erken, F., Cebeci, M.**, 2018. Decreasing Harmonics via Three Phase Parallel Active Power Filter Using Online Adaptive Harmonic Injection Algorithm. *Tehnički vjesnik*, **25**, 157-164.
- Karuppanan. P.**, 2012. Design and Implementation of Shunt Active Power Line Conditioner using Novel Control Strategies, *Master thesis*, Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.
- Key, T.S.; Lai, J.S.**, 1998. IEEE and international harmonic standards impact on power electronic equipment design, *IEEE 23rd International Conference on Industrial Control and Instrumentation*, **2**,.430-436.

- Kucherenko, D., ve Safronov, P.,** 2014. A Comparison of Time Domain Harmonic Detection Methods for Compensating Currents of Shunt Active Power Filter, *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*.
- Kumar, P., ve Mahajan, A.,** 2009. Soft Computing Techniques for the Control of an Active Power Filter, *IEEE Transactions On Power Delivery*, **24**, 452-461.
- Lam, C.S., Wong, M.C., Han, Y.D.,** 2012. Hysteresis current control of hybrid active power filters, *IET Power Electronics*, **5**, 1175–1187.
- Maheswaran, D., Rajasekar, N., ve Kumar, A.,** 2014. Design Of Passive Filters For Reducing Harmonic Distortion And Correcting Power Factor In Two Pulse Rectifier Systems Using Optimization, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, **62**, 720-728.
- Moran, S.,** 1989. A line Voltage Regulator/Conditioner for Harmonic Sensitive Load Isolation, *IEEE IAS Annual Meeting*, 947-951.
- Mutlu, H. H.,** 2011. DSP Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresi İle Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen ilimleri Enstitüsü, Konya.
- Mendalek, N., Al-Haddad, K., ve Louis A.** 2001. Dessaint and Farhat Fnaiech “Nonlinear Control Strategy Applied to A Shunt Active Power Filter” *proceedings on IEEE conference*, pp.1877-1882.
- Nayak, B. P., ve Shaw, A.,** 2017.Reduction of Harmonics and Voltage Sag Compensation bySeries Active Power Filter, *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)* Zeal Education Society, Pune, India, Feb 24-26, 2017.
- Özdemir, Ş., Kuşdoğan, Ş.,** 2005. Doğrusal olmayan yüklerde aktif güç filtresi ile harmoniklerin filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, **20**, 225-232.
- Özkaya, H.,** 2007. Parallel Active Filter Design, Control, And Implementation, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Panigrahi, R., Panda, P. C., ve Subudhi, B. D.,** 2012. New Strategy For Generation Of Reference Current In Active Power Filters With Distortion In Line Voltage”, *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2012 7th IEEE International Conference*, DOI: 10.1109/ICIInfS.2012.6304814.
- Panigrahi, R., Panda, P. C., ve Subudhi, B.,** 2014. A robust extended complex kalman filter and sliding-mode control based shunt active power filter, *Electric Power Components and Systems.*, **42**, 520–532.
- Panigrahi, R., ve Subudhi, B.,** 2017. Performance Enhancement of Shunt Active Power Filter Using a Kalman Filter-Based H_{∞} Control Strategy, *IEEE Transactions On Power Electronics*, **32**, 2622-2630.
- Peng, F. Z., ve Lai, J. S.,** 1996. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems, *IEEE Trans on Instrumentation and measurement*, **45**, 293-297.
- Pereira, RR., Silva, CH., Silva, LEB., Torres, GL., ve Pinto, JOP.,** 2011. New Strategies for Application of Adaptive Filters in Active Power Filters, *IEEE Transactions On Industry Applications*, **47**, 1136-1141.
- Rejil C., Anzari, M., ve Arun K.** 2013. Design and Simulation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using SRF Theory, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, ISSN 2231-1297, **3**, 651-660.
- Qasim, M., Kanjiya, P., ve Khadkikar, V.,** 2014. Optimal Current Harmonic Extractor Based on Unified ADALINEs for Shunt Active Power Filters, *IEEE Transactions On Power Electronics*, **29**, 6383-6393.
- Salmerón, P., ve Litrán, S.P.,** 2010. A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, **25**, 1923 – 1931.
- Sasaki, H., Machida, T.,** 1971. A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic flux compensation consideration on basic design. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 2009-2019.
- Seng L.Y.,** 2002. Probabilistic assessments of voltage-sag occurrence and the evaluation of the dynamic voltage restorer capability, *Ph.D. thesis*, University of Manchester Institute of Science and Tech.

- Singh, B., Al-Haddad, K.,** 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **46**, 960-971.
- Shahbaz, M.,** 2012. Active Harmonics Filtering of Distributed AC System, *Master thesis*, Norwegian University of Science and Technology Department of Electrical Power Engineering, September, 2012.
- Sher, H. A., ve Eltamaly, A. M.,** 2011. Harmonics Reduction Techniques – A Survey”, *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, Vol. 4, N. 6 December 2011.
- Steela, K., ve Rajpurohit, B. S.,** “A Survey on Active power Filters Control Strategies” 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 1 – 6.
- Suresh, Y., Panda, A.K., Suresh, M.,** 2012. Real-time implementation of adaptive fuzzy hysteresis-band current control technique for shunt active power filter, *IET Power Electron.*, **5**, 1188–1195.
- Teke, A.,** 2011. Unified Power Quality Conditioner: Design, Simulation And Experimental Analysis, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Teke, A., Sarıbulut, L., Meral, M. E., Tümay, M.,** 2011. Active Power Filter: Review of Converter Topologies and Control Strategies, *Gazi University Journal of Science*, **24**, 283-289.
- Uçar, M.,** 2005. 3-fazlı 4-telli paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Uçar, F.,** 2012. Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması, *Yüksek lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Vahedi, H., Shojaei, A. A., Dessaint, L. A., ve Al-Haddad, K.,** “Reduced DA-Link Voltage Active Power Filter Using Modified PUC5 Converter”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 33, No. 2, February 2018.
- Vardar, K.,** 2011. Active Power Filters Based On Neural Networks For Power Quality, *Ph.D. thesis*, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural And Applied Sciences, İzmir.
- Wang, T., ve Fei, J.,** 2016. Adaptive Neural Control of Active Power Filter Using Fuzzy Sliding Mode Controller, *IEEE Access Digital Object Identifier*, **4**, 6816-6822.
- Yarkan, S., Toreyin, B.U., Qaraqe, K.A.** 2012. An online adaptive cooperation scheme for spectrum sensing based on a second-order statistical method, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **61**, 675–686.
- Yıldız, Ş. N.,** 2006. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Elektrik Enerjisinde Kalitenin Yükseltilmesi, *Yüksek lisans Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Yılmaz, M.,** 2006. Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yousfi, A., Allaoui, T., ve Chaker, A.,** 2015. An Advanced Control Approach for Five-level Shunt Selective Active Filter, *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015 3rd International.
- URL-1,** <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>.Türkiyede elektrik tüketimi 10 Mart 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Ali KARAMAN

E- mail: omerali_42@hotmail.com

Eğitim

DOKTORA

(2011–2018) Fırat Üniversitesi /Elazığ, Türkiye

*Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Elektrik Elektronik
Mühendisliği Ana Bilim Dalı.*

YÜKSEK LİSANS

(2007–2010) Fırat Üniversitesi /Elazığ, Türkiye

*Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi
Bölümü, Elektrik Makinaları ABD*

LİSANS

(2001–2005) Dicle Üniversitesi /Diyarbakır, Türkiye

*Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi
Bölümü, Elektrik Öğretmenliği*