



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**MAF FİLTRE ve HİSTEREZİS PWM TABANLI  
KONTROL ALGORİTMASININ BGKD'YE  
UYGULANMASI**

**Hacer ÜÇGÜN  
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ÖNAL**

**BİLECİK, 2019  
Ref.No: 10230391**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**MAF FİLTRE ve HİSTEREZİS PWM TABANLI  
KONTROL ALGORİTMASININ BGKD'YE  
UYGULANMASI**

**Hacer ÜÇGÜN  
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ÖNAL**

**BİLECİK, 2019**



**BİLECİK SEYH EDEBALI  
UNIVERSITY**

**Institute of Sciences  
Department of Energy Systems Engineering**

**MAF FILTER and HYSTERESIS PWM BASED CONTROL  
ALGORITHM for UPQC**

**Hacer UCGUN  
Master's Thesis**

**Thesis Advisor  
Asst. Prof. Dr. Yasemin ONAL**

**BİLECİK, 2019**



## BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

### FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

#### YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 25.12.2018 tarih ve ...75... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11.01.2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hacer ÜÇGÜN'ün "MAF Filtre ve Histeresis PWM tabanlı kontrol algoritmasının BGLD'e uygulanması..." başlıklı tez çalışması Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

#### JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI): Dr. Öğr. Üyesi YASEMİN ÖNAL

ÜYE: Doç. Dr. Ümmühan Bazarcan Filik

ÜYE: Dr. Öğr. Üyesi Ümit Cıfden TURHAL

#### ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## TEŞEKKÜR

Günümüzde kaliteli bir elektrik enerji sağlanması ve enerjide verimliliğin artırılması önemli bir sorun haline gelmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin kullanımı, elektrik iletim, dağıtım sistemine ve sisteme bağlı olan diğer yüklere ciddi hasarlar verebilmektedir. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler karşısında pasif filtrelerin dezavantajlarından dolayı yeni çözümler bulunmuştur. Son yıllarda elektrik enerji kalitesini ve verimliliğini artırmak için bilim insanları tarafından çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, alçak gerilim dağıtım seviyesinde güç kalitesi problemlerini düzeltmeye yönelik olarak geliştirilen birleşik güç kalite düzenleyici sisteminin tasarımı, denetimi anlatılmaktadır. Elektrik sistemlerinde güç kalitesi, harmonikler, dönüştürücüler, aktif güç filtreleri, birleşik güç kalite düzenleyicisi konuları ele alınmıştır. Ayrıca yapılan çalışmaların güvenliğini test etmek amacıyla analiz yöntemleri uygulanmıştır.

Tez çalışmalarım süresince engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her zaman yanımda olup beni destekleyen Sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ÖNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca hiçbir zaman maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan, beni sürekli motive eden anneme, babama, kardeşlerime, sabır ve anlayış gösteren sevgili eşime özellikle teşekkür ederim.

Hacer ÜÇGÜN

Ocak 2019

## ÖZET

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerji sistemlerinde kullanılan yükler çeşitlilik kazanmıştır. Doğrusal olmayan yükler güç kalitesi için önem arz etmektedir. Son yıllarda güç elektroniği teknolojilerinin etkisi ile enerji sistemlerindeki, doğrusal olmayan yüklerde artış görülmektedir. Bu artışlara paralel olarak enerji sistemlerindeki güç kalitesi problemlerinde de artışların meydana geldiği görülmektedir. Elektrik enerji sistemleri ve hassas endüstriyel yükler, güç kalitesi problemlerinden etkilenmektedir.

Güç kalitesi problemleri gerilim düşmeleri ve yükselmeleri, gerilim dalgalanmaları, akım ve gerilim harmonikleri, gerilim dengesizlikleri ve şebeke frekans değişimleridir. Elektrik enerjisinde güç kalitesi problemlerinin ortadan kaldırılması hem tüketiciler hem de üreticiler için büyük önem arz etmektedir. Günümüzde, güç kalitesi problemlerini ortadan kaldıran ve problemlere çözüm üreten cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar arasında pasif ve aktif güç filtreleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi (BGKD) güç kalitesi problemlerine ve harmoniklere karşı çözüm olarak geliştirilmiştir. BGKD, ortak doğru akım (DA) bara hattını kullanan iki adet gerilim kaynaklı evirici devresinin arka arkaya bağlanması ile oluşmaktadır. Bu eviricilerden birincisi, gerilim kaynağı olarak çalışan seri aktif güç filtresi ve ikincisi de akım kaynağı olarak çalışan paralel aktif güç filtresidir.

Bu tez çalışmasında, güç kalitesi problemlerine çözüm sunan BGKD sistemi içinsenkron referans yapı tabanlı yeni bir kontrol yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde, anahtarlama sinyallerinin elde edilmesinde histerezis PWM veya SVPWM teknikleri kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmaları PSIM paket programında yapılmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçlarından senkron referans yapı tabanlı önerilen MAF filtreli kontrol yönteminin, diğer kontrol yöntemlerine kıyasla güç kalitesi problemlerini gidermede daha başarılı olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç kalitesi problemleri; Aktif güç filtresi; Birleşik güç kalite düzenleyicisi; Harmonik kompanzasyonu; PSIM.

## ABSTRACT

The loads used in energy systems have gained diversity with the development of technology. The nonlinear loads is important for power quality. In recent years, nonlinear loads in energy systems have increased with the development of power electronic technologies. In parallel with these increases, power quality problems in energy systems have also increased. Electric energy systems and sensitive industrial loads are affected by power quality problems.

Power quality problems are voltage sags and swells, voltage fluctuations, current and voltage harmonics, voltage unbalance and grid frequency variations. Eliminating power quality problems in the electric energy systems is great importance for both user and producers. Nowadays, devices that eliminate the power quality problems and produce solutions to problems have been developed. Passive and active power filters are widely used between these devices. The unified power quality conditioner (UPQC) has been developed as a solution to power quality problems and harmonics. The UPQC is formed by the serial connection of two voltage source inverters circuits using the common DC link. The first of these inverters is the series active power filter which operates as a voltage source and the second is the parallel active power filter which works as a current source.

In this thesis, a new control method based on synchronous reference frame control is proposed for the UPQC system, which provides solution to power quality problems. In the proposed method, the hysteresis PWM or SVPWM techniques is used to obtain the switching signals. The PSIM package program has used in simulations. It is observed that the proposed control method with MAF filter based on synchronous reference frame is more successful in eliminating power quality problems compared to other control methods.

**Keywords:** Power quality problems; Active power filter; Unified power quality conditioner; Harmonic compensation; PSIM.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>.....</b>
<b>ÖZET.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>III</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>VII</b>
<b>TABLolar DİZİNİ .....</b>	<b>XII</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Taraması .....	3
<b>2.ELEKTRİK SİSTEMİNDE GÜÇ KALİTESİNİN SINIFLANDIRILMASI</b>	<b>8</b>
2.1. Geçici Dalgalanma .....	9
2.2. Kısa Süreli Değişimler .....	10
2.3. Uzun Süreli Değişimler .....	12
2.4. Gerilim Dengesizliği .....	12
2.5. Gerilim Dalgalanmaları .....	13
2.6. Frekans Değişimi.....	13
2.7. Dalga Şeklinde Bozulmalar .....	14
<b>3.HARMONİKLER .....</b>	<b>17</b>
3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu.....	17
3.2. Harmonik Çeşitleri .....	18
3.3. Harmonik Üreten Kaynaklar .....	20
3.3.1. Transformatörler .....	21
3.3.2. Floresan aydınlatmalar.....	21
3.3.3. Tek fazlı doğrultucular .....	21
3.3.4. 3 fazlı doğrultucular.....	22

3.3.5. Bilgisayarlar.....	24
3.4. Harmonik Standartları .....	24
3.4.1. Toplam harmonik bozulma.....	25
3.4.2. Harmonik bileşenin etkin (RMS) değeri .....	27
3.5. Harmoniklerin Sisteme Etkileri.....	27
3.6. Harmoniklerin Giderilme Yöntemleri .....	27
3.6.1. Pasif filtreler .....	28
3.6.2. Aktif güç filtreleri .....	29
<b>4.DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....</b>	<b>31</b>
4.1. AA/AA Dönüştürücüler .....	31
4.2. AA/DA Dönüştürücüler .....	32
4.3. DA/DA Dönüştürücüler .....	32
4.4. DA/AA Dönüştürücüler (Eviriciler).....	32
4.4.1. Evirici topolojisi .....	33
4.4.1. Bir fazlı eviriciler.....	33
4.4.2. Üç fazlı eviriciler .....	34
<b>5.BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİ.....</b>	<b>36</b>
5.1. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD).....	36
5.2. Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF).....	37
5.3. Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF) .....	39
5.4. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	40
5.4.1. ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi .....	41
5.4.2. ARG-T-SRY kontrol yöntemi.....	46
5.4.3. ARG-T-PBT kontrol yöntemi .....	48
5.4.4. SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	50
5.4.5. SRY-PBT kontrol yöntemi .....	51

5.4.6. SRY-SRY kontrol yöntemi.....	52
5.4.7. Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi.....	53
5.4.8. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	56
5.4.9. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi .....	57
5.4.10. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.....	61
5.4.11. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.....	64
<b>6. BGKD SİSTEMİNİN BİLGİSAYAR TABANLI MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU.....</b>	<b>66</b>
6.1. Seri AGF’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu.....	67
6.1.1. Seri AGF’de ARG-T kontrol yöntemi .....	68
6.1.2. Seri AGF’de SRY kontrol yöntemi .....	69
6.1.3. Seri AGF’de geliştirilen MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi .....	70
6.1.4. Seri AGF’de önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi .....	71
6.2. Paralel AGF’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu .....	72
6.2.1. Paralel AGF’de ARG-T kontrol yöntemi .....	74
6.2.2. Paralel AGF’de PBT kontrol yöntemi .....	75
6.2.3. Paralel AGF’de SRY kontrol yöntemi.....	75
6.2.4. Paralel AGF’de geliştirilen MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi.....	76
6.2.5. Paralel AGF’de önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi.....	77
6.3. BGKD’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu .....	79
6.3.1. ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi .....	81
6.3.2. ARG-T-SRY kontrol yöntemi.....	82
6.3.3. ARG-T-PBT kontrol yöntemi .....	83
6.3.4. SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	84
6.3.5. SRY-PBT kontrol yöntemi .....	85
6.3.6. SRY-SRY kontrol yöntemi.....	86

6.3.7. Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi.....	87
6.3.8. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	88
6.3.9. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi .....	89
6.3.10. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.....	90
6.3.11. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.....	91
<b>7. SONUÇLAR .....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 2.1. Gerilim genlik ve süresine göre güç kalitesi sınıflandırılması .....	8
Şekil 2.3. Kesinti ve kesintinin nedenleri .....	11
Şekil 2.4. Gerilim düşmesi.....	11
Şekil 2.5. Kısa süreli gerilim yükselmesi.....	12
Şekil 2.6. Uzun süreli değişimler .....	12
Şekil 2.7. Fazlar arası gerilim genliğinde oluşan dengesizlikler. ....	13
Şekil 2.8. Gerilim dalgalanması.....	13
Şekil 2.9. Frekans değişimi.....	14
Şekil 2.10. (a) 3-fazlı gerilim kaynaklı diyot doğrultucu bağlantı şekli (b) fazlar arası gerilim dalga şekli (c) kaynaktan çekilen akım dalga şekli. ....	14
Şekil 2.11. Konvertörün çalışması sonucu oluşan çentik. ....	15
Şekil 2.12. Gürültü.....	15
Şekil 2.13. Harmonikli dalga şekli.....	16
Şekil 3.1. Doğrusal olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları .....	17
Şekil 3.2. Bozucu bir dalga biçimi.....	17
Şekil 3.3. Doğrusal olmayan tristörlü yük akımları ve harmonik bileşenler. ....	18
Şekil 3.4. Tek fazlı transformatörün mıknatıslanma akımı.....	21
Şekil 3.5. Tek-fazlı 2-darbeleri bir doğrultucunun bağlantı şeması.....	22
Şekil 3.6. Kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı. ....	22
Şekil 3.7. 3-fazlı 6-darbeleri gerilim kaynaklı doğrultucunun bağlantı şeması.....	22
Şekil 3.8. Kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı. ....	23
Şekil 3.9. 3-fazlı 6-darbeleri akım kaynaklı tristörlü doğrultucunun bağlantı şeması ve ..	23
Şekil 3.10. Bilgisayarlara ait harmonik bozunum.....	24
Şekil 3.11. Harmonik üreteçleri, bilgisayarlar ve Güç elektroniği elemanları .....	24
Şekil 3.12. Pasif filtrenin bazı yapıları; yüksek geçiş (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece ayarlı filtre, (d) tek ayarlı, (e) çift ayarlı. ....	28
Şekil 3.13. Aktif güç filtresi devre şeması.....	30
Şekil 4.1. Dönüştürücüler. ....	31
Şekil 4.2. Tek fazlı AA kıyıcı temel devresi ve çıkış gerilimi dalga şekilleri .....	31
Şekil 4.3. AA/DA dönüştürücülerin temel blok şeması.....	32

Şekil 4.4. Bir fazlı evirici devresi ve çıkış sinyalleri. ....	34
Şekil 4.5. Bir fazlı evirici topolojisi.....	34
Şekil 4.6. Üç fazlı evirici topolojisi .....	35
Şekil 5.1. Birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok şeması. ....	37
Şekil 5.2. Paralel aktif güç filtresi genel şeması. ....	38
Şekil 5.3. Seri aktif güç filtresi genel şeması.....	39
Şekil 5.4. ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi. ....	42
Şekil 5.5. PLL kontrol devresi. ....	43
Şekil 5.6. Sinüzoidal PWM karşılaştırma devresi. ....	44
Şekil 5.7. Gerilim regülasyon bloğu. ....	45
Şekil 5.8. ARG-T-SRY kontrol yöntemi.....	46
Şekil 5.9. ARG-T-PBT kontrol yöntemi. ....	48
Şekil 5.10. SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	50
Şekil 5.11. SRY-PBT kontrol yöntemi. ....	51
Şekil 5.12. SRY-SRY kontrol yöntemi.....	52
Şekil 5.13. Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi.....	53
Şekil 5.14. Hareketli ortalama filtre (MAF) kontrol bloğu.....	55
Şekil 5.15. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi.....	56
Şekil 5.16. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi. ....	58
Şekil 5.17. Histerezis PWM kontrol tekniği blok şeması. ....	58
Şekil 5.18. Histerezis PWM akım ve gerilim dalgaları. ....	59
Şekil 5.19. Histerezis fonksiyonunun sinüzoidal yanıtı.....	60
Şekil 5.20. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.....	61
Şekil 5.21. STF kontrol bloğu.....	62
Şekil 5.22. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi. ....	64
Şekil 6.1. Seri aktif güç filtresi PSIM tasarımı. ....	67
Şekil 6.2. SAGF'de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ , $V_{kb}$ , $V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}$ , $V_{yb}$ , $V_{yc}$ ) ve yük akımları ( $i_{ya}$ , $i_{yb}$ , $i_{yc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları. ....	68
Şekil 6.3. ARG-T kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları. ....	69

<b>Şekil 6.4.</b> SAGF’de SRY kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.....	70
<b>Şekil 6.5.</b> Geliştirilen MAF filtreli ARG T kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.....	70
<b>Şekil 6.6.</b> Önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.....	71
<b>Şekil 6.7.</b> Paralel aktif güç filtresi PSIM tasarımı. ....	73
<b>Şekil 6.8.</b> PAGF’de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ , $V_{kb}$ , $V_{kc}$ ) ,kaynak akımları ( $i_{ka}$ , $i_{kb}$ , $i_{kc}$ ) ve yük akımları ( $i_{ya}$ , $i_{yb}$ , $i_{yc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları.	73
<b>Şekil 6.9.</b> ARG T kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.....	74
<b>Şekil 6.10.</b> PBT kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.....	75
<b>Şekil 6.11.</b> SRY kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.....	76
<b>Şekil 6.12.</b> Geliştirilen MAF filtreli ARG T kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.....	77
<b>Şekil 6.13.</b> Önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.....	78
<b>Şekil 6.14.</b> Birleşik güç kalite düzenleyicisi PSIM tasarımı.....	80
<b>Şekil 6.15.</b> BGKD’de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ , $V_{kb}$ , $V_{kc}$ ) ,yük gerilimleri ( $V_{ya}$ , $V_{yb}$ , $V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}$ , $i_{yb}$ , $i_{yc}$ ) ve kaynak akımları ( $i_{ka}$ , $i_{kb}$ , $i_{kc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları. ....	81

- Şekil 6.16.** ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 82
- Şekil 6.17.** ARG-T-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 83
- Şekil 6.18.** ARG-T-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 84
- Şekil 6.19.** SRY-ARG-T kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 85
- Şekil 6.20.** SRY-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 86
- Şekil 6.21.** SRY-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları..... 87
- Şekil 6.22.** Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları. .... 88
- Şekil 6.23.** Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları. .... 89
- Şekil 6.24.** Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları. .... 90
- Şekil 6.25.** Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları. .... 91

- Şekil 6.26.** Önerilen MAF filtreli SRY-SRY histerezis PWM kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları. .... 92
- Şekil 6.27.** Önerilen MAF filtreli SRY-SRY SVPWM kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.. .... 92
- Şekil 6.28.** Reaktif güç kompanzasyonu için, yük gerilimi ve kaynak akımı simülasyon sonuçları. .... 93

## TABLOLAR DİZİNİ

### Sayfa No

<b>Tablo 2.1.</b> IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması .....	9
<b>Tablo 3.1.</b> Güç sistemlerinde harmonik çeşitleri.....	19
<b>Tablo 3.2.</b> Harmonik frekansları ve faz sıraları.....	19
<b>Tablo 3.3.</b> Çeşitli doğrultucuların akım dalga şekilleri .....	23
<b>Tablo 3.4.</b> Harmonik gerilim sınır değerleri.....	25
<b>Tablo 3.5.</b> Harmonik akım sınır değerleri .....	25
<b>Tablo 4.1.</b> AA/DA dönüştürücülerin kontrol açısından karşılaştırılması.....	32
<b>Tablo 4.2.</b> Üç fazlı eviricinin anahtarlama durumları .....	35
<b>Tablo 5.1.</b> BGKD sistemini oluşturan PAGF ve SAGF birimlerinin görevleri. ....	40
<b>Tablo 5.2.</b> BGKD’de kullanılan kontrol yöntemleri .....	41
<b>Tablo 6.1.</b> BGKD simülasyon parametreleri.....	66
<b>Tablo 6.2.</b> Seri AGF’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması.....	72
<b>Tablo 6.3.</b> Paralel AGF’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması. ....	79
<b>Tablo 6.4.</b> BGKD’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması.....	95

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\alpha$	: Faz Kesme veya Faz Kontrol Açısı
$C$	: Kapasitans
$\cos\varphi$	: Güç Faktörü
$f$	: Frekans
$f_n$	: Harmonik Frekansı
$Hz$	: Frekans Birimi (Hertz)
$i_0$	: Akımın 0 Ekseni Bileşeni
$i_\alpha$	: Akımın $\alpha$ Ekseni Bileşeni
$i_{k\alpha}$	: Kaynak Akımın $\alpha$ Ekseni Bileşeni
$i_{kabc}$	: a, b, c Fazı Kaynak Akımları (A)
$i'_{kabc}$	: Üç Fazlı Referans Kaynak Akımları (A)
$i_{k\alpha}, i_{k\beta}$	: Kaynak Akımları $\alpha, \beta$ Ekseni Bileşenleri (A)
$\overline{i_{k\alpha}}$	: Kaynak Akımın “ $\alpha$ ” Ekseni Bileşeni (A)
$i_\beta$	: Akımın $\beta$ Ekseni Bileşeni
$i_{k\beta}$	: Kaynak Akımın $\beta$ Ekseni Bileşeni
$i_{kd}$	: Kaynak Akımı ‘p’ Ekseni Bileşeni (A)
$\overline{i_{kd}}$	: Kaynak Akımı “d” Ekseni Bileşeni (A)
$i_{dkayıp}$	: Kayıp Akımı “d” Ekseni Bileşeni (A)
$i_{kq}$	: Kaynak Akımı ‘q’ Ekseni Bileşeni (A)
$i_{fabc}$	: Üç Fazlı PAGF Filtre Akımları
$i'_{fabc}$	: Üç Fazlı Referans Filtre Akımları
$i_{yabc}$	: Üç Fazlı Yük Akımları
$i'_{yabc}$	: Üç Fazlı Referans Yük Akımları
$L$	: Endüktans
$n$	: Harmonik Derecesi
$P$	: Aktif Güç
$pf$	: Güç Faktörü
$pf_{\text{dist}}$	: Distorsiyon Güç Faktörü
$pu$	: Per-unit

$R$	: Omik Direnç
$S$	: Görünür Güç
$U$	: Efektif Faz Gerilimi
$Q$	: Reaktif Güç
$U_{d\alpha}$	: DA Çıkış Gerilimi, $U_{d\alpha} = f(\alpha)$
$U_d$	: Maksimum DA Çıkış Gerilimi,
$V$	: Gerilimin Efektif Değeri (V)
$VAr$	: Reaktif Güç Birimi
$V_{kabc}$	: Üç Fazlı Anlık Kaynak Gerilimleri (V)
$V'_{kabc}$	: Üç Fazlı Referans Kaynak Gerilimleri (V)
$V_{k\alpha}$	: Kaynak Geriliminin " $\alpha$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V'_{k\alpha}$	: Referans Kaynak Geriliminin " $\alpha$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V_{k\beta}$	: Kaynak Geriliminin " $\beta$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V'_{k\beta}$	: Referans Kaynak Geriliminin " $\beta$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V_{kd}$	: Kaynak Geriliminin " $d$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V'_{kd}$	: Referans Kaynak Geriliminin " $d$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V_{kq}$	: Kaynak Geriliminin " $q$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V'_{kq}$	: Referans Kaynak Geriliminin " $q$ " Ekseni Bileşeni (V)
$V_{Tabc}$	: Üç Fazlı Anlık Trafo Gerilimleri (V)
$V'_{Tabc}$	: Üç Fazlı Referans Trafo Gerilimleri (V)
$V_{yabc}$	: Üç Fazlı Anlık Yük Gerilimleri (V)
$V'_{yabc}$	: Üç Fazlı Referans Yük Gerilimleri (V)
$V_{in}$	: Şebeke Giriş Gerilimi
$V_n$	: Gerilim n. Harmonik Etkin Değeri (V)
$V_0$	: Gerilimin Sıfır Bileşen Değeri (V)
$V_1$	: Temel Frekanstaki Efektif Faz-Nötr Gerilimi (V)
$\omega$	: Açısal Frekans (rad/s)

### **Kısaltmalar**

AA	: Alternatif Akım
AGF	: Aktif Güç Filtresi
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
ANN	: Yapay Sinir Ağları
ANF	: Uyarlamalı Çentik Filtre (Adaptive Notch Filter)
ARGT	: Anlık Reaktif Güç Teorisi
BGKD	: Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi
BJT	: Çift Kutuplu Transistör (Bipolar Junction Transistör)
CPD	: Özel Güç Cihazları (Custom Power Devices)
DA	: Doğru Akım
DPC	: Doğrudan Güç Kontrolü
DVR	: Dinamik Gerilim İyileştirici
FACTS	: Esnek İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems )
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
HPWM	: Histerezis Denetleyici
HVDC	: Yüksek Gerilim Enerji İletim
HSF	: Seçici Filtre (Highly Selective Filter)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IGBT	: Kapı İzoleli Çift Kutuplu Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
ISCT	: Anlık Dizi Bileşen Teorisi
MAF	: Hareketli Ortalama Filtre (Moving Average Filter)
MPC	: Model Tahmini Güç Kontrolörü
OBN	: Ortak Bağlantı Noktası
OCC	: Bir Çevrim Kontrolörü
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
PAC	: Faz Açığı Kontrolörü
PBT	: Güç Dengeleme Teorisi

PI	: Oransal Integral
PLL	: Faz Kilitlemeli Döngü (Phase Locked Loop)
PWM	: Dalga Genişlik Modilasyonu (Pulse Width Modulation)
RMS	: Etkin Değer (Root Mean Square)
SAGF	: Seri Aktif Güç Filtresi
SCR	: Silikon Kontrollü Doğrultucu (Silicon controlled rectifier)
SMC	: Kayan Mod Kontrolörü
SPWM	: Sinüzoidal PWM
SRY	: Senkron Referans Yapı
STF	: Kendi Kendini Ayarlayan Filtre (Self Tuning Filter)
STATCOM:	Statik Senkron Seri Kompanzatör
SVC	: Statik Senkron Kompanzatör
SVPWM:	Uzay Vektör PWM
TDD	: Toplam Talep Bozulma (Total Demand Distortion)
THB	: Toplam Harmonik Bozulma (THD: Total Harmonic Distortion)
TIHD	: Toplam Ara Harmonik Bozulma (Total Interharmonic Distortion)
TSHD	: Toplam Alt Harmonik Bozulma (Total Subharmonic Distortion)
UPFC	: Birleşik Güç Akış Denetleyicisi
UVTT	: Birim Vektör Tekniği
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre
ZDPC	: Sıfır Doğrudan Güç Kontrol

## 1. GİRİŞ

Güç kalitesi, elektronik cihazların ve bilgisayar sistemlerinin çoğalmasıyla tüketici ve üreticiler için önemli bir faktör haline gelmiştir. Kaliteli elektrik enerjisi, sistemin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekans değerlerini koruması, dalga şeklinin saf sinüs biçimde olması olarak tanımlanmaktadır. İstenilen büyüklükte ve frekansta düzgün, kesintisiz sinüzoidal gerilim tüketiciye daima sağlanmalıdır (Gopal ve Yarangula, 2014).

Son yıllarda konut, ticari ve endüstriyel sistemlere bağlanan doğrusal olmayan yüklerin artması nedeniyle, enerji sistemindeki harmonik önemli ölçüde artmıştır. Kullanılan bazı güç elektroniği cihazları (SCR, MOSFET, BJT ve IGBT) doğrusal olmayan yük gibi davranmaktadır. Doğrusal olmayan yükler şebekede güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır. Güç kalitesi problemleri elektrik enerjisi üreten firmalar ve son kullanıcı müşteriler için ciddi bir endişe sebebi olmaktadır. Öte yandan, enerji sistemlerinde kaliteli bir güç için saf sinüzoidal bir besleme gerilimi gerekmektedir. Dağıtım sistemleri ve endüstrilerindeki doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan, harmonikler, gerilim kırışımları, gerilimde dengesizlikler, gerilimde düşmeler, gerilimde yükselmeler, dalga şeklinde bozulmalar, gerilimde dalgalanmalar ve şebeke frekans değişimleri gibi güç kalitesi (PQ) problemleri büyük sorunlar meydana getirmektedir (Silva, vd., 2008; Ye vd., 2018a).

Günümüzde yarı iletken anahtar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, güç kalitesi problemlerini telafi etmek için şebekeye bağlanan birçok donanım geliştirilmiştir. Bu donanımlar pasif ve aktif filtre teknikleri olarak sınıflandırılabilir. pasif filtrelerin (R-C veya L-C filtreleri), çok fazla yer kaplamaları, ağırlıklarının çok olması, sık sık bakım gerektirmeleri ve sabit bir kompanzasyon imkanı sunmaları gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır (Silva, vd., 2008).

Güç kalitesi problemleri için modern güç elektroniği tabanlı özel güç cihazları CPD (Custom Power Devices) adı verilen yeni bir teknoloji geliştirilmiştir (Perez, vd., 2016). Bu cihazlar, güç kaynağının güvenilirliğini ve kalitesini arttırmak için dağıtım sistemlerine uygulanmaktadır. CPD'ler arasında; esnek alternatif akım iletim sistemleri FACTS (Flexible AC Transmission Sytems) (Johal ve Divan, 2007), statik VAR kompanzatorleri (SVC) (Pereira, vd., 2014) ve dağıtım şebekelerinde kullanılan cihazlar Aktif Güç Filtreleri (AGF) (Bosch, vd., 2018), dinamik gerilim iyileştiricileri (DVR)

(Mongkol, vd., 2017), birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicisi (BGKD) (Deshpand, vd., 2013; Lu, vd., 2016) yer almaktadır. FACTS, SVC, DVR sistemleri reaktif güç problemleri çözerken harmonikli akım problemlerine neden olmaktadır. Bu durumun çözümü; bu sistemler için boyut ve maliyet artışına sebep olan transformatör bağlantılarını gerektirir. En son geliştirilen aygıtlar ise evirici tabanlıdır. Bunların en çok kullanılanları statik senkron seri kompanzator (STATCOM) (Singh ve Arya, 2013) ve birleştirilmiş güç kalite düzenleyicisidir (BGKD) (Deshpand, vd., 2013).

Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi, aynı anda kaynak gerilimini ve yük akımındaki harmonikleri filtrelemek için kullanılan aktif güç filtre sistemidir. Başka bir deyişle BGKD, kritik yükleri güç sistemi üzerinden yayılan gerilim bozulmasına karşı korur ve kaynak akımının sinüzoidal dengeli olmasını sağlamak için yükleri dengelemektedir (Ye vd., 2018a). BGKD, ortak bir DA bara hattını kullanarak bir transformatör yardımıyla sisteme seri bağlı seri aktif güç filtresi (SAGF) ve yüke paralel bağlı paralel aktif güç filtresinin (PAGF) birlikte kullanılması ile oluşmaktadır. PAGF kaynak akım harmoniklerinin giderilmesi, nötr akım kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ve DA bara gerilim regülasyonu yapmaktadır. Gerilim bazlı olarak çalışan SAGF gerilimde dalgalanmaları, üç faz gerilim kompanzasyonu, gerilimde düşme ve yükselmeleri gibi gerilim dengesizliklerini gidermek amacıyla kullanılmaktadırlar (Feng ve Wang, 2017; Modesto, vd., 2016).

Literatürde, BGKD'de kullanılan kontrol yöntemleri arasında; pq yöntemi olarak da adlandırılan geleneksel anlık reaktif güç teorisi (ARGT) (Panchbhai, vd., 2017; Harirchi ve Simoes, 2018), senkron referans yapı (SRY) yöntemi (Senthilnathan ve Annapoorani, 2016; Vinnakoti ve Kota, 2017), geliştirilmiş PQ yöntemi (Guihua, vd., 2017), güç dengeleme yöntemi (PBT) (Shabib, vd., 2017), hareketli ortalama filtre (MAF) (Devassy ve Singh, 2018; Silva ve Negro, 2018), kendi kendini ayarlayan filtre (STF) (Ghamri, vd., 2012), seçici filtre (HSF) (Djazia, vd., 2015), Doğrudan güç kontrolü (DPC) (Mesbahia, vd., 2014) ve uyarlamalı çentik filtre (ANF) (Abardeh ve Ghazi, 2010) bulunmaktadır. BGKD'de kullanılan ileri kontrol ve sinyal işleme yöntemleri arasında, bulanık mantık denetleyicisi (Ngotakun, vd., 2012), yapay sinir ağları (ANN) yöntemi (Kinhal, vd., 2011), bir çevrim kontrol yöntemi (OCC) (Vadirajacharya, vd., 2006) faz açısı yöntemi (PAC) (Ye vd., 2018a), kayan mod yöntemi (SMC) (Patjoshi, vd., 2017),  $H_{\infty}$  tabanlı model eşleştirme yöntemi (Li, vd.,

2006), model tahmini güç yöntemi (MPC) (Mamdouh, vd., 2014), birim vektör şablon (UVTT) tekniği ve anlık dizi bileşen teorisi (ISCT) (Pal, vd., 2011) bulunmaktadır.

### 1.1. Literatür Taraması

Birleşik güç kalite düzenleyicisi ilk olarak birleşik güç akış denetleyicisi (UPFC- Unified Power Flow Controller) adıyla Gyugyi tarafından 1992'de ortaya atılmıştır (Gyugyi, 1992).

Fujita ve Akagi çalışmalarında, (Fujita ve Akagi, 1996) birleşik güç kalite düzenleyicisinin güç dağıtım sistemlerinde veya endüstriyel güç sistemlerinde kurulum noktasında güç kalitesini artırma kapasitesine sahip olduğuna değinmişlerdir. BGKD'nin gerilim titreşimini, gerilim dengesizliğini, reaktif gücü, negatif dizi akımını ve harmonikleri telafi etmek ana amacıdır. Bu makale BGKD'nin kontrol stratejisi, anlık aktif ve reaktif gücün akışına odaklanarak ele almaktadır.

Özdemir ve arkadaşlarının çalışmalarında (Özdemir, vd., 2006), üç fazlı paralel aktif güç filtresi (AGF) için yeni bir kontrol yöntemi olan yük ve filtre akımı ölçümünü önermişlerdir. Anlık reaktif güç yöntemine (ARGT) dayanan kontrol yöntemi, konvansiyonel kontrol yaklaşımında gerekli olan akım sensörlerinin sayısını azaltmak için sadece kaynak akımlarının ölçülmesini yeterli olduğuna değinmişlerdir. Kontrol tekniği, Matlab / Simulink programı ile simüle edilmiştir.

Silva ve arkadaşlarının çalışmalarında (Silva, vd., 2008) seri-paralel aktif güç hattı iyileştirmeli üç fazlı hat etkileşimli efektif bir güç faktörünü düzeltme, yük harmonik akımı bastırma ve çıkış gerilimregülasyonuna olanak tanıyan senkron referans çerçevesi (SRY) tabanlı denetleyici kontrol yöntemleri sunmuşlardır.

Wang ve arkadaşlarının çalışmalarında (Wang, vd., 2009) yük akımını ve kaynak gerilimini aynı anda düzeltebilen birleştirilmiş güç kalite düzenleyicisinin çalışma prensibini tanıtmışlardır. BGKD'nin paralel kısmını algılamak için dq0 dönüşüm yöntemini kullanarak yük akımı ve kaynak gerilimindeki bozulmalar tespit edilmiştir. DA kondansatörlerin gerilimini düzeltmek için PI kontrol stratejisi önerilmiştir. BGKD'nin doğrusal olmayan yükten kaynaklanan kaynak gerilimindeki ve yük akımındaki bozulmaları telafi ettiği görülmüştür.

Abardeh ve Ghazi çalışmalarında (Abardeh ve Ghazi, 2010), birleşik güç kalite düzenleyicisi ortak bir DA bara kondansatörü üzerinden kademeli olarak bağlanan seri ve paralel aktif güç filtresinden (AGF) oluştuğuna ve referans dalga formları eldesi için

uyarlamalı çentik filtre (ANF) sistemine dayanan yeni bir stratejisine değinmişlerdir. Önerilen yöntem, BGKD'nin her fazında referans dalga formlarını oluşturmak için üç ayrı ANF kullanılmıştır.

Kesler çalışmasında (Kesler, 2010) dengesiz ve çarpık yük koşullarında üç fazlı dört kablolu birleşik güç kalitesi düzenleyici aracılığıyla güç kalitesi (PQ) sorunlarını telafi etmek için yeni bir senkron referans yapı (SRY) tabanlı kontrol yöntemini sunmuştur. Önerilen sistem, dengesiz ve çarpık yük koşulları altında güç dağıtım sistemlerinde ortak kuplaj noktasında güç kalitesinin arttırılabilirliği, Matlab/Simulink temelli simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir. Yaklaşım ile BGKD donanım prototipi deneysel çalışma yoluyla doğrulanmıştır.

Ghamri ve arkadaşları çalışmalarında (Ghamri, vd., 2012), üç fazlı paralel aktif güç filtresinin DA bara geriliminin kayan mod yönteminin simülasyon ve deneysel çalışması sunulmaktadır. Kayan mod yöntemini, güç kalitesini ve reaktif gücün tüketimini minimuma indirmek için kullanmışlardır. Referans akımları tanımlamak için kullanılan algoritma, kendi kendini ayarlayan filtre (STF) sistemine dayanmaktadır.

Kamble ve Waware çalışmalarında (Kamble ve Waware, 2013), birleşik güç kalite düzenleyicisi kullanılarak gerilim ve akım harmoniklerini azaltmak için seri aktif filtre kontrolü için dq0 yaklaşımını, paralel aktif filtre için ARGT yöntemini kullanmışlardır. Bu kontrol stratejisi, daha az sayıda ölçüm gerektirmektedir.

Gohil ve arkadaşları (Gohil, vd., 2013), gerilim harmonikleri, gerilim sarkması, gerilim yükselmesi ve akım harmoniklerinin kompanzasyonu için birim vektör şablonu oluşturma (UVTT) tekniği ile çalışan üç fazlı bir BGKD için kontrol tekniği geliştirmişlerdir.

Vengatesh ve Elango çalışmalarında (Vengatesh ve Elango, 2013), rüzgar enerji santrallerinde güç kalite iyileştirmesi için, yıldız bağlantılı trafo esaslı birleşik güç kalite düzenleyicisini önermişlerdir. Bu çalışmanın üç fazlı üç telli BGKD, yıldız bağlı bir transformatör ve bir LC filtreden oluştuğuna değinmişlerdir. DA bara kontrol stratejisi olarak bulanık mantık denetleyicisi kullandıklarına ve bu hibrit yaklaşımın, dengesiz kaynak gerilimi durumunda BGKD'nin performansını önemli ölçüde arttırdığına değinmişlerdir.

Djazia ve arkadaşları çalışmalarında (Djazia, vd., 2015), paralel aktif güç filtresi (PAGF) kullanılarak harmoniklerin ve reaktif gücün aktif telafisi için yeni bir doğrudan

güç kontrolü (ZDPC) tekniği önermişlerdir. Hat geriliminin ve akımının harmonik ve temel bileşenlerini ayırmak için seçici bir filtre (HSF) kullanmışlardır. Önerilen HSF ZDPC stratejinin doğrudan güç kontrolü tekniği ile kıyaslandığında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Hemram ve Tudu çalışmalarında (Hemram ve Tudu, 2015), güç elektroniği tabanlı ekipmanların geniş çapta kullanılmasıyla beraberinde güç kalitesi çok önemli bir faktör haline geldiğine ve güç kalitesinin artırılması için geleneksel ekipmanların yetersiz olduğuna değinmişlerdir. Birleşik güç kalite düzenleyicinin iki farklı kontrol yöntemi yardımıyla aynı anda gerilim ve akım üzerindeki problemleri giderebildiğine değinmişlerdir. Seri AGF olarak birim vektör şablonu (UVTT) ve paralel AGF için anlık reaktif güç kontrol yöntemini önermişlerdir.

Rauf ve arkadaşları çalışmalarında (Rauf, vd., 2016), BGKD için yeni bir topolojik yapılandırma önerilmektedir. Genel olarak, üç fazlı üç telli BGKD'nin güç yapısı, arka arkaya bağlanan iki adet altı-invertörden oluşurken bu konfigürasyon için, on iki anahtardan, seri inverter anahtarlarından altısı çoğu zaman yetersiz kaldığına değinmişlerdir. Önerilen topoloji sadece on anahtar kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. On iki ve dokuz anahtar tabanlı BGKD sistem konfigürasyonlarıyla karşılaştırarak ayrıntılı bir analitik çalışma ve değerlendirme sunmuşlardır. Çalışmayı deneysel araştırma yoluyla doğrulamışlardır.

Lu ve arkadaşları çalışmalarında (Lu, vd., 2016), güç faktörü için etkili bir dengeleme cihazı olarak BGKD ve ortak bağlantı noktasının ortaya çıkardığı bağlantı problemlerini çözmek için yeni bir uzay vektörü modülasyon yönteminin önermişlerdir. Bu çalışmada tek fazlı üç telli BGKD'nin (TL-BGKD) kontrolüne ve üç fazlı gerilim kaynağı dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılan uzay vektörü modülasyon yöntemine değinilmiştir.

Patjoshi ve Mahapatra çalışmalarında (Patjoshi ve Mahapatra, 2017), mevcut harmonikler ve gerilim dengesizlikleri için BGKD'de DA bara gerilimini kontrol etmek için doğrusal olmayan kayan mod tabanlı bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Her iki dönüştürücü için referans akım ve gerilim hesaplanmasında senkron referans yapı (SRY) kontrol tekniği kullanılmıştır.

Hafezi ve arkadaşları çalışmalarında (Hafezi, vd., 2017) birçok Avrupa ülkesinde alçak gerilim (AG) dağıtım ağlarındaki güç kalitesi, özellikle yenilenebilir

enerji üretiminin güçlü bir şekilde var olduğuna değinmişlerdir. Böyle bir sistemin güç kalitesi seviyesini artırabilecek yeni bir çözüm olarak açık birleşik güç kalitesi düzeltici (Açık-BGKD) önermişlerdir. Makale, akıllı demo şebekesi projesi kapsamında Brescia (İtalya) şehrinde gerçek bir AG dağıtım şebekesine kurulan açık-BGKD ile ilgili tasarım, simülasyon ve uygulamasına değinmiştir.

Ye ve arkadaşları çalışmalarında (Ye, vd., 2018b), sistem dengeleme gereksinimleri nedeniyle BGKD'deki konvertörlerin optimal volt-amper (VA) değerleri incelenmişlerdir. Faz açısı kontrolü (PAC), karşılık gelen yer değiştirme açısını ayarlayarak çevrimiçi VA yüklemesini değiştirme özelliğine sahip olduğu şekilde tartışılmış ve gösterilmiştir. BGKD'de iki farklı kontrol yöntemi kullanmışlardır. Önerilen BGKD, optimizasyon algoritmasının avantajını vurgulamak için diğer yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve gerçek zamanlı kontrol donanım sonuçları ile doğrulanmıştır.

Devassy ve Singh çalışmalarında (Devassy ve Singh, 2018), üç fazlı tek kademeli solar fotovoltaik entegre birleşik güç kalitesi düzelticisinin (PV-BGKD) tasarım ve performans analizini ele almışlardır. PV-BGKD'nin daha iyi performansı için yük aktif akım bileşeninin çıkarılması için hareketli ortalama filtreye (MAF) dayalı geliştirilmiş senkron referans yapı yöntemi kullanmışlardır.

2. Bölümde: Elektrik enerji sisteminde güç kalitesi problemleri açıklanmakta ve sınıflandırılması yapılmaktadır. Enerji sistemlerinde sık karşılaşılan güç kalitesi problemleri arasında harmonikler, gerilimde dalgalanmalar, gerilimde düşme ve yükselmeleri açıklanmaktadır.

3. Bölümde: Harmonikler genel olarak tanımlanarak harmoniklerin çeşitlerine değinilmektedir. Harmonik üreten kaynaklar incelenmekte, harmonik standartları açıklanmakta ve harmoniklerin enerji sistemine etkileri özetlenmektedir.

4. Bölümde: Güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan topolojiler açıklanmaktadır.

5. Bölümde: Paralel aktif güç filtresi, seri aktif güç filtresi ve birleşik güç kalite düzenleyici sistemleri açıklanmakta ve işlevleri açıklanmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyicisinde kullanılan kontrol yöntemleri ve önerilen MAF filtreli senkron referans yapı yöntemi açıklanarak matematiksel modellenmesi yapılmaktadır.

6. Bölümde Seri aktif güç filtresi, paralel aktif güç filtresi ve birleşik güç kalite düzenleyici sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu yapılmaktadır. Geleneksel kontrol yöntemleri ve önerilen senkron referans yapı kontrol yönteminin PSIM paket programında analizi yapılmaktave karşılaştırılmaktadır.

## 2. ELEKTRİK SİSTEMİNDE GÜÇ KALİTESİNİN SINIFLANDIRILMASI

Güç kalitesi; gerilim ve akım dalga formlarının bozulmaya uğramamış, istenilen frekans ve genlikte olması durumunda kaliteli bir elektrik enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda ise güç kalitesi; akım kalitesi ve gerilim kalitesi arasındaki ilişkiyle bütünleşen elektromanyetik uyumluluk olarak tanımlanmaktadır (Elphick, vd., 2017).

Akım, gerilim ve frekans sorunlar birçok güç kalitesi problemlerini beraberinde getirmekte ve tüketicinin donanımında arızaya yol açmaktadır. Güç kalitesi sorunları, kullanıcı cihazlarının yanlış veya hiç çalışmamasına neden olmaktadır. Gerilim değişimleri (kesinti, çökme ve yükselme), gerilimde dengesizlik, dalga şeklinde bozulma (harmonik, çentik ve gürültü), gerilimde dalgalanmalar ve şebeke frekans değişimleri güç kalitesi problemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Graovac, vd., 2007).

Güç kalitesi problemlerini gidermek ve çözümler üretmek için sistemi iyi analiz etmek ve sorunları iyi çözmek gerekmektedir. Tablo 2.1'de IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin kategorik sınıflandırılması verilmektedir. Güç kalitesi; geçici dalgalanma, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, dalga şekli bozulmaları, gerilim dengesizliği, gerilim dalgalanması, frekans değişimleri olarak sınıflandırılmaktadır (Teke, vd., 2011).

Genlik	Çok kısa süreli gerilim yükselmesi	Kısa süreli gerilim yükselmesi	Uzun süreli gerilim yükselmesi	Çok uzun süreli gerilim yükselmesi
	Normal çalışma gerilimi			
110 %				
90 %	Çok kısa süreli gerilim düşmesi	Kısa süreli gerilim düşmesi	Uzun süreli gerilim düşmesi	Çok uzun süreli gerilim düşmesi
	1-3 Çevrim	1-3 Dakika	1-3 Saat	Süre

**Şekil 2.1.** Gerilim genlik ve süresine göre güç kalitesi sınıflandırılması (Kesler, 2010).

Gerilim genliği temel alınarak yapılan sınıflandırma 3 bölgeden oluşmaktadır. Bunlar; kesinti; uzun veya kısa süreli olarak gerilim genliğinin etkin değerinin sıfıra düşmesi ile oluşmaktadır. Bu problem en sert güç kalitesi problemleri arasındadır. Çökme; uzun veya kısa süreli olarak, kaynak tarafında oluşabilen hatalardan veya büyük yüklerin sisteme dahil edilmesi ile meydana gelmektedir. Gerilim genliğinin normal

değerinin %90'nın altına düşmesi ile oluşan bir güç kalitesi problemidir. Yükselme; uzun veya kısa süreli olarak gerilim genliğinin normal değerinin %110'nun üstüne çıkması ile oluşan bir güç kalitesi problemidir (Jung, vd., 2018).

**Tablo 2.1.** IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması (IEEE PES, 2014).

Güç Kalitesi Problemleri		Süresi	Gerilim genliği	
1. Geçici Dalgalanma	Dürtü	Nano saniye	< 50ns	-
		Mikro saniye	50ns-1ms	-
		Mili saniye	>1 ms	-
	Salınım	Düşük frekans	0.3-50 ms	0-4 pu
		Orta frekans	20 $\mu$ s	0-8 pu
		Yüksek frekans	5 $\mu$ s	0-4 pu
2. Kısa süreli değişimler	Anlık	Kesintiler	0.5-30 çevrim	<0.1 pu
		Çökmeler	0.5-30 çevrim	0.1-0.9 pu
		Yükselmeler	0.5-30 çevrim	1.1-1.8 pu
	Kısa süreli	Kesintiler	30 çevrim-3s	<0.1 pu
		Çökmeler	30 çevrim-3s	0.1-0.9 pu
		Yükselmeler	30 çevrim-3s	1.1-1.4 pu
	Geçici	Kesintiler	3s-1 dk.	<0.1 pu
		Çökmeler	3s-1 dk.	0.1-0.9 pu
		Yükselmeler	3s-1 dk.	1.1-1.2 pu
3. Uzun süreli değişimler	Kesintiler		>1 dk	0.0 pu
	Gerilim düşmeleri		>1 dk	0.8-0.9 pu
	Gerilim yükselmeleri		>1 dk	1.1-1.2 pu
4. Dalga şeklinde bozulmalar	DA seviyesi		Kalıcı durum	0-0.1 %
	Harmonikler		Kalıcı durum	0-20 %
	Ara Harmonikler		Kalıcı durum	0-2 %
	Çentik		Kalıcı durum	-
	Gürültü		Kalıcı durum	0-1 %
5. Gerilim dengesizliği		Kalıcı durum	0.5-2%	
6. Gerilim dalgalanması		Aralıklı	0.1-7 % (< 25Hz )	
7. Frekans değişimleri		-	< 10 s	

### 2.1. Geçici Dalgalanma

Geçici dalgalanma, dürtü ve salınım olarak iki şekilde oluşmaktadır. Dürtü etkisi, güç sistem hatlarında akım veya gerilim üzerinde çok kısa anlık bir değişim

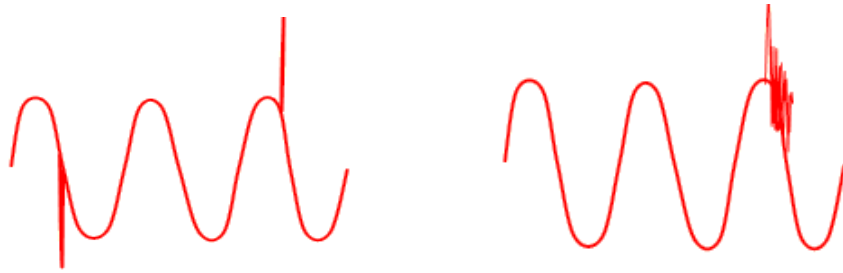
olarak tanımlanmaktadır. Dürtü olayı, kondansatör şarjı, elektromanyetik cihazların ilk kalkınma anları veya iletim hatlarında yıldırım etkisi ile oluşan anlık akım ve gerilim olaylarıdır (Fuchs ve Masoum, 2008).

Anlık transiyentler, çok küçük süreli ( $<0.5$  devir) dalgalanmalardır.

- Anahtarlama olayları, yıldırımlar, kontaklar arası arklar vs. nedeniyle meydana gelmektedir. Şiddetin büyüklüğü ve enerjisine göre cihazda hasara sebep olabilir.

Osilasyonlu transiyentler, akım veya gerilim dalgası üzerine binmiş yüksek frekanslı ve kısa süreli dalgalanmalardır.

- Transformatörlerin enerjilenmesi ve anahtarlama durumlarında meydana gelirler (Graovac, vd., 2007).



**Şekil 2.2.** Geçici dalgalanma (Kumawat, vd., 2017).

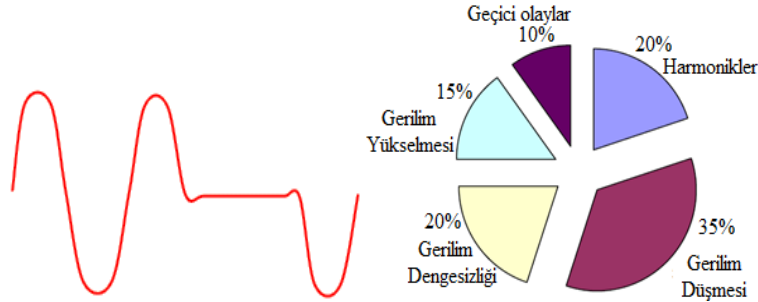
Şebekedeki geçici dalgalanmalar, anahtarlama ve yıldırım olayları yüzünden sisteme fazladan enerji enjekte edilmesiyle oluşmaktadır. Geçici olaylardan kaynaklanan problemlere çözüm olarak şebekeye izolasyon trafoları, aktif filtreler, pasif filtreler ve kesiciler bağlanmalıdır (Jung, vd., 2018).

## 2.2. Kısa Süreli Değişimler

Kısa süreli değişimler, güç sistemlerinde gerilim genliğinde veya akımda, 0.5 çevrim ile 1 dakika arasında meydana gelen güç kalitesi problemleridir. Gerilim çökmeleri ve kısa süreli kesintiler olarak ikiye ayrılmaktadır. IEEE-1159 (IEEE PES, 2014) standardında, kesinti 0.5-30 çevrim arasında ise anlık, 30 çevrim-3s arasında ise kısa süreli ve 3s-1 dk. arasında ise geçici kesinti olarak alt kategorilere ayrılarak sınırları belirtilmektedir (Alexander ve Thompson, 2007).

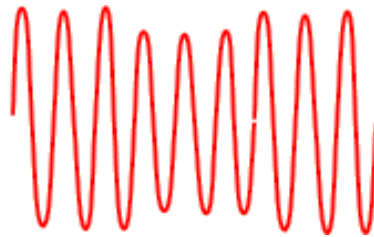
Kesinti, en az yarım dalga boyu süresince gerilimin sıfır değerini alması olayına denir. Kesintiler güç sistemindeki hatalarından, donanımdaki arızalardan ve kontrol

sistemlerindeki bozulmalardan dolayı oluşmaktadır. Gerilimin genliğinin mevcut değerinin %10'undan daha az olduğu durumlarda ölçülmektedir. Sistemde bir hatadan dolayı oluşan kesilmenin süresi, koruma cihazının devreye girme süresiyle belirlenmektedir (Kumawat, vd., 2017).



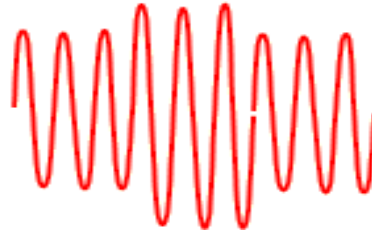
**Şekil 2.3.** Kesinti ve kesintinin nedenleri (Kumawat, vd., 2017).

Gerilim düşmeleri, gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinin %80'den daha büyük düşmeler görülmesi olayıdır. Şebeke yetersiz kaldığında, aşırı yüklenmelerde, büyük yüklerin devreye girmesinde gerilim düşmeleri oluşmaktadır. Gerilim düşmesi kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına, motor hızının değişmesine veya motorun durmasına, bilgisayar sistemlerinde arızalara ve anahtarlama arızalarına neden olmaktadır (Jung, vd., 2018).



**Şekil 2.4.** Gerilim düşmesi (Kumawat, vd., 2017).

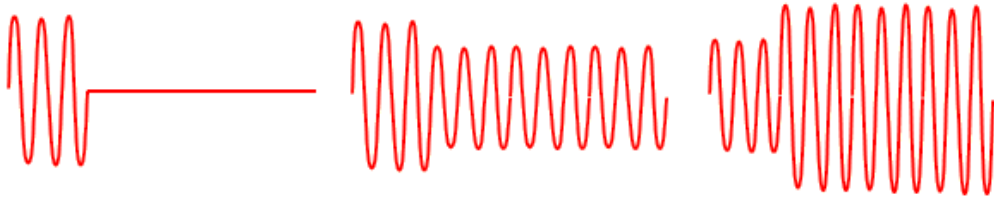
Gerilim yükselmeleri, gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinin %110'dan daha büyük değerlere çıkması olayıdır. Gerilim yükselmeleri gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesi aynı anda gerçekleşebilmektedir. Şebekeden büyük çaplı bir yük çıkarılması ya da büyük bir kapasitör ilave edilmesi de gerilim yükselmesine neden olmaktadır (Carvalho, vd., 2008).



**Şekil 2.5.** Kısa süreli gerilim yükselmesi (Carvalho, vd., 2008).

### 2.3. Uzun Süreli Değişimler

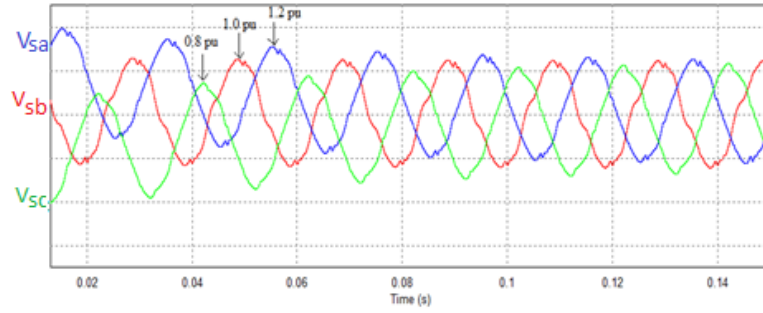
Uzun süreli değişimler, IEEE-1159 standardında gerilim genliğinin 1 dakikadan uzun süre (0.0 pu) sıfıra düşmesi durumunda kesinti, gerilim genliğinin 1 dakikadan uzun süre 0.8 pu 0.9 pu değerlerinde değişmesi durumunda gerilim düşmesi, gerilim genliğinin 1 dakikadan uzun süre 1.1 pu-1.2 pu değerlerinde değişmesi durumunda gerilim yükselmesi olarak sınıflandırılmaktadır. Uzun süreli değişimler; kalıcı kesinti, düşük gerilim ve yüksek gerilim Şekil 2.6’da gösterilmektedir (Kumawat, vd., 2017).



**Şekil 2.6.** Uzun süreli değişimler

### 2.4. Gerilim Dengesizliği

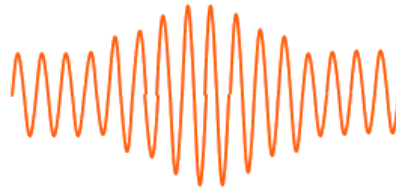
Gerilim dengesizliği, 3-fazlı sistemlerde fazlar arasında gerilim genliğinin ve şebeke frekansının farklılık göstermesi olarak tanımlanmakta ve yüzde olarak ifade edilmektedir. %2’den düşük gerilim dengesizlikleri, çoğunlukla üç fazlı sistemler üzerindeki tek fazlı yüklerdir. Büyük problem oluşturan gerilim dengesizlikleri (%5’ten büyük), üç fazlı bir yükün veya üç fazlı bir kapasitör grubunun, tek faza kaldığı durumda meydana gelmektedir (Suslov, vd., 2014).



**Şekil 2.7.** Fazlar arası gerilim genliğinde oluşan dengesizlikler.

### 2.5. Gerilim Dalgalanmaları

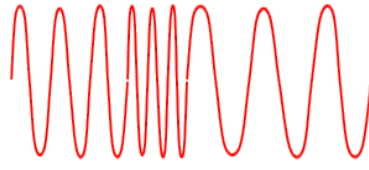
Gerilim dalgalanmaları, gerilimin periyodik olarak 6-7 tam dalga süresince %90-%110 aralığında değişmesi olayıdır. Ark fırınları, vinçler ve pistonlu pompalar gibi dalgalı aşırı yüklerden kaynaklanmaktadır. Gerilim dalgalanmaları, motor sürücülerini ve elektronik elemanları olumsuz yönde etkilemekte, cihazların ömrünü kısaltmakta ve kontrol elemanlarında kararsızlıklar meydana getirmektedirler (Jung, vd., 2018).



**Şekil 2.8.** Gerilim dalgalanması (Alexander ve Thompson, 2007).

### 2.6. Frekans Değişimi

Frekans değişimi, şebeke frekansının anma değerinden sapması olayıdır. Şebeke ve jeneratörlerde frekans değişimi, ayar düzensizliklerinden kaynaklanmaktadır. Güç frekansı değişimleri, 50 Hz veya 60 Hz nominal değerleriyle belirlenen güç sisteminin temel frekansından sapma olarak ifade edilmektedir. Frekans değişimleri, iletim sisteminin büyük bir kısmında arızalara, geniş ölçekli yüklerin veya büyük güçlü generatörlerin devre dışı kalmasına neden olabilir (Serban, vd., 2017).

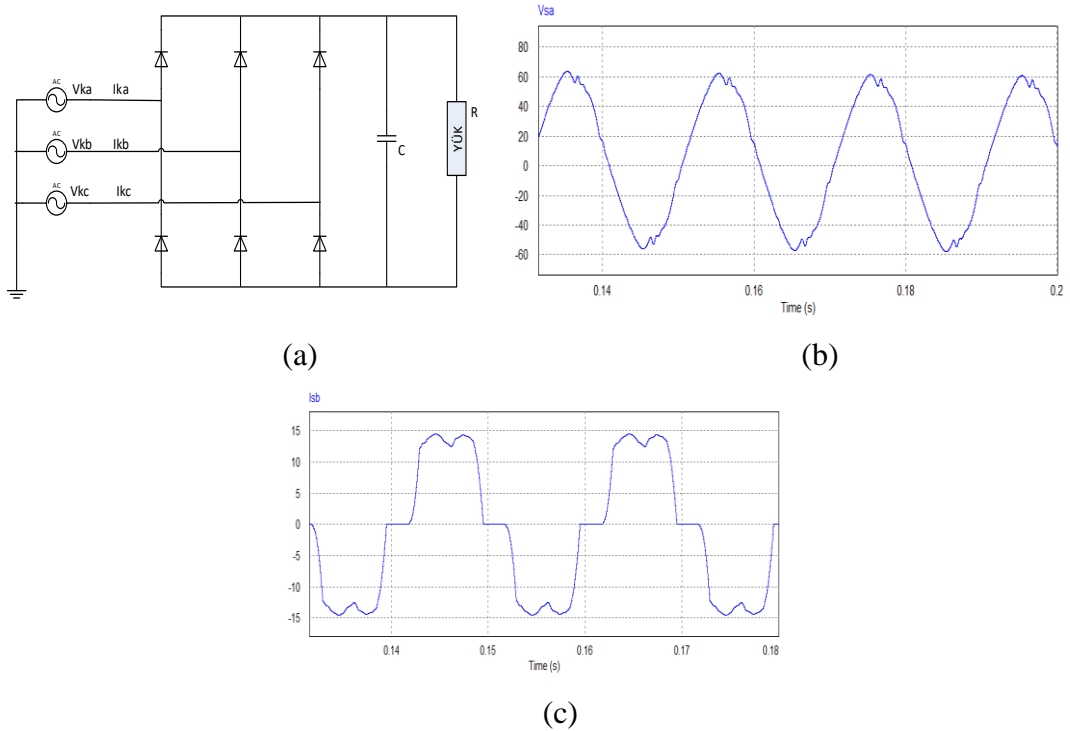


**Şekil 2.9.** Frekans değişimi.

## 2.7. Dalga Şeklinde Bozulmalar

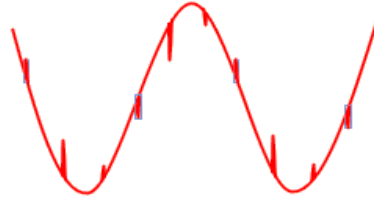
Güç sistem hatlarında şebeke gerilim frekansında sinüzoidal dalga formunda bozucu etki yapan olaylar dalga şeklinde bozulmalar meydana getirmektedir. Bu olaylar DA seviye (DA offset), harmonik, ara harmonik, çentik ve gürültü olarak sınıflandırılmaktadır (Apay, 2008).

Şekil 2.10 (a)'da 3-fazlı 6-darbeleri diyotlu doğrultucu bağlantı şekli, (b)'de görüldüğü üzere bu doğrultucu diyotlarının iletim noktalarında fazlar arası gerilimlerde çentikler oluşmakta ve doğrultucunun kaynaktan çektiği akımın dalga şekli (c)'de görülmektedir. Kaynaktan çekilen akım THB %23.06 oranında bozulmaktadır.



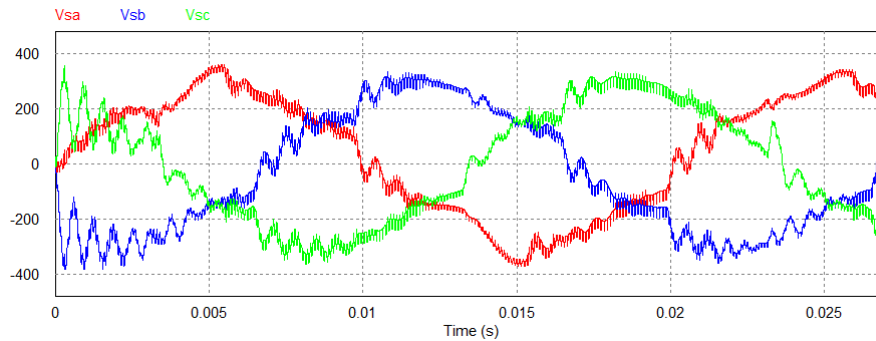
**Şekil 2.10.** (a) 3-fazlı gerilim kaynaklı diyot doğrultucu bağlantı şekli (b) fazlar arası gerilim dalga şekli (c) kaynaktan çekilen akım dalga şekli.

Çentik, normal çalışma durumunda güç elektroniği elemanlarında akımın bir fazdan diğerine geçiş (komutasyon) yaptığı anlarda çentik meydana gelmektedir. Çentikten kaynaklanan frekans bileşenleri çok yüksek olabilmektedir. Sistemde doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktanslarının anahtar aktarımını geciktirmesiyle oluşmaktadır (Alexander ve Thompson, 2007).



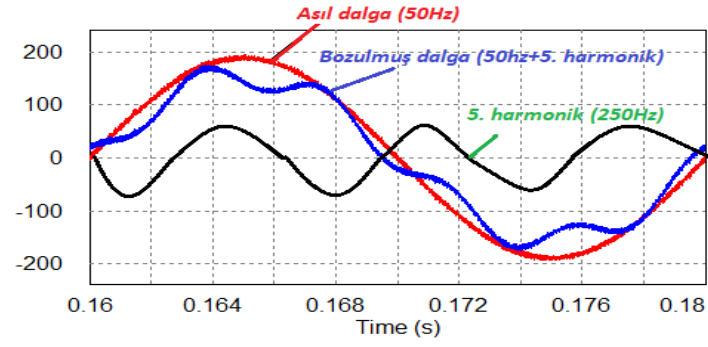
**Şekil 2.11.** Konvertörün çalışması sonucu oluşan çentik.

Gürültüler, akım veya gerilim dalga şekli üzerine binmiş 10kHz ile 1GHz arasında değişen düşük enerjili bozucu dalgalardır. Gürültüler; anahtarlama elemanları, kontrol kartları ve ark kaynaklarından meydana gelmektedir (Suslov, vd., 2014).



**Şekil 2.12.** Gürültü.

Harmonikler, temel frekansın tamsayı katları olan frekanslara sahip sinüzoidal dalga formları olarak tanımlanmaktadır. Elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve dağıtım aşamalarında akım ve gerilimin sinüzoidal olması gerekmektedir. Güç sisteminde harmonikler gerilim ve akım dalga şekilleri için bozulma olarak tanımlanır. Günümüzde artan motor kontrol cihazları, eviriciler, kişisel bilgisayarlar, güç kaynakları vb. gibi doğrusal olmayan yükler nedeniyle sistemde harmonikler ortaya çıkmaktadır. Sistemde oluşan harmonikler ile birlikte sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşmaktadır. Harmonikler elektrik tesislerinde çeşitli zararlara uğratmaktadır (Zhang, vd., 2015).

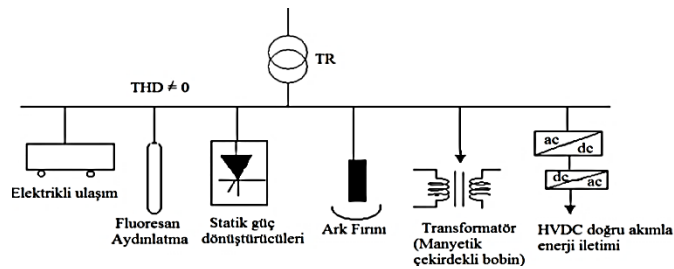


**Şekil 2.13.** Harmonikli dalga şekli (Castello, vd., 2016).

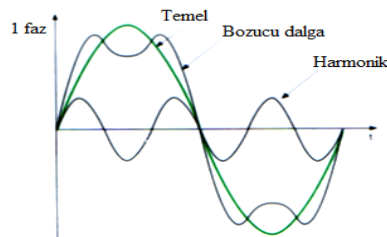
Dirençli elektrik yüklerinde akım gerilimi takip etmekte, güç faktörü değeri 1 olmakta ve toplam harmonik bozulma bulunmamaktadır. Yük reaktif ise akım ve gerilim arasında bir faz farkı oluşmaktadır. Bu faz kayması güç faktörü değerini düşürmektedir (Castello, vd., 2016).

### 3. HARMONİKLER

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal olması istenmektedir. Harmonikler, doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan gerilim veya akım dalga formlarında, genlik veya frekanslarında bozulmaya sebep olmaktadır. Doğrusal bir yükün akım-gerilim karakteristiği ( $R=V/I$ ) doğrusal değişmektedir (Zhang, vd., 2015).



Şekil 3.1. Doğrusal olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları (Apay, 2008).



Şekil 3.2. Bozucu bir dalga biçimi (Apay, 2008).

Sinüzoidal olmayan dalga, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, güç faktörünün değişmesi vb. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açmaktadır. Girişine uygulanan gerilim ile çektiği akım arasında doğrusal olmayan bir ilişki olan elektrik yükleri güç sistemlerinde harmoniklere neden olmaktadır. Güç elektroniği elemanları ise anahtarlamalı çalışma prensiplerinden dolayı harmonik akımlar oluşturmaktadır (Buzdugan ve Balan, 2017).

#### 3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Güç kalitesini iyileştirme çalışmalarında, harmonik kompanzasyonun yanında reaktif güç kompanzasyonunun da önemi büyüktür. İndüktif ya da kapasitif yüklerin oluşturduğu etki sonucunda akım, gerilime göre  $\pm 90$  kaymaktadır. Akım ve gerilim

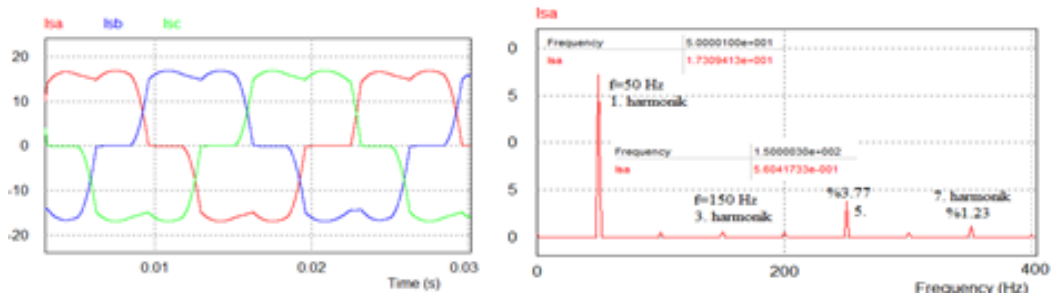
arasındaki faz kaymasını düzelterek ideale yakın tutmaya yarayan işlem kompanzasyondur. Yüke paralel ve seri bağlanan aktif devre elemanları ile reaktif güç elde edilmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu ile güç faktörü istenilen seviyeye çıkarılarak güç kalitesi iyileştirilmektedir. Bu sayede sistemdeki kayıpların giderilmesi, gerilimin dengelenmesi, şebeke sistemine daha fazla tüketicinin bağlanması ve arızaların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır (Nie, vd., 2018).

Harmoniklerin kompanzasyonu, elektrik cihazlarının devrede değişiklikleri ile yapılacağı gibi, filtrelerle de yapılmaktadır. Filtreleme ile en verimli sonuçlar elde edilmektedir (Khadkikar ve Chandra, 2008).

### 3.2. Harmonik Çeşitleri

Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilmektedir. Güç sistemindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı sistemde 3., 5., 7., 9., 11,... gibi tek harmonik bileşenler bulunmaktadır Sinüzoidal olmayan dalga şekillerinin içerdiği çift sıralı (2, 4, 6, 8,...) ve tek sıralı (3, 5, 7, 9,...) harmonikler fourier serisinin birer bileşenidir. Sıfır sıralı (0) harmonik bileşen sinyalin DA seviyesini ve bir (1) sıralı bileşen ise sinyalin temel (50Hz) harmonik bileşenini temsil etmektedir (Elphick, vd., 2017).

Dengeli 3-fazlı güç sistemlerinde genellikle tek sıralı harmonikler bulunmakta, çift sıralı harmonikler ise ölçüm hatalarından veya anahtarlama elemanları içeren güç elektroniği cihazlarında yanlış anahtarlama nedeniyle oluşmaktadır. Pozitif sıralı harmonikler (4., 7., 10., ...) temel frekansla aynı yönde, negatif sıralı harmonikler (2., 5., 8., ...) temel frekansın tersi yönünde dönmekte ve sıfır sıralı harmonikler (3., 6., 9., ...) dönmemektedir.



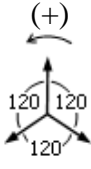
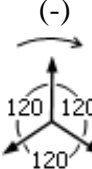
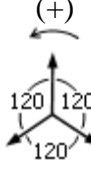
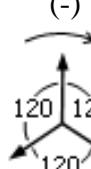
Şekil 3.3. Doğrusal olmayan tristörlü yük akımları ve harmonik bileşenler.

Tablo 3.1’de dengeli 3-fazlı güç sistemlerinde doğrusal olmayan yük durumunda kaynak akımı dalga şekli ve tek sıralı harmonikler verilmektedir (Fuchs ve Masoum, 2008).

**Tablo 3.1.** Güç sistemlerinde harmonik çeşitleri (Fuchs ve Masoum, 2008).

Harmonik Çeşitleri	Frekans ( $f=50$ Hz)	Oluşma Nedenleri
Tek sıralı	$h.f$ ( $h=3, 5, 7, 9, \dots$ )	Doğrusal olmayan yükler.
Çift sıralı	$h.f$ ( $h=2, 4, 6, 8, \dots$ )	Yarım dalga doğrultucular
Üçün tek katları	$3.h.f$ ( $h=1, 3, 5, 7, \dots$ )	Dengesiz 3-fazlı yükler ve anahtarlamalı elektronik cihazlar.
Pozitif sıralı	$h.f$ ( $h=1, 4, 7, 10, \dots$ )	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Negatif sıralı	$h.f$ ( $h=2, 5, 8, 11, \dots$ )	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Sıfır sıralı	$h.f$ ( $h=3, 6, 9, 12, \dots$ )	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Ara	$h.f$ ( $h=f$ 'nin tamsayı katları olmayan değerler)	Anahtarlamalı frekans dönüştürücüler, doğrudan frekans dönüştürücüler, endüksiyon fırınları, ark fırınları ve bilgisayarlar.
Alt	$h.f$ ( $h<1$ ve $f$ 'nin tamsayı katları olmayan değerler)	Yüksek hız kontrollü güç kaynakları, alt rezonans durumları, yüksek kapasiteli kondansatör gurupları ve yüksek endüktif sistemler ve endüksiyon makineleri.
Zamansal	$h.f$ ( $h=3, 5, 7, \dots$ )	Akım ve gerilim kaynaklı eviriciler, dalga genişlik modülasyonlu doğrultucu ve eviriciler, anahtarlamalı doğrultucular
Tipik	$(12k+1).f$ ( $k$ =tamsayılar)	Doğrultucular ve eviriciler.

**Tablo 3.2.** Harmonik frekansları ve faz sıraları (Fuchs ve Masoum, 2008).

	Temel (1.) bileşen	2.	3.	4.	5.	6.	...
Harmonik frekansı	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	...
Harmonik faz dönüş yönü			(0)			(0)	...

### 3.3. Harmonik Üreten Kaynaklar

Harmoniklere sebep olan doğrusal olmayan yükler, dağıtım sisteminde güç kalitesinde problemlere neden olmaktadır. Harmonikleri meydana getiren doğrusal olmayan elemanlar;

- Yarı iletken malzemeler içeren elemanlar (diyot,transistör,tristör v.b)
- Transformatörler
- Televizyon, bilgisayarlar
- Güç elektroniği elemanları
- Statik VAR kompanzatörleri
- Fotovoltaik sistemler
- Kesintisiz güç kaynakları
- Yüksek gerilim ile enerji iletim (HVDC) sistemleri
- Elektrikli ulaşım sistemleri
- Akü şarj devreleri
- Fotovoltaik sistemler
- Kaynak makineleri
- Ark fırınları şeklinde genel olarak listelenebilir.

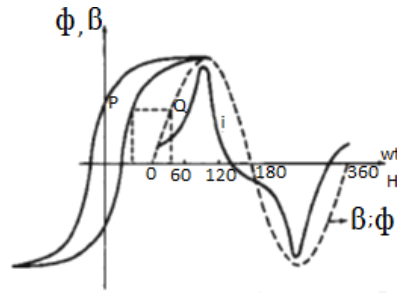
Ticari uygulamalarda harmonikler birçok harmonik üreten kaynakların toplamından oluşmaktadır. Hastane, ofis, internet merkezi, bankalar, depo, gibi mekanlarda kullanılan elektronik balastlı yüksek verimli floresan aydınlatma, asansörler, hız ayar cihazları ile donatılmış motorlar, hassas elektronik cihazları beslemek için tasarlanan tek fazlı anahtarlamalı güç kaynakları harmoniklere sebebiyet vermektedirler (Modi, vd., 2012).

Endüstriyel uygulamalarda cezai tedbirlere maruz kalmamak ve güç faktörünü düzeltmek için genellikle kapasitör grupları kullanılmaktadır. Bu kapasitörler, doğrusal olmayan yüklerin harmoniklerini arttırarak sistemin rezonansa girme olasılığını da kuvvetlendirmektedir. Genellikle gerilim bozulmasının en sık görüldüğü yer, sistemde kapasitör gruplarının bağlandığı baralardır. Rezonanslar, motor ve transformatörlerin aşırı ısınmasına ve de hassas cihazların istenmeyen çalışmalarına yol açabilmektedir (Arrilaga ve Watson, 2003).

### 3.3.1. Transformatörler

Transformatör, bir enerji seviyesinden diğer enerji seviyesine yüksek verimde dönüşüm yapan durağan bir elektrik makinesidir. Transformatörler demir nüve ve bu nüve üzerine sarılmış bobinlerden oluşmaktadır. Bu bobinlerden birisine gerilim uygulandığında demir çekirdek manyetize (mıknatıslanma) olmaktadır ve bobinlere enerjinin aktarılması elektromanyetik indüksiyonla gerçekleşmektedir.

Generatörler, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Güç sistemlerinde çok sık kullanılan transformatörlerin harmonik üretmesi, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin ( $\mu_c=B/H$ ) doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır (Zhang, vd., 2015).



Şekil 3.4. Tek fazlı transformatörün mıknatıslanma akımı (Zhang, vd., 2015).

Şekil 3.4'te histerezis eğrisi ve zamanla sinüs şeklinde değişen  $\Phi$ , B veya E'nin ani değerlerinden faydalanarak çizilen mıknatıslanma akımının şekli gösterilmektedir.

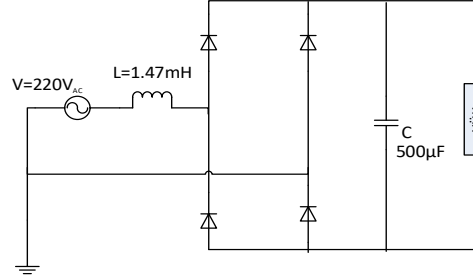
### 3.3.2. Floresan aydınlatmalar

Yapılan araştırmalarda ticari uygulamalarda kullanılan floresan aydınlatmalar enerji sarfiyatlarındaki avantajları sebebi ile genel aydınlatmanın oldukça yüksek bir oranını oluşturmaktadır. Deşarj prensibiyle çalışmaktadırlar. Demir gövdeli bir transformatör ve kondansatörden oluşturmaktadırlar. Floresan aydınlatmaların, temel frekansta çalıştığı için ısı kayıpları ile verimleri düşüktür ve ateşleme için gerekli ark nedeniyle harmonik oluşturmaktadırlar (Arrilaga ve Watson, 2003).

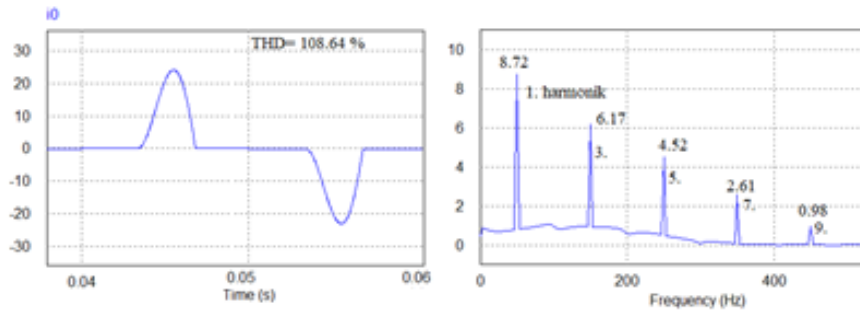
### 3.3.3. Tek fazlı doğrultucular

Tek fazlı doğrultucular, güç elektroniği sistemlerinde çok sık kullanılan alternatif akımdan (AA) doğru akıma (DA) dönüşüm yapan sistemlerdir. Anahtarlamalı

güç kaynakları, bilgisayarlar, elektronik balastlı aydınlatma lambaları ve küçük güçlü motor sürücüler tek-fazlı harmonik kaynaklardır (Ge, vd., 2015).



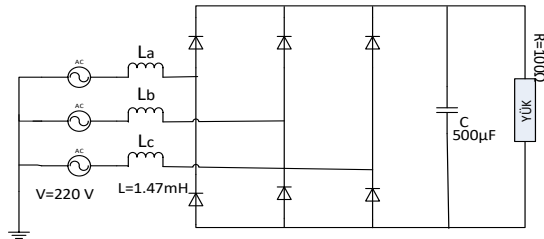
Şekil 3.5. Tek-fazlı 2-darbeli bir doğrultucunun bağlantı şeması.



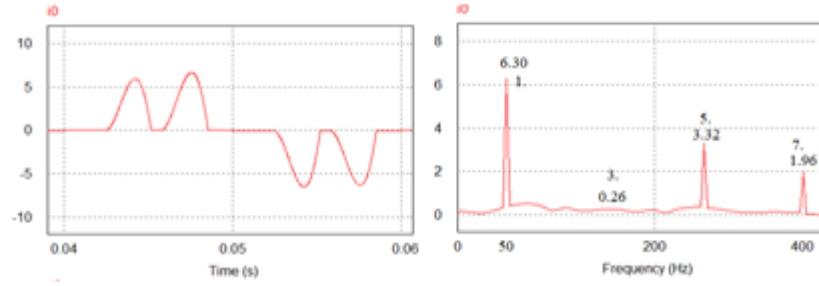
Şekil 3.6. Kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı.

### 3.3.4. 3 fazlı doğrultucular

3-fazlı 6-darbeli doğrultucular, güç elektroniği endüstriyel sistemlerde kesintisiz güç kaynakları, tristör denetimli doğrultucular ve ayarlı motor hız denetim sistemlerinde oldukça yaygın kullanılan harmonik kaynaklardır. (Ge, vd., 2015).

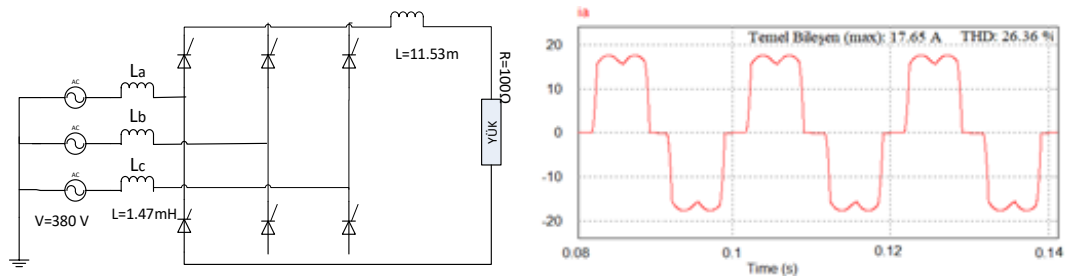


Şekil 3.7. 3-fazlı 6-darbeli gerilim kaynaklı doğrultucunun bağlantı şeması.



**Şekil 3.8.** Kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı.

Şekil 3.7’de 3-fazlı 6-darbeli gerilim kaynaklı bir doğrultucunun kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir. Doğrultucunun kaynaktan çektiği akımda (1, 3, 5, 7, 11, 13,...) harmonik bileşenler bulunmakta ve %64.26 oranında harmonik bozulmaya sebep olmaktadır.



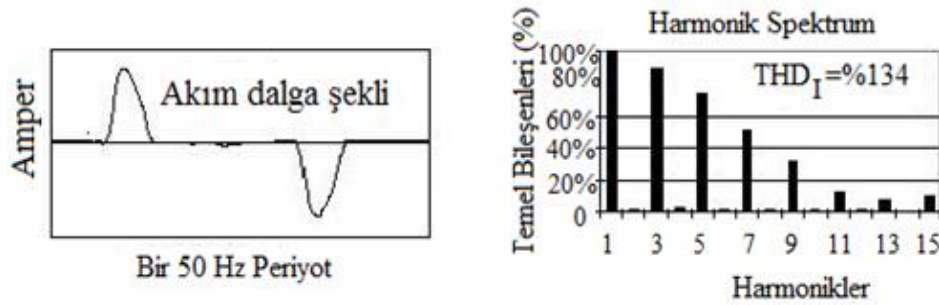
**Şekil 3.9.** 3-fazlı 6-darbeli akım kaynaklı tristörlü doğrultucunun bağlantı şeması ve kaynaktan çekilen akımın dalga şekli.

**Tablo 3.3.** Çeşitli doğrultucuların akım dalga şekilleri (Ge, vd., 2015).

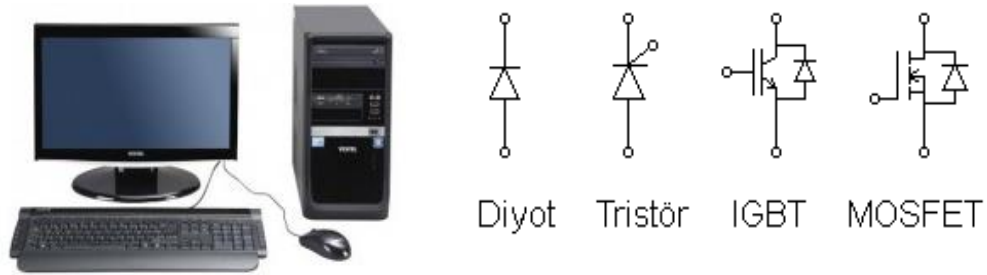
Anahtarlama Tipi	Akım Dalga Şekli	THB (%)
Tek fazlı doğrultucu		≈ 85%
6 darbeli doğrultucu (filtre kondansatörlü)		≈ 70%
6 darbeli statik evirici (filtreli bastırıcı)		25%-40%

### 3.3.5. Bilgisayarlar

Bilgisayarlar, donanımlarında anahtarlamalı güç elemanları bulundurmaktadır. Bu nedenle bilgisayarlar doğrusal olmayan karakteristiklerinden dolayı önemli harmonik üreteçlerindedir.



Şekil 3.10. Bilgisayarlara ait harmonik bozunum (Rahman, vd., 2017).



Şekil 3.11. Harmonik üreteçleri, bilgisayarlar ve güç elektroniği elemanları (Rahman, vd., 2017).

### 3.4. Harmonik Standartları

Güç sistemlerinde, elektrik enerji verimliliği ve güç kalitesinin artırılması amacıyla akım ve gerilim harmoniklerinin belirli sınırlarda tutulması ile ilgili değişik ülkelerde farklı standartlar geliştirilmiştir. IEEE 519-2014 standartları, farklı gerilim seviyeleri için gerilim ve akım harmonik bozulma sınırları belirlemektedir.

Tablo 3.4, IEEE 519-2014 önerilen gerilim bozulmasını göstermektedir. Tablo 3.5, sistemin kısa devre kapasitesine göre müşteri yüküne bağlı olarak önerilen akım bozulmasını listeler. IEEE 519-2014 standardına  $I_{sc}/I_1 < 20$  için ortak bağlantı noktasında maksimum gerilim THB'si %3 ve akım THB'si %5'tir (IEEE PES, 2014).

**Tablo 3.4.** Harmonik gerilim sınır değerleri (IEEE PES, 2014).

Bara Gerilimi (V)	Bireysel Harmonik Gerilim Bozulması (%)	Toplam Gerilim Bozulması THB <sub>V</sub> (%)
V ≤ 69kV	3.0	5.0
69kV ≤ 138kV	1.5	2.5
V > 138kV	1.0	1.5

**Tablo 3.5.** Harmonik akım sınır değerleri (IEEE PES, 2014).

I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THB <sub>i</sub> %
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

### 3.4.1. Toplam harmonik bozulma

Harmoniklerin miktarı, gerilim veya akım dalga formları için toplam harmonik Bozulma (THB) olarak tanımlanır. THB, gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüzoidal sinyalden uzaklaşmasıdır. Toplam harmonik bozulma, bozulmuş dalga şeklinin harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak Eşitlik 3.1 ve 3.2’de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Rahman, vd., 2017).

$$THB_V = 100x \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

$$THB_i = 100x \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{i_1} \quad (3.2)$$

Burada, V<sub>1</sub> ve i<sub>1</sub> temel bileşenin rms değeri, V<sub>h</sub> ve i<sub>h</sub> harmonik bileşenin rms değeridir. Harmonikler nedeniyle bozulmuş periyodik ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri Fourier serisinin birer bileşeni olarak ifade edilmektedir. Sinüzoidal dalgaların ortalama değeri Eşitlik 3.3’te ve etkin değeri Eşitlik 3.4’te verilmektedir (Fuchs ve Masoum, 2008).

$$I_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T [i^1(t) + i^2(t) + i^3(t) + i^4(t) + \dots] dt \quad (3.3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [i_{max}^{(1)} \cos(\omega t + \beta_1) + i_{max}^{(2)} \cos(2\omega t + \beta_2) + i_{max}^{(3)} \cos(\omega t + \beta_3) + \dots]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Toplam ara harmonik bozulma (TIHD-Total Interharmonic Distortion), bozulmuş dalga şeklinin ara harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak tanımlanmakta ve Eşitlik 3.5'te verildiği gibi hesaplanmaktadır (Buzdugan ve Balan, 2017).

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (I_{rms}^{(k)})^2}}{I_{rms}^{(1)}} \quad (3.5)$$

Toplam alt harmonik bozulma (TSHD-Total Subharmonic Distortion), bozulmuş dalga şeklinin alt harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak tanımlanmakta ve Eşitlik 3.6'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^s (I_{rms}^{(s)})^2}}{I_{rms}^{(1)}} \quad (3.6)$$

Toplam talep bozulma (TDD-Total Demand Distortion) ve bozulma indeksi (DIN-Distortion Index), Eşitlik 3.7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Li, vd., 2006).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{rms}^{(h)})^2}}{I_{rated}}; \quad DIN = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_{rms}^{(i)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_{rms}^{(i)})^2}} = \frac{THD}{\sqrt{THD^2 + 1}} \quad (3.7)$$

Harmonik derecesi (n), harmonik frekansının temel frekansa oranı olarak ifade edilir.  $f_n$ , Temel frekansın tam sayı katı olan frekans değeridir.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (3.8)$$

$$f_n = n * f_1 \quad (3.9)$$

### 3.4.2. Harmonik bileşenin etkin (RMS) değeri

Alternatif bir akımın Karesel Ortalama Değeri (RMS Root Mean Square) sabit bir direnç yükünden geçen ve aynı miktarda ısı enerjisi üreten DA akımın değerine eşittir. Harmonik bileşenin RMS değeri, sinüzoidal olmayan bir dalga biçiminin analiz edilmesinde, harmonik bir frekansa sahip bileşenlerden birinin RMS değeridir (Li, vd., 2006).

### 3.5. Harmoniklerin Sisteme Etkileri

Harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilemektedir. Harmoniklerin gerilimin ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde meydana getirdikleri etkileri genel olarak (Buzdugan ve Balan, 2017);

- Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması,
- Transformatörlerin aşırı ısınması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Aydınlatma elemanlarında, monitörlerde görüntü titreşimi meydana getirmesi
- Generatör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi,
- Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
- Harmoniklerden dolayı dalga şeklindeki değişikliklerin elektrik sayaçlarının hatalı okumalarına sebebiyet vermeleri olarak sıralanmaktadır (Smith, 2002)

### 3.6. Harmoniklerin Giderilme Yöntemleri

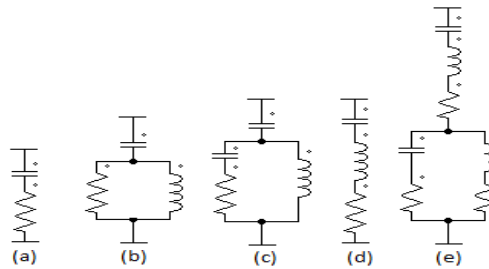
Günümüzde, dağıtım sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artışa bağlı olarak, büyük miktarlarda bozulmuş akım ve gerilim dalga formu bulunmaktadır. Bu harmoniklerin azaltılması veya iptal edilmesi pasif veya aktif yapılar kullanılarak yapılabilir. Harmoniklerin güç sistem elemanları ve yük üstünde istenmeyen bir takım kısa ve uzun süreli etkileri vardır. Kısa süreli etkiler genellikle en belirgin olanlardır ve aşırı gerilim dalgalanmasıyla ilişkilidir. Uzun süreli etkiler genellikle fark edilmez ve artan direnç kayıplarına ve gerilim streslerine bağlıdır. Bilgisayar kontrollü bazı yükler gerilim dalgalanmalarına duyarlıdır. Gerilim dalgalanması %5 civarında iken bir problem teşkil etmezken %10'un üzerine çıktığı

durumlarda istenmeyen tetiklemelere ve transformatörün ısınmasına sebep olmaktadır (Rahman, vd., 2017). Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Enerji sistemlerinde harmoniklerin giderilmesi için;

- Yük ve enerji kaynağı yeterli kalite şartlarını sağlar durumda seçilmeli,
- Akım-gerilim düzenleyici sistem ve cihazlar kullanılmalı,
- Elektrik tesisatı ve topraklama, standartlara uygun yapılmalı, enerji kalitesi düzenli olarak izlenmeli,
- Kompanzasyon sistemi kullanılmalı,
- Büyük tesislerde güce ve hassasiyete bağlı olarak
  - Pasif filtreler
  - Aktif filtreler
- Yeni yükleri devreye almadan önce hat güncellenmeli,
- Tek faz yerine 3 fazlı sistemler kullanılmalıdır.

### 3.6.1. Pasif filtreler

Pasif harmonik filtreler, endüktif, kapasitif ve dirençli elemanlardan oluşan uzun bir süre harmonik azaltım için kullanılmıştır. Pasif filtreler, düşük geçişli, yüksek geçişli, bant geçişli ve ayarlı filtreler olarak karakteristiklerine göre dörde ayrılmaktadır. Pasif filtrenin kullanılmasında, büyük boyutlu olmaları, çok yer kaplamaları, yüklerin artması durumunda sisteme montajlarının oldukça zor olması, sabit kompanzasyon sunmaları, harmonik sayısı kadar filtreye ihtiyaç duymaları, sistem elemanları ile rezonans problemleri ve gerilimde önemli bozulmalara neden olmaları gibi birçok dezavantajları vardır (Xiu ve Liu, 2009).



**Şekil 3.12.** Pasif filtrenin bazı yapıları; yüksek geçiş (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece ayarlı filtre, (d) tek ayarlı, (e) çift ayarlı.

### 3.6.2. Aktif güç filtreleri

Aktif güç filtreleri (AGF), güç sistemlerinde harmonik distorsiyonu kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. AGF'ler, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu kaynak akımlarındaki harmonikleri elimine ederek elektrik şebekesine harmonik bileşenleri enjekte etmek için güç elektroniği dönüştürücülerini kullanmaktadır. Şebekede rezonans problemlerine neden olmadıklarından pasif filtrelere göre önemli bir avantajları vardır (Bosch, vd., 2018).

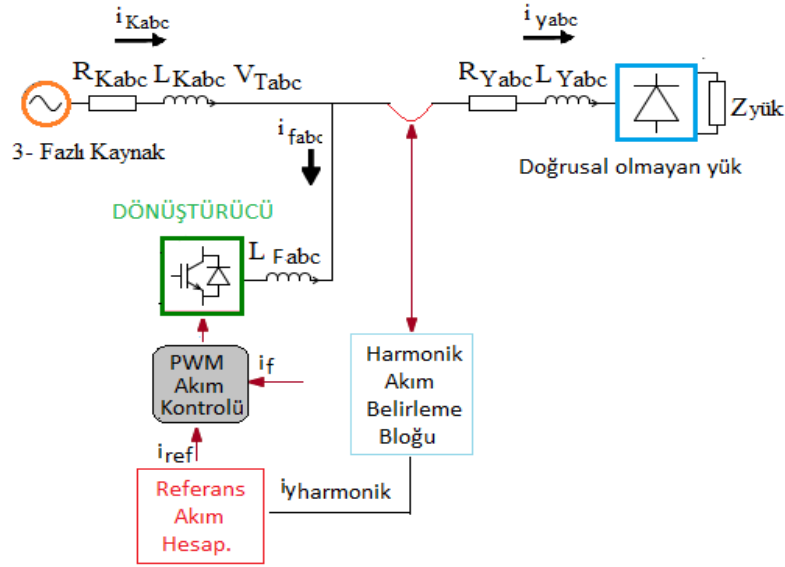
IEEE 519-2014 standartlarına göre kabul edilen toplam harmonik bozulma, akımda %3 ve gerilimde %5 olarak kabul edilmektedir. Bu değerlerin aşılması güç sistemlerinde büyük hasarlara yol açabilmektedir. Endüstriyel ortamlarda THB %25 değerlerindedir. Tek sayılı harmonikler (3., 5., 7. vs) elektrik dağıtım sistemlerinde en çok kaygı verici harmoniklerdir. Aktif filtreler devreye seri ve paralel olarak bağlanarak harmonik giderme işlevini yerine getirmektedir (Wu, vd., 2016). Aktif güç filtreleri,

- Akım ve gerilim harmoniklerinin süzülmesi.
- Şebeke ile yük arasında harmonik yalıtımı.
- Reaktif güç kompanzasyonu.
- Nötr akımlarının kompanzasyonu.
- Gerilim regülasyonu gibi işlevleri ile güç kalitesini artıracak uygulamalara sahiptirler.

AGF'ler, dönüştürücü tipine, topolojiye ve faz sayısına göre sınıflandırılmaktadır. AGF'nin, gerilim kaynaklı evirici (GKE) ve akım kaynaklı evirici olmak üzere iki tip dönüştürücüsü vardır. Faz sayısına göre, tek fazlı (iki telli) ve üç fazlı (dört telli) olarak sınıflandırılmaktadır. AGF'lerin paralel, seri, hibrit ve birleşik olmak üzere dört tip topolojisi bulunmaktadır. Aktif filtrelerde, harmonikleri gidermek için farklı harmonik giderme yöntemleri kullanılmakta ve bu yöntemler Bölüm 5'te anlatılmaktadır. Gerçek akım; histerezis, sinüzoidal ve uzay vektör PWM karşılaştırma teknikleri gibi güncel kontrol teknikleri kullanılarak üretilmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

Aktif güç filtrelerin yapısına baktığımızda; harmonik belirleme bloğu, akım kontrol devresi ve dönüştürücü olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Elektrik enerjisi ile çalışan bütün cihazlar şebekeden aktif veya reaktif güç çekmektedir. Reaktif güç, kaynaktan çekilen akımı arttırıp, hat kayıplarına neden olmakta ve şebekeyi gereksiz yere yüklemektedir. Şebekenin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikler

kullanılarak karşılanması reaktif güç kompanzasyonu olarak adlandırılmaktadır. Alternatif akımla çalışan elektrik güç sistemlerinin tasarım ve işletmesinde reaktif güç önemli bir sorun olarak görünmektedir (Ye, vd., 2018b).



Şekil 3.13. Aktif güç filtresi devre şeması.

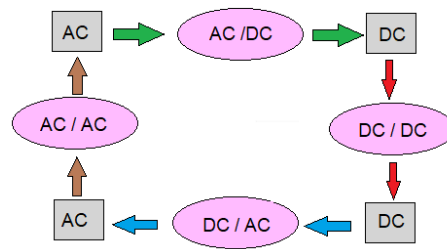
Dağıtım sistemlerinde güç kalitesini telafi etmek için kullanılan güç elektroniği cihazlarından bazıları şunlardır (Modi, vd., 2012);

- Statik Var Dönüştürücüleri (SVC)
- Aktif Güç Filtreleri (AGF)
- Dinamik Gerilim Doğrultucuları (DVR)
- Dağıtım Statik Dönüştürücü (D-STATCOM)
- Değişken AA İletim Sistemleri (FACTS)
- Özel Güç Cihazları (CPD)
- Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD)

Aktif filtrelerin en önemli üstünlüğü mevcut dağıtımda değişiklikler yapıldığında bile harmonik kompanzasyonuna devam etmeleridir (Bosch, vd., 2018). Bu açıklamalardan sonra aktif güç filtresinin bir kısmı olan dönüştürücüler ele alınmaktadır.

## 4. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

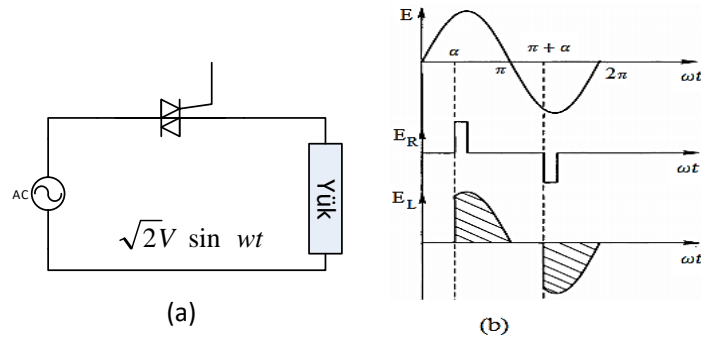
Güç dönüşümü, elektrik gücünün bir şekilden diğerine dönüştürülmesi işlemidir. Bu işlemi yapan elemanlarına güç dönüştürücüler adı verilmektedir. Güç dönüşümü işlemi anahtar olarak kullanılan yarı iletken elemanlar tarafından sağlanmaktadır. Dönüştürücülerde kullanılan güç elektroniği elemanları SCR, Triyak, Güç transistörleri, Güç Mosfetleri, IGBT'lerdir. Güç dönüştürücüler; AA/AA dönüştürücüler, AA/DA dönüştürücüler, DA/DA dönüştürücüler ve DA/AA dönüştürücüler olmak üzere 4 kısımdan oluşmaktadır (Matysik, 2007).



Şekil 4.1. Dönüştürücüler.

### 4.1. AA/AA Dönüştürücüler

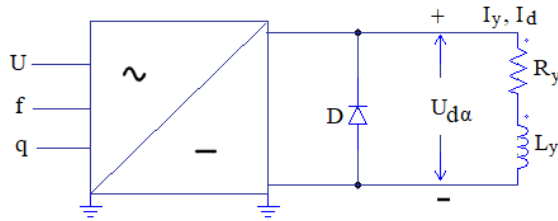
AA/AA dönüştürücüler enerjinin alternatif akım (AA) girişi ya da çıkışından farklı bir forma girmeden direkt olarak AA frekansın değerini değiştirmektedir. Çıkış frekansı giriş frekansından düşüktür. Bu dönüştürücüler enerjinin ek bir büyüklük olmadan sisteme geri verilmesini sağlamaktadır. AA kıyıcı, frekansı değiştirmeden AA enerjisi AA enerjiye çeviren statik bir dönüştürücüdür. Şekil 4.2 (a)'da Triyak'lı temel AA kıyıcı devresi, (b)'de ise AA kıyıcı devresi çıkış gerilimi dalga şekilleri görülmektedir (Peng, vd., 2003).



Şekil 4.2. Tek fazlı AA kıyıcı temel devresi ve çıkış gerilimi dalga şekilleri.

## 4.2. AA/DA Dönüştürücüler

AA/DA Dönüştürücü ile AA kaynaktan elde edilen AA gerilim DA gerilime çevrilir. Burada kullanılan anahtarlama elemanlarının durumuna göre, dönüştürücü tam kontrollü ve kontrolsüz olabilmektedir. Kontrollü dönüştürücülerde kullanılan anahtarlama elemanının iletimi için çıkıştaki DA geriliminin genliği ayarlanmaktadır. AA/DA dönüştürücülerin temel blok şeması Şekil 4.3'te verilmektedir (Mohan, 1995).



Şekil 4.3. AA/DA dönüştürücülerin temel blok şeması.

Tablo 4.1. AA/DA dönüştürücülerin kontrol açısından karşılaştırılması (Mohan, 1995).

Kontrolsüz Doğrultucu	Tam Kontrollü Doğrultucu	Yarı Kontrollü Doğrultucu
Diyotlarla gerçekleştirilmektedir.	Tristörlerle gerçekleştirilmektedir.	Tristör ve diyotlarla gerçekleştirilmektedir.
Sadece doğrultucu modunda çalışmaktadır.	Hem doğrultucu hem de inverter modunda çalışmaktadır.	Sadece doğrultucu modunda çalışır.
Genellikle serbest geçiş diyodu yoktur.	Serbest geçiş diyodu yoktur.	Genellikle serbest geçiş diyodu vardır.
$\alpha = 0$ $U_{d\alpha} = U_d = \text{Sabit}$	$0 < \alpha < \pi$ $+U_d > U_{d\alpha} > -U_d$	$0 < \alpha < \pi$ $+U_d > U_{d\alpha} > 0$

## 4.3. DA/DA Dönüştürücüler

Çoğu endüstriyel uygulamalarda, sabit bir DA gerilim kaynağını değişken bir DA gerilim kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun içinde DA/DA dönüştürücüler kullanılmaktadır. Anahatarlamalı mod güç kaynaklarında ve DA motor sürücü uygulamalarında kullanılmaktadırlar. En önemli DA/DA dönüştürücü topolojileri buck, boost, buck-boost dönüştürücülerdir (Mi, vd., 2008).

## 4.4. DA/AA Dönüştürücüler (Eviriciler)

DA/AA dönüştürücüler endüstride yüksek frekanslı devreler olarak bilinen ve son yıllarda kullanımı yaygınlaşan dönüştürücü türüdür. Eviriciler girişine uygulanan

doğru gerilimi, istenilen frekans ve genlikte alternatif gerilime donüştirmektedirler. Eviriciler besleme kaynağına, iletim süresine, faz sayısına ve devre yapısına göre farklıklar göstermektedir. şebeke kaynağına göre eviriciler gerilim kaynaklı (GKE) ve akım kaynaklı olarak sınıflandırılmaktadırlar (Mohan, 1995).

Gerilim kaynaklı eviriciler, üretilen DA gerilimi kullanarak çıkışında genlik ve frekansı kontrol edilebilen AA gerilim üretirler. Anahtarlama mod DA-AA eviriciler ya da statik güç donüştürücüleri, güç anahtarlama elemanlarından oluşurlar. Eviriciler güneş paneli uygulamaları, kesintisiz güç kaynakları, AA motor sürücüleri gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (Darwish, vd., 2014).

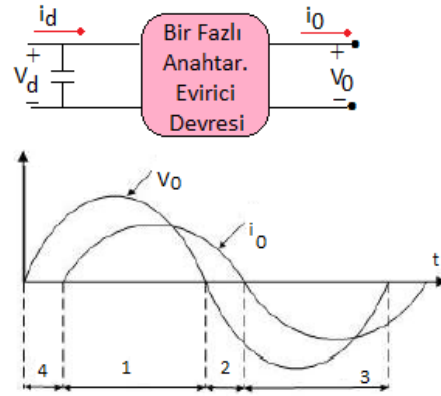
GKE eviricilerde, anahtarlama elemanları girişteki DA kaynaktan dolayı sürekli olarak ileri anahtarlama bölgesinde çalışmaktadır. Genellikle düşük frekans ve yüksek güç uygulamalarında tristör, orta frekans ve orta güç uygulamalarında transistör (BJT), yüksek frekans ve düşük güç uygulamalarında mosfet ve orta frekans ve orta gücün üstündeki uygulamalarda IGBT kullanılmaktadır (Ertl, vd., 2002; Matysik, 2007).

#### **4.4.1. Evirici topolojisi**

Çıkış gerilimlerine ve güç gereksinimlerine göre eviriciler bir fazlı veya üç fazlı olarak tasarlanmaktadır. Kesintisiz güç kaynaklı uygulamaları düşük gerilim ve güç gerektirdiklerinden bir fazlı eviriciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç fazlı eviriciler ise orta ve yüksek güç/gerilim uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel sistemlerde sık kullanılan esnek AA iletim sistemleri (FACTS), AA motor sürücüleri ve gerilim kompanzatörlerinde yüksek güç gerektiren üç fazlı evirici topolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Julian ve Oriti, 2007).

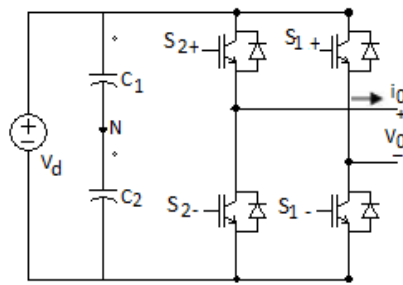
#### **4.4.2. Bir fazlı eviriciler**

Bir fazlı eviriciler, AA makinaların sürülmesinde, ayarlı gerilim ve frekanslı güç kaynaklarında, kesintisiz güç kaynaklarında, endüksiyonla ısıtmada, statik VAR kompanzatörlerinde, aktif güç şebeke filtreleri, güneş enerji sistemleri ve buna benzer uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sünter, vd., 2015).



Şekil 4.4. Bir fazlı evirici devresi ve çıkış sinyalleri.

Eviricinin çalışma modları, Şekil 4.4'teki 1 ve 3 aralıklarında güç akışı DA taraftan AA tarafa yani evirici modunda, 2 ve 4 aralıklarında ise AA taraftan DA tarafa yani doğrultucu modundadır.

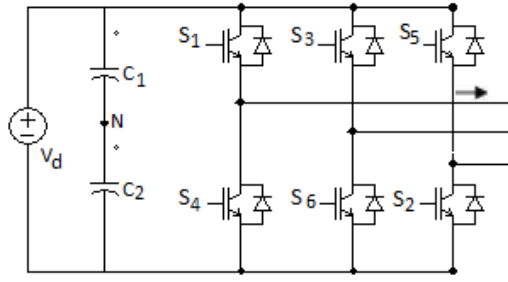


Şekil 4.5. Bir fazlı evirici topolojisi.

DA/AA evirme işlevinin Şekil 4.5'te gösterilen bir evirici kolu üzerinde,  $V_d$  geriliminin sabit bir değerde olduğu, anahtarların PWM tekniğine göre açma kapama yaparak çıkış geriliminin dalga şeklini ve değerini ayarlamaktadır (Matysik, 2007).

#### 4.4.3. Üç fazlı eviriciler

Üç fazlı eviriciler, bir fazlı eviricilerin aksine orta ve yüksek güç/gerilim uygulamaları için daha uygun çözümler sunmaktadır. Üç fazlı evirici tasarımında kullanılan temel yapı Şekil 4.6'da görülmektedir. Evirici devre, çıkışta üç faz gerilim dalgalarını elde etmek için karşılıklı olarak  $2\pi/3$  derece faz farkı olan üç adet yarım köprüden oluşmaktadır. Girişteki DA kaynağı ise genellikle tek faz ya da üç faz köprü doğrultuculardan elde edilebildiği gibi doğrudan bir batarya ile de sisteme enerji sağlayabilir.



**Şekil 4.6.** Üç fazlı evirici topolojisi (Matysik, 2007).

$$V_{a0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos\omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right] \quad (4.1)$$

$$V_{b0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{3} \cos 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{5} \cos 5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \dots \right] \quad (4.2)$$

$$V_{c0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{3} \cos 3\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{5} \cos 5\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \dots \right] \quad (4.3)$$

Faz gerilimleri ile yukarıdaki denklemler kullanılarak hat gerilimleri Eşitlik 4.4 ile hesaplanmaktadır (Sünter, vd., 2015).

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0}, V_{bc} = V_{b0} - V_{c0}, V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (4.4)$$

Belirsiz durumları ortadan kaldırmak için eviricinin kontrolünde her bir yarım köprünün kontrolü darbe genişlik modeli ile 8 ayrı durumda gerçekleştirilir. Eviriciye uygulanan anahtarlama durumundan ikisinde sıfır değerinde AA hat gerilimi üretilirken diğer altı durumda hat gerilimleri girişteki DA gerilime göre değişmektedir.

**Tablo 4.2.** Üç fazlı eviricinin anahtarlama durumları (Sünter, vd., 2015).

Durum	Anahtarlama Durumu ( $S_n$ )	$V_{ab}$	$V_b$	$V_a$
1	1, 2 ve 6 iletimde	$V_d$	0	$-V_d$
2	2, 3 ve 1 iletimde	0	$V_d$	$-V_d$
3	3, 4 ve 2 iletimde	$-V_d$	$V_d$	0
4	4, 5 ve 3 iletimde	$-V_d$	0	$V_d$
5	5, 6 ve 4 iletimde	0	$-V_d$	$V_d$
6	6, 1 ve 5 iletimde	$V_d$	$-V_d$	0
7	1, 3 ve 5 iletimde	0	0	0
8	4, 6 ve 2 iletimde	0	0	0

## 5. BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİ

Güç sistemlerinde tüketicilere kaliteli bir elektrik sağlamak esastır. Endüstriyel enerji santralının sorunsuz çalışması için her zaman kararlı bir kaynak gerilimi gerekmektedir. Elektrik kontrol sistemindeki güç elektroniği kontrol cihazlarının kullanımı çok yaygın hale gelmiştir. Bu güç elektroniği elemanları doğrusal olmayan yüklerdir ve dağıtım sisteminde bozulmaya neden olmaktadır. Diyot, tristör ve doğrultucular gibi doğrusal olmayan yüklerin çoğalmasıyla, sinüzoidal olmayan akımlar güç iletim/dağıtım sistemlerinde güç kalitesini düşürmektedir (Kinhal, vd., 2011).

Güç kalitesi problemlerinden olan gerilim bozulması, sistem izleme cihazlarında kullanılan kontrol, koruma ve ölçüm ekipmanlarının arızalanmasına neden olmaktadır. Harmonik akımlar, istenmeyen sistem rezonansına, kondansatörlerin aşırı yüklenmesine, artan kayıplar nedeniyle verimde bir azalmaya, dağıtım trafoları ve hatlarının aşırı ısınmasına neden olmaktadır (Woo, vd., 2010).

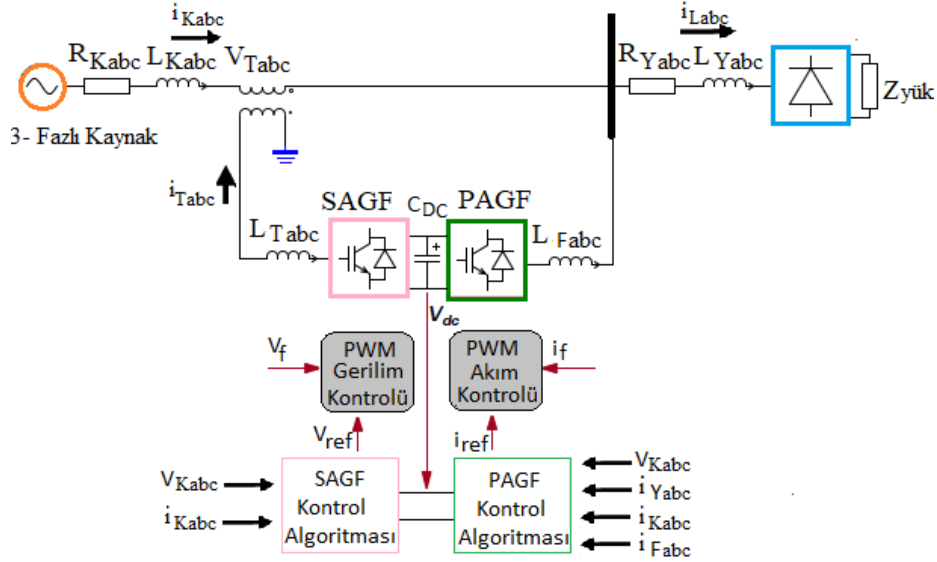
### 5.1. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD)

Son yıllarda, hem dağıtım hem de yük tarafı için eşzamanlı dengeleme özellikleri nedeniyle, güç kalitesi problemlerine çözüm olarak birleşik güç kalite düzenleyicisi kullanılmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi paralel ve seri aktif güç filtresinin birlikte kullanılması ile oluşmaktadır (Cheung, vd., 2018; Ye, vd., 2018b).

Paralel AGF, reaktif güç kompanzasyonu, nötr akım kompanzasyonu, doğru akım gerilim regülasyonu yapmakta ve doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği akımlar üzerindeki harmonikleri elimine etmektedir. Seri AGF ise şebeke gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim düşme ve yükselmeleri, şebeke geriliminde frekans problemleri, gerilim kesilmeleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler gibi sorunların düzeltilmesi işlevini gerçekleştirmektedir (Singh ve Venkateswarlu, 2010; Modesto, vd., 2016).

Şekil 5.1’de ortak bir DA bara hattını kullanarak şebekeye seri olarak bağlanmış gerilim kaynağı olarak çalışan seri aktif güç filtresi ve yüke paralel bağlanmış akım kaynağı olarak çalışan paralel aktif güç filtre sisteminin birlikte kullanılması ile oluşan BGKD blok şeması gösterilmektedir. Paralel ve seri AGF’de gerilim kaynağı eviricisi kullanılmaktadır. Konvertörün DA tarafında DA enerji depolama elemanı olarak bir kondansatör kullanılmakta ve yapısı Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Bu filtrelerde, enerji

depolama kondansatörünün DA gerilimi, maksimum kaynak geriliminden daha büyük olmalıdır.



Şekil 5.1. Birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok şeması.

BGKD sistemi; üretim süreçlerinde, fabrikalar ve tesislerde üretkenliğin artırılması, etkinlik, güvenlik ve kalite unsurlarının iyileştirilmesi açısından oldukça iyi bir çözüm sunulmaktadır.

Seri AGF denetim yönteminde, geriliminin sebep olduğu güç kalitesi problemlerini düzeltecek referans filtre gerilimleri  $V'_{fabc}$  hesaplanmaktadır. SAGF filtre hat gerilimleri  $V_{Tabc}$  ile hesaplanan referans filtre gerilimleri  $V'_{fabc}$  darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Böylece kaynak gerilim problemlerini ve doğrusal olmayan yükten kaynaklanan kaynak/yük akımı harmonik problemlerini düzeltecek referans filtre  $i'_{fabc}$  akımları hesaplanmaktadır.

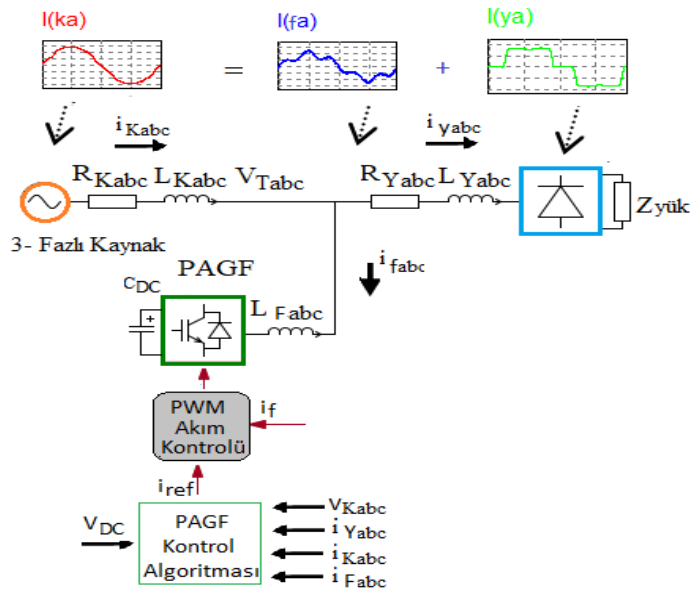
Paralel AGF filtre hat akımları  $i_{fabc}$  ile hesaplanan referans filtre  $i'_{fabc}$  akımları PWM tekniği ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmekte ve OBN'daki yük akım kaynaklı problemler düzeltilmektedir.

## 5.2. Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF)

PAGF'nin temel görevi, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği akım harmoniklerinin filtrelenmesi ve dengelenmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve nötr

akımların yok edilmesi amacıyla yüke paralel bağlanmaktadır. PAGF, şebekeden sadece temel frekanstaki akım bileşeninin çekilmesini sağlayarak bir akım kaynağı gibi davranmaktadır. PAGF, güç kalitesi problemlerinden olan harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunun yanında aynı zamanda dengesiz ve doğrusal olmayan yüklerle yüklenmiş güç sistemini dengeleyebilir (Feng ve Wang, 2017).

Paralel aktif güç filtresi, kullanılan yöntemle sürekli olarak şebeke veya yük akımlarını okuyarak doğrusal olmayan yüklerle ilgili güç kalitesi problemlerine sebep olan olayları düzeltecek referans filtre akımlarını üreterek kapalı-döngü denetleyici olarak çalışmaktadır (Khadkikar ve Chandra, 2008).



Şekil 5.2. Paralel aktif güç filtresi genel şeması.

Şekil 5.2’de paralel filtrenin devreye bağlanması ve çalışma ilkesi gösterilmiştir. Paralel aktif güç filtresi, IGBT tabanlı bir gerilim kaynağı evirici devresi (GKE), eviriciyi besleyen bir kaynak, eviriciyi şebekeye bağlayan bir bağlantı transformatörü ve anahtarlama sinyalleri üreten PWM akım denetleyiciden oluşmaktadır. Denetim biriminde eviricinin şebekeye enjekte edeceği referans akımlar üretilebilmesi için anahtarlarının uygun şekilde tetiklenmesi gerekmektedir (Singh ve Venkateswarlu, 2010).

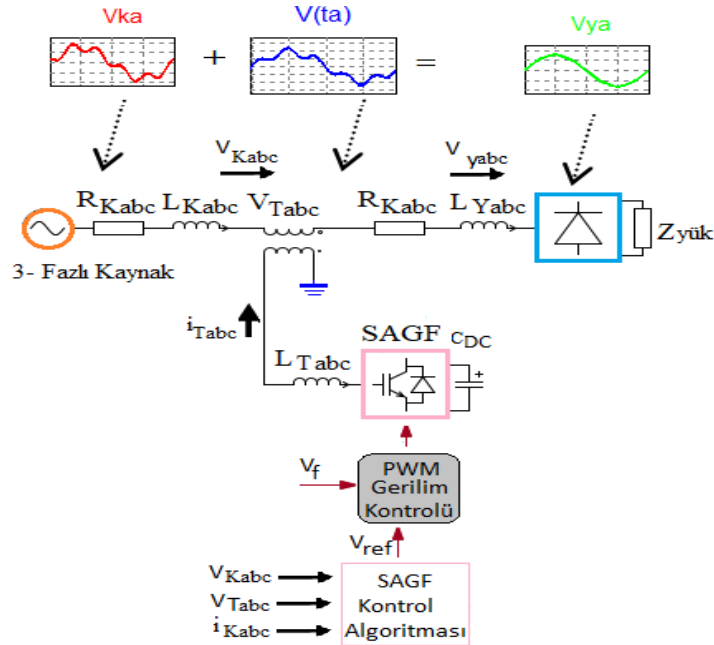
Anahtarlama sinyalleri için gerekli olan kapı darbeleri, sinüzoidal PWM, uzay-vektör PWM, histerezis PWM, vb. gibi akım denetim yöntemleri ile üretilmektedir.

Şekilde görüldüğü gibi doğrusal olmayan yük akımı kare dalga şeklinde olduğu halde aktif filtre harmonik akımlarının ters işaretlisini sisteme enjekte ettiği için şebekeden çekilen akım sinüzoidal olmaktadır (Raju, vd., 2013; Liu, vd., 2017).

### 5.3. Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF)

Seri aktif güç filtresi ile şebeke gerilim harmonik kompanzasyonu yapılmakta, gerilim yükselme-düşmeleri düzeltilmekte, gerilimde dalgalanmaları ve gerilim dengesizlikleri giderilebilmektedir. Seri aktif güç filtresi, yükten önce bir transformatör yardımıyla sisteme seri olarak bağlandığı için, kaynak ile yük arasında seri bir gerilim kaynağı olarak çalışmaktadır (Patel ve Bhavsar, 2015).

SAGF genellikle üç farklı birimden oluşmaktadır. Birincisi gerilim kaynaklı PWM evirici güç katı, ikinci birim şebeke güç hattına seri bağlı tek fazlı transformatörler ve üçüncü birimi ise yüksek anahtarlama frekans sinyalleri üreten denetim birimidir (Modi, vd., 2012). PWM evirici katı, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi DA bara tarafına bir kondansatör bağlanmış üç fazlı bir GKE devresinden meydana gelmektedir (Feng ve Wang, 2017).



Şekil 5.3. Seri aktif güç filtresi genel şeması.

Seri aktif güç filtreleriyle gerilim harmonik kompanzasyonu yapılırken, tepki hızlarının çok yüksek olması nedeniyle aynı zamanda harmonikleri de filtrelemektedir.

Seri AGF'ler AA gerilimlerin ayarlanmasını ve dengelenmesini yapmaktadır. Seri aktif güç filtrelerin verimlerinin yüksek olması, güç katsayısının 1'e çok yakın bir değerde tutulabilmesi, doğrusal olmayan yüklerde kullanılabilmeleri ve akımın tam bir sinüs dalgasına benzetilebilmesi kullanımda tercih nedeni olmaktadır (Dursun, 2003).

**Tablo 5.1.** BGKD sistemini oluşturan PAGF ve SAGF birimlerinin görevleri.

PAGF	SAGF
Akım harmoniklerini filtreleme	Gerilim harmoniklerini filtreleme
Reaktif akım kompanzasyonu	Gerilim regülasyonu
Akım dengeleme	Gerilim dengeleme
Nötr akım kompanzasyonu	Gerilimde düşme, yükselme, kesinti, dalgalanma, çentik, gürültü giderilmesi
DA gerilim regülasyonu	

BGKD sistemini oluşturan seri AGF ve paralel AGF birimlerinin fonksiyonları Tablo 5.1'de verilmektedir. BGKD sistemi aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Doğrusal olmayan yüklerin meydana getirdiği kaynak akımındaki harmonikleri en aza indirerek şebeke akımı ve güç kalitesini iyileştirmektedir.
- Yükün gerektirdiği reaktif gücü sağlayarak, şebeke akım ve geriliminin sürekli aynı fazda olmasını sağlamakta böylece ilave güç faktörü düzeltme ekipmanlarına gerek duyulmamaktadır.
- Kaynak gerilim çökmesi durumunda yük gerilimi istenen değerde tutulabilmektedir (Özdemir, vd., 2006).

#### 5.4. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri

BGKD'de güç katsayısı ve güç kalite problemlerini düzeltmek için kontrol devreleri kullanılmaktadır. Bu kontrol devreleri ideal bir sinüzoidal akım dalga şekli ve 1'e yakın güç katsayısı elde edilmesini sağlamaktadır. Paralel AGF ve seri AGF'nin kompanzasyon kabiliyeti büyük ölçüde referans akım üretiminin doğruluğuna bağlıdır. Genel olarak, literatürde zaman ve frekans alanı olmak üzere iki tip kontrol tekniği kullanılmaktadır. Zaman alanındaki tekniklerin avantajı güç sistemindeki değişimlere karşı cevabının hızlı olmasıdır. Ayrıca uygulaması kolay ve hesaplamaları sıkıntı vermemektedir. Zaman alanındaki teknikler, frekans alanından daha kolay uygulanabilmektedir (Czarnecki, 2014).

**Tablo 5.2.** BGKD’de kullanılan kontrol yöntemleri (Deshpand, vd., 2013).

Zaman alanı	Frekans alanı
Anlık reaktif güç teorisi (ARGT)	Hızlı fourier dönüşümü (FFT)
Senkron referans yapı (SRY)	Ayrık fourier dönüşümü (DFT)
Güç dengeleme yöntemi (PBT)	Bulanık mantık denetleyici
Kayan mod yöntemi (SMC)	Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)
STF, MAF, HSF filtre yöntemleri	Dalgacık dönüşümü
Faz açısı yöntemi (PAC)	$H_{\infty}$ tabanlı model eşleştirme yöntemi
Birim vektör şablon (UVTT) tekniği	Kalman Filtreler

ARGT, üç fazlı gerilim ve akım sinyallerini clarke dönüşümünü kullanarak iki fazlı sinyallere dönüştürerek çalışmaktadır. Aktif ve reaktif güçler, bu kontrol tekniğinde herhangi bir zaman gecikmesi olmadan hesaplanmaktadır (Panchbhai, vd., 2017). Anlık aktif ve reaktif güçlerin farklı filtreleme yöntemleri (AGF, YGF ve MAF) ile harmonik aktif ve reaktif güçleri elde edilmektedir. Harmonik aktif ve reaktif güçlerden ters clarke dönüşümü kullanılarak referans akım veya gerilim bileşenleri elde edilmektedir.

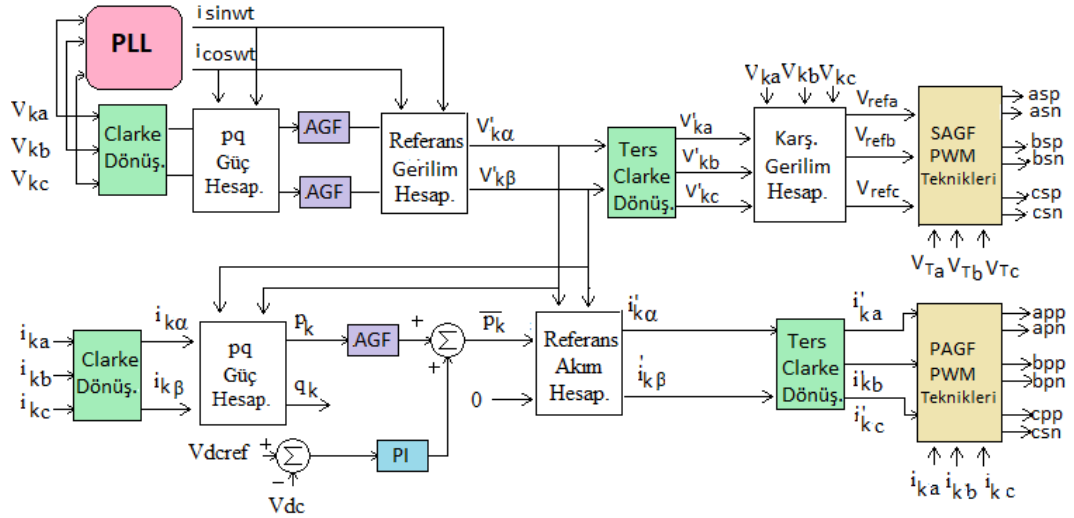
SRY yönteminde dengeleme sinyalleri PLL bloğu kullanılarak şebeke gerilimleriyle senkronize edilmektedir. Bu kontrol tekniği, düzensiz gerilim koşullarında etkilidir (Senthilnathan ve Annapoorani, 2016).

Geliştirilmiş SRY yönteminde referans akımları için üç faz akımları önce  $\alpha\beta$  bileşenlerine ardından dq bileşenlerine dönüştürülerek elde edilmektedir. Güç dengeleme yönteminde, DA bara gerilimi ile üç fazlı gerilimler algılanmaktadır (Shabib, vd., 2017). Yapılan kontrol yöntemlerinde anahtarlama sinyalleri için sinüzoidal PWM, histerezis PWM ve uzay vektör PWM teknikleri kullanılmaktadır (Raju, vd., 2013; Salunkhe ve Gaur, 2017; Liu, vd., 2017).

#### 5.4.1. ARGT-ARGT kontrol yöntemi

ARGT-ARGT kontrol yönteminde seri ve paralel aktif güç filtresinde anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde kaynak gerilimleri ( $V_{kabc}$ ), kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ), seri aktif güç filtre hat gerilimleri ( $V_{Tabc}$ ) ve DA bara gerilimi ( $V_{DA}$ ) olmak üzere toplam dört ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. ARGT

kontrol yöntemi anlık aktif ve reaktif güçlerin hesaplanmasına dayanmaktadır (Czarnecki, 2014; Harirchi ve Simoes, 2018). Şekil 5.4'te detaylı ARGV-ARGV kontrol yöntemi gösterilmektedir.

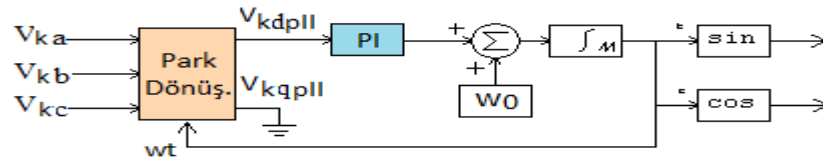


Şekil 5.4. ARGV-ARGV kontrol yöntemi.

Seri AGF'de anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. Pq yöntemi olarak da bilinen anlık reaktif güç yöntemi ilk kez Akagi tarafından aktif güç filtrelerinin kontrolüne uygulanmak amacıyla ileri sürülmüştür (Akagi, vd., 1984). 3 fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  bileşenleri Eşitlik 5.1'deki clarke dönüşümü kullanılarak elde edilmektedir (Harirchi ve Simoes, 2018).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$



Şekil 5.5. PLL kontrol devresi.

$$\begin{bmatrix} V_{dppll} \\ V_{qppll} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

PLL blok şemasında verildiği üzere giriş gerilimi olarak kullanılan fazlar arası gerilimler Eşitlik 5.3'te verildiği gibi hesaplanmaktadır. Gerilimin d bileşeni PI denetleyiciden geçirilmektedir. Temel açısal frekans  $2\pi f$ , PI çıkışına eklenmekte ve bu hesaplamanın integrasyonu ile park dönüşüm açısı ( $\omega t$ ) elde edilmektedir. Böylece, sinüzoidal giriş akımı referanslarını üretmek ve birim vektörünün koordinatlarını elde etmek için dönüşüm açısı  $\omega t$  kullanılmaktadır. SRY PLL çıkışındaki  $\omega t$ , ölçülen kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ile aynı faz açısındadır (Modesto, vd., 2016).

Eşitlik 5.1'de verilen 3 fazlı gerilimlerin  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki karşılıkları ( $V_{k\alpha}$  ve  $V_{k\beta}$ ) ve PLL tarafından üretilen  $i_\alpha = \sin(\omega t)$  ve  $i_\beta = \cos(\omega t)$  akımlar kullanarak kaynak gerilimine ait anlık gerçek güç (p) ve sanal güç (q) Eşitlik 5.4'te elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k\alpha} & V_{k\beta} \\ -V_{k\beta} & V_{k\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\sin\alpha} \\ i_{\cos\beta} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

P ve q'nun DA bileşenleri alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilerek ayırt edilmekte ve bu bileşenler Eşitlik 5.5'te verilen ters çevrim matrisi girişine uygulanarak, 3-fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  koordinatlarında karşılıkları ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) elde edilmektedir (Vinnakoti ve Kota, 2017).

$$\begin{bmatrix} V'_{k\alpha} \\ V'_{k\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(i_{\sin\alpha} + i_{\cos\beta})^2} \begin{bmatrix} V_{k\alpha} & V_{k\beta} \\ -V_{k\beta} & V_{k\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Eşitlik 5.6'daki ters clarke dönüşümü kullanılarak gerilimlerin  $\alpha\beta$  bileşenleri ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ), abc bileşenlerine dönüştürülmektedir.

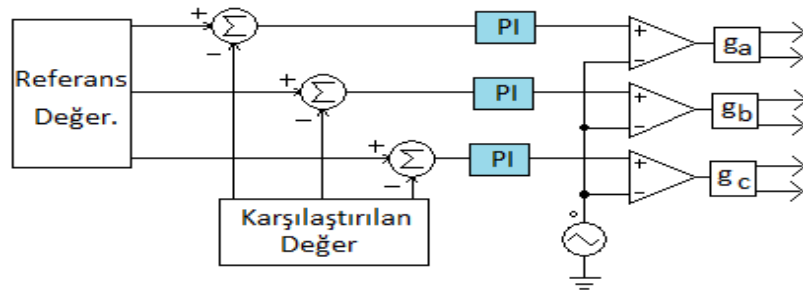
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Eşitlik 5.8'de, dönüşüm sonrası elde edilen gerilimlerden kaynak gerilimleri çıkarılarak referans gerilimler hesaplanmıştır.

$$V_{refa} = V_{ka} - V'_{ka}, V_{refb} = V_{kb} - V'_{kb}, V_{refc} = V_{kc} - V'_{kc} \quad (5.8)$$

Son olarak Eşitlik 5.8 ile hesaplanan gerilimler ( $V_{refa}, V_{refb}, V_{refc}$ ) ile seri AGF tarafındaki filtre gerilimleri ( $V_{Ta}, V_{Tb}, V_{Tc}$ ) karşılaştırılarak sinüzoidal PWM tekniğiyle anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) tekniği, inverterin çıkış gerilimi ve çıkış frekansını sinüs fonksiyonlarına göre doğrudan kontrol edebilmektedir. SPWM inverter; güç elektroniğinde, güç anahtarlarının açılıp kapanması için bir dizi gerilim darbesi üretilebilmesi ve harmoniklerin azaltılması için kullanılmaktadır.



Şekil 5.6. Sinüzoidal PWM karşılaştırma devresi.

Anahtarlama sinyalleri, sinüzoidal ve üçgen dalga formlarının karşılaştırılmasıyla üretilir. Sinüzoidal sinyalin üçgen sinyalinden daha pozitif olduğu

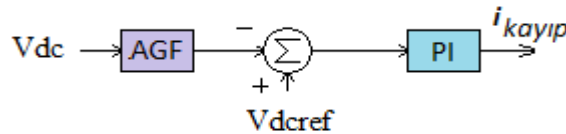
zaman aralıklarında anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Üretilen PWM dalga formu daha sonra invertör devresine bağlı IGBT'leri veya diğer yarı iletken cihazları sürmek için kullanılmaktadır (Sahoo ve Bhattacharya, 2018).

Paralel AGF'de anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. ARG'T yönteminde, PAGF yük akımlarındaki tüm harmonik bileşenleri telafi edecek şekilde referans akımları üretilmektedir. Yük akımlarının temel bileşenleri clarke dönüşümü ile elde edilmektedir. Kaynak gerilimlerini izleyen PLL devresi ile referans sinüs, cosinüs dalga formları elde edilmektedir. Eşitlik 5.2'deki clarke dönüşümü ile kaynak akımlarının  $\alpha\beta$  bileşenleri elde edilmektedir. Kaynak akımlarının  $\alpha\beta$  bileşenleri ile Eşitlik 5.4'te elde edilen gerilimler ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) kullanılarak Eşitlik 5.9 ile aktif ve reaktif güçler hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} p_k \\ q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{k\alpha} & V'_{k\beta} \\ -V'_{k\beta} & V'_{k\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{k\alpha} \\ i_{k\beta} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Kapalı döngü geri bildirim sisteminde, hata referans ve gerçek değerler arasındaki farktır. DA gerilim regülasyonunda kullanılan bir PI kontrolörünün tasarlanması için, giriş-çıkış değişkenleri ve bozulma sinyali arasında transfer fonksiyonunun elde edilmesi gerekmektedir. DA bara gerilimi ve kaynak akımı, sırasıyla çıkış ve giriş değişkenleri olarak kabul edilmektedir. Oransal-integral (PI) için kontrolör çıkışı Şekil 5.7'de hesaplanmaktadır. DA bara gerilimi referans değeri ile karşılaştırılır ve gerekli kayıp güç ( $p_{kayıp}$ ) bir PI kontrolöründen geçirilerek Eşitlik 5.10'da elde edilmektedir.

$$p_{kayıp} = k_p x(V_{dcref} - AGF(V_{dc})) + k_i x \int (V_{dcref} - AGF(V_{dc})) dt \quad (5.10)$$



Şekil 5.7. Gerilim regülasyon bloğu.

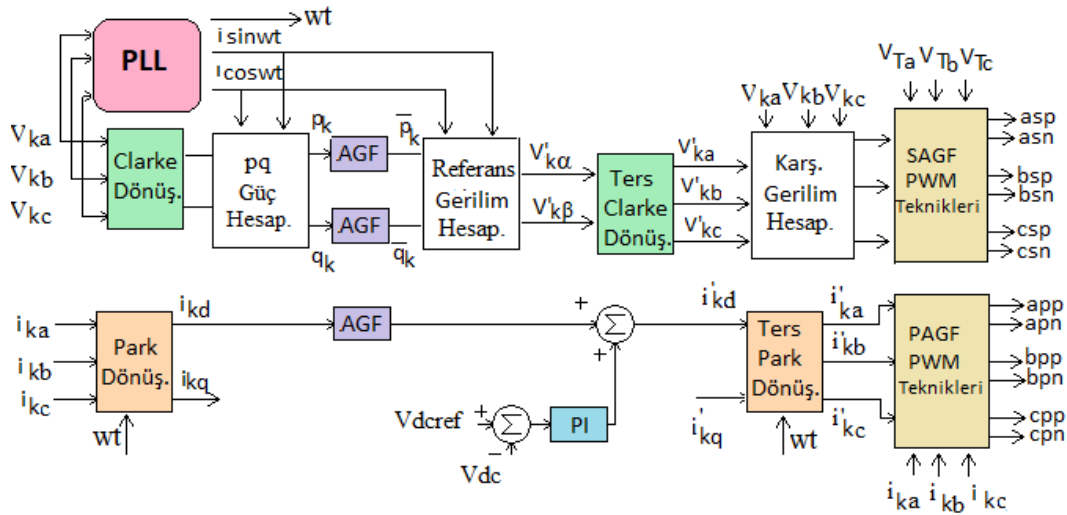
Eşitlik 5.11'de aktif gücün, DA bileşeni ( $\overline{p_k}$ ) kayıp güce ilave edilerek referans akım bileşenlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i'_{k\alpha} \\ i'_{k\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(V'_{k\alpha} + V'_{k\beta})^2} \begin{bmatrix} V'_{k\alpha} & V'_{k\beta} \\ -V'_{k\beta} & V'_{k\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p}_k + p_{kayıp} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Eşitlik 5.11'de üretilen  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki referans akım değerlerinin ters clarke dönüşümüyle Eşitlik 5.7 kullanılarak referans abc akım bileşenleri elde edilmektedir. Referans abc akımları ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) ile karşılaştırılarak, hata bir PI denetleyiciden geçirilmektedir. Sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak gerekli kapı darbeleri üretilmektedir.

#### 5.4.2. ARGT-SRY kontrol yöntemi

ARGT-SRY kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde anlık reaktif güç ve paralel aktif güç filtresinde senkron referans yapı yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.8'de detaylı ARGT-SRY kontrol yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.8. ARGT-SRY kontrol yöntemi.

Seri AGF'de anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. 3 fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  bileşenleri Eşitlik 5.1 kullanılarak elde edilmektedir. Eşitlik 5.4 ile 3-fazlı gerilimlerin  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki karşılıkları ( $V_{k\alpha}$  ve  $V_{k\beta}$ ) ve PLL tarafından üretilen  $i_\alpha = \sin(\omega t)$  ve  $i_\beta = \cos(\omega t)$  kullanarak kaynak gerilimine ait anlık aktif güç ( $p$ ) ve reaktif güç ( $q$ ) elde edilmektedir (Harirchi ve Simoes, 2018).

$p$  ve  $q$ 'nin DA bileşenleri alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilerek ayırt edilmekte ve bu bileşenler Eşitlik 5.5'te verilen ters çevrim matrisi girişine uygulanarak,

3-fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  koordinatlarında karşılıkları ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) elde edilmektedir. Gerilimlerin  $\alpha\beta$  bileşenleri ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ), Eşitlik 5.6'daki ters clarke dönüşümü kullanılarak abc bileşenleri elde edilmektedir.

Eşitlik 5.8'de dönüşüm sonrası elde edilen gerilimlerden kaynak gerilimleri çıkarılarak referans gerilimler hesaplanmaktadır. Referans gerilimler ( $V_{refa}, V_{refb}, V_{refc}$ ) ile seri AGF tarafındaki filtre gerilimleri ( $V_{Ta}, V_{Tb}, V_{Tc}$ ) karşılaştırılarak sinüzoidal PWM tekniği ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Paralel AGF'de SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.12'deki park dönüşüm ile kaynak akımlarının dq bileşenleri hesaplanmaktadır (Kesler ve Ozdemir, 2011; Vinnakoti ve Kota, 2017). Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5'teki PLL devresi kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Kaynak akımının d bileşeni AGF'den geçirilerek kayıp akıma ilave edilmekte ve referans akımlarının d ve q bileşeni elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

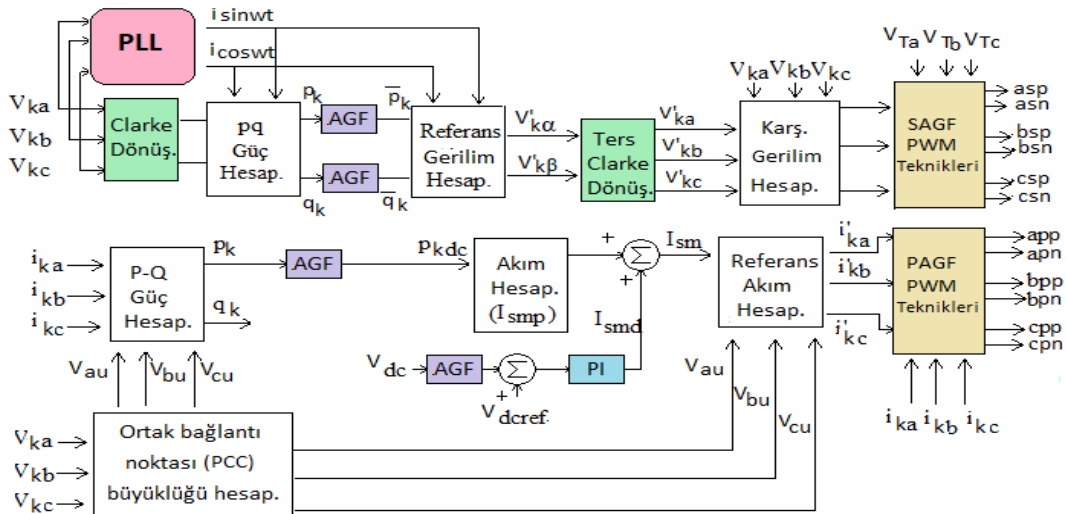
$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Eşitlik 5.15'teki ters park dönüşümü kullanılarak referans abc bileşenleri hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans akım değerleri

$(i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc})$ , kaynak akım değerleriyle  $(i_{ka}, i_{kb}, i_{kc})$  karşılaştırılarak sinüzoidal PWM tekniği ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

### 5.4.3. ARG-T-PBT kontrol yöntemi

ARG-T-PBT kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde anlık reaktif güç ve paralel aktif güç filtresinde güç dengeleme yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.9'da detaylı ARG-T-PBT kontrol yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.9. ARG-T-PBT kontrol yöntemi.

Seri AGF'de anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. 3 fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  bileşenleri Eşitlik 5.1 kullanılarak elde edilmektedir. Eşitlik 5.4 kullanılarak anlık aktif ve reaktif güç elde edilmektedir. P ve q'nun DA bileşenleri alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilerek ayırt edilmektedir. Güçlerin DA bileşenleri Eşitlik 5.5'te verilen ters çevrim matrisi girişine uygulanarak, 3-fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  koordinatlarında karşılıkları ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) elde edilmektedir. Gerilimlerin  $\alpha\beta$  bileşenleri ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ), Eşitlik 5.6'daki ters clark dönüşümü kullanılarak abc bileşenleri elde edilmektedir (Harirchi ve Simoes, 2018).

Eşitlik 5.8 kullanılarak dönüşüm sonrası elde edilen gerilimlerden kaynak gerilimleri çıkarılarak referans gerilimler hesaplanmaktadır. Referans gerilimler ( $V_{refa}, V_{refb}, V_{refc}$ ) ile seri AGF tarafındaki filtre gerilimleri ( $V_{Ta}, V_{Tb}, V_{Tc}$ ) karşılaştırılarak sinüzoidal PWM tekniği ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Paralel AGF’de güç dengeleme yönteminde kullanılmaktadır. Bu yöntemde ortak bağlantı noktası (OBN) gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) ve filtrenin DA gerilimi ( $V_{DA}$ ) kullanılmaktadır. Ortak bağlantı noktası (OBN) geriliminin büyüklüğü Eşitlik 5.16’da hesaplanmaktadır (Shabib, vd., 2017).

$$V_t = \sqrt{\frac{2(V_{ka}^2 + V_{kb}^2 + V_{kc}^2)}{3}} \quad (5.16)$$

Faz ana gerilimlerinin sinüs dalgaları şöyle hesaplanmaktadır:

$$v_{au} = \frac{V_{ka}}{V_t}, v_{bu} = \frac{V_{kb}}{V_t}, v_{cu} = \frac{V_{kc}}{V_t}, \quad (5.17)$$

Kaynak akımının aktif gücü Eşitlik 5.18’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$p_k = V_t(i_{ka}xv_{au} + i_{kb}xv_{bu} + i_{kc}xv_{cu}) = \overline{p_k} + \widetilde{p_k} \quad (5.18)$$

Anlık gücün iki bileşeni vardır. Birincisi DA bileşeni, ikincisi ise AC bileşenidir. Güç faktörünün düzeltilmesi için, yükün DA bileşeni kullanılmaktadır. Gücünün DA bileşeni, ikinci dereceden alçak geçiren filtreden geçirilerek elde edilmektedir. Besleme akımı  $I_{sm}$  iki bileşene sahiptir. İlk olarak, gücün DA bileşeni için gerekli olan  $I_{smp}$ , ikinci bileşen ise filtrenin kendi kendini destekleyen DA bara gerilimi için gerekli olan  $I_{smd}$ ’dir (Shabib, vd., 2017).

$$I_{sm} = I_{smp} + I_{smd} \quad (5.19)$$

$$I_{smp} = \left(\frac{2}{3}\right) \frac{\overline{p_{kd}}}{V_t} \quad (5.20)$$

$$I_{smd} = K_p V_{dc} + K_i \int V_{dc} dt \quad (5.21)$$

$$V_{dce} = V_{dcref} - V_{dc} \quad (5.22)$$

$V_{DA}$  ve  $V_{DAref}$  sırasıyla filtrenin DA gerilimi ve referansıdır.  $K_p$  ve  $K_i$ , DA bara gerilimi filtresi üzerinden PI kontrolörünün oransal ve integral kazançlarıdır. Kaynak akımının üç fazlı referansı Eşitlik 5.23 kullanılarak hesaplanmaktadır.





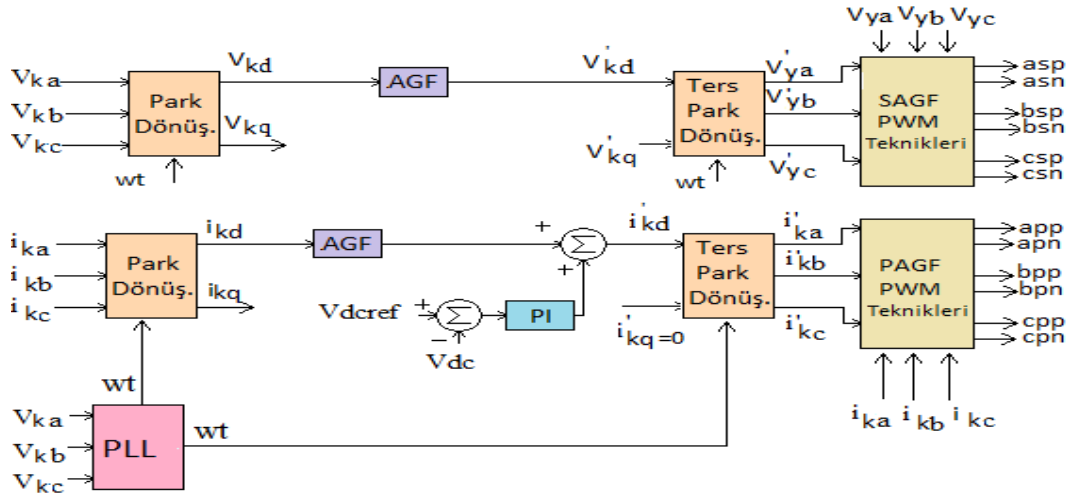
değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırmaktadır. Sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Paralel AGF'de güç dengeleme yöntemi kullanılmaktadır. OBN geriliminin büyüklüğü Eşitlik 5.16'da hesaplanmaktadır. Kaynak akımının aktif gücü, faz ana gerilimlerinin sinüs dalgaları ve OBN geriliminin büyüklüğü kullanılarak Eşitlik 5.14'teki gibi hesaplanmaktadır. Gücünün doğru bileşeni, ikinci dereceden alçak geçiren filtre kullanılarak elde edilmektedir. Eşitlik 5.18'de hesaplanan  $I_{smd}$ , aktif güce ilave edilmektedir. Referans abc bileşenleri Eşitlik 5.23 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Referans abc akım değerleri ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) ile kaynak akım değerleri ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) karşılaştırılmaktadır. Gerekli anahtarlama sinyalleri sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak üretilmektedir.

#### 5.4.6. SRY-SRY kontrol yöntemi

SRY-SRY kontrol yönteminde seri ve paralel AGF'de SRY yöntemi kullanılmaktadır. (Kumar ve Bhole, 2017). Detaylı SRY-SRY kontrol yöntemi Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. SRY-SRY kontrol yöntemi.

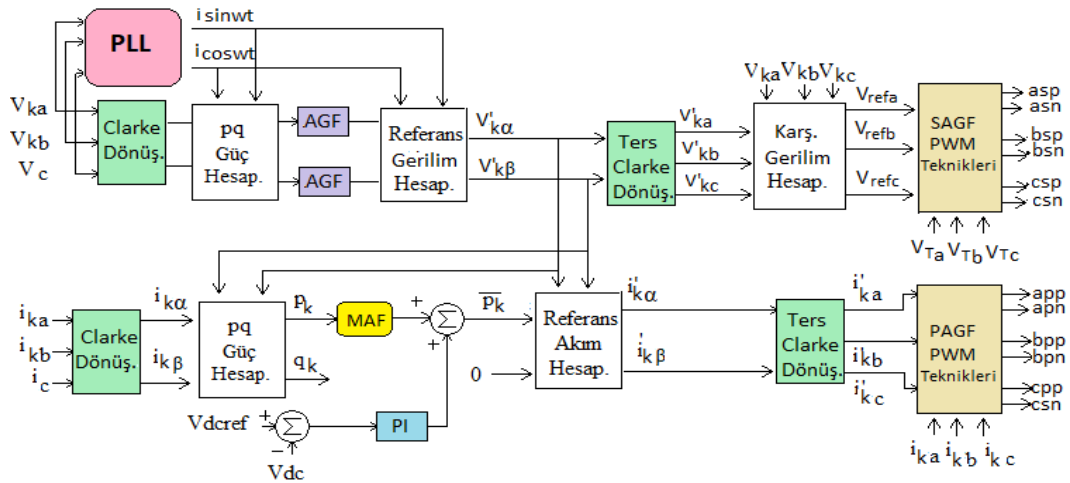
Seri AGF'de SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.12'deki park dönüşüm ile kaynak gerilimlerinin dq bileşenleri hesaplanmaktadır. Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5'teki PLL devresi kullanılmaktadır.

Kaynak geriliminin d bileşeni AGF'den geçirilerek referans gerilimlerin d ve q bileşenleri elde edilmektedir. Referans abc bileşenleri ters park dönüşümü ile Eşitlik 5.14 kullanılarak hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans gerilim değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırmaktadır. Anahtarlama sinyalleri sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak elde edilmektedir.

Paralel AGF'de senkron referans yapı yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.13'teki park dönüşüm kullanılarak kaynak akımlarının dq bileşenleri hesaplanmaktadır. Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5'teki PLL devresi kullanılmaktadır. Kaynak akımının d bileşeni AGF'den geçirilerek kayıp akıma ilave edilmektedir. Eşitlik 5.15'teki ters park dönüşümü ile akımın dq bileşenleri referans abc bileşenlerine dönüşmektedir. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans akım abc değerleri ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ), kaynak akım değerleriyle ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) karşılaştırmakta ve sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

#### 5.4.7. Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi

Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T ile BGKD kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde anlık reaktif güç ve paralel aktif güç filtresinde anlık reaktif güç hareketli ortalama filtre yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.13'te detaylı geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi.

Seri AGF’de kullanılan anlık reaktif güç yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.24’te kaynak gerilimlerinin a ve b fazı ( $V_{ka}$  ve  $V_{kb}$ ) kullanılarak c fazı ( $V_c$ ) hesaplanmaktadır.

$$V_c = -V_{ka} - V_{kb} \quad (5.24)$$

3 fazlı kaynak gerilimlerinin ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_c$ ) Eşitlik 5.1 kullanılarak  $\alpha\beta$  bileşenleri elde edilmektedir. 3-fazlı gerilimlerin  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki karşılıkları ( $V_{k\alpha}$  ve  $V_{k\beta}$ ) ve PLL tarafından üretilen  $i_\alpha = \sin(\omega t)$  ve  $i_\beta = \cos(\omega t)$  kullanarak kaynak gerilimine ait anlık aktif güç ve reaktif güç Eşitlik 5.4 ile elde edilmektedir. Güçlerin DA bileşenleri alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilerek ayırt edilmekte ve bu bileşenler Eşitlik 5.5’te verilen ters çevrim matrisi girişine uygulanarak, 3-fazlı kaynak gerilimlerinin  $\alpha\beta$  koordinatlarında karşılıkları ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) elde edilmektedir. Gerilimlerin  $\alpha\beta$  bileşenleri ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ), Eşitlik 5.6’daki ters clarke dönüşümü kullanılarak abc bileşenlerine dönüştürülmektedir. Eşitlik 5.8’de referans gerilimler hesaplanmaktadır. Hesaplanan referans gerilimler değerleri ( $V_{refa}$ ,  $V_{refb}$ ,  $V_{refc}$ ) ile seri AGF tarafındaki filtre gerilim değerleri ( $V_{Ta}$ ,  $V_{Tb}$ ,  $V_{Tc}$ ) karşılaştırılarak sinüzoidal PWM tekniğiyle anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Paralel AGF’de ARGV kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.25’te kaynak akımlarının a ve b fazı ( $i_{ka}$  ve  $i_{kb}$ ) kullanılarak c fazı ( $i_c$ ) hesaplanmaktadır.

$$i_c = -i_{ka} - i_{kb} \quad (5.25)$$

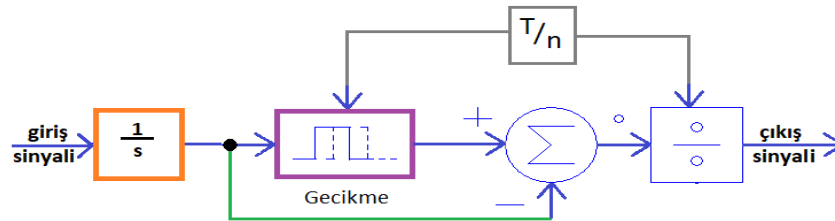
Kaynak akımlarının ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_c$ ) Eşitlik 5.2 kullanılarak  $\alpha\beta$  bileşenleri elde edilmektedir. Kaynak akımlarının  $\alpha\beta$  bileşenleri ile Eşitlik 5.4’te elde edilen gerilimler ( $V'_{k\alpha}$  ve  $V'_{k\beta}$ ) kullanılarak Eşitlik 5.9 ile aktif ve reaktif güçler hesaplanmaktadır.

Aktif güç, dinamik filtreleme yanıtını iyileştirmek için AGF yerine hareketli ortalama filtreden (MAF) geçirilmektedir. MAF, yük akımının dq bileşeninin dalgalanmalarını ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Bu filtre, DA bileşenini koruyarak yüksek frekans bileşenlerini sıfıra düşürmek ve örneklenmiş veri/sinyal dizisini düzenlemek için kullanılan basit bir FIR (Sonlu Dürtü Tepkisi) filtresidir (Sriranjani ve Jayalalitha, 2017).

Hareketli ortalama filtrenin modellenmesi için Eşitlik 5.27 ile ayrık transfer fonksiyonu hesaplanmaktadır. N, ortalama miktarların türetilmesi için kullanılan örnekleme verilerinin sayısını göstermektedir.

$$H(z) = \frac{1}{N} (1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-N+1}) = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \quad (5.26)$$

$$H(z) = \frac{1}{N} \left[ \frac{z}{z-1} - \frac{z}{z-1} z^{-N} \right] \quad (5.27)$$



Şekil 5.14. Hareketli ortalama filtre (MAF) kontrol bloğu.

$$MAF_{giriş} = \frac{n}{T} \int_{t-\frac{T}{n}}^t f(t) dt \quad (5.28)$$

Hareketli ortalama filtre, Şekil 5.14'te gösterilen blok diyagramı ile temsil edilmektedir. Bu diyagram, integral bloğu, geciktirme bloğu, çıkarma bloğu ve bölme bloğundan oluşmaktadır. Aktarım gecikmesi bloğunun çıkışı, T'nin T/n ile geciktirilmiş giriş sinyalidir, burada T, giriş sinyalinin temel bileşeninin periyodudur ve "n", bir tam sayıdır. Böylece, integral bloğunun çıkışı ile gecikme bloğunun çıkışı arasındaki fark, giriş sinyalinin  $[t-T/n, t]$  zaman aralığı boyunca integrasyonunu temsil etmektedir. Bölme bloğunda, çıkarma bloğunun çıktısı T/n integrasyon aralığına bölünür. Böylece, MAF çıkışı, T/n zaman aralığı boyunca hesaplanan giriş sinyalinin hareketli ortalamasıdır (Pal, vd., 2011).

$$MAF(s) = \frac{1-e^{-Tws}}{Tws} \quad (5.29)$$

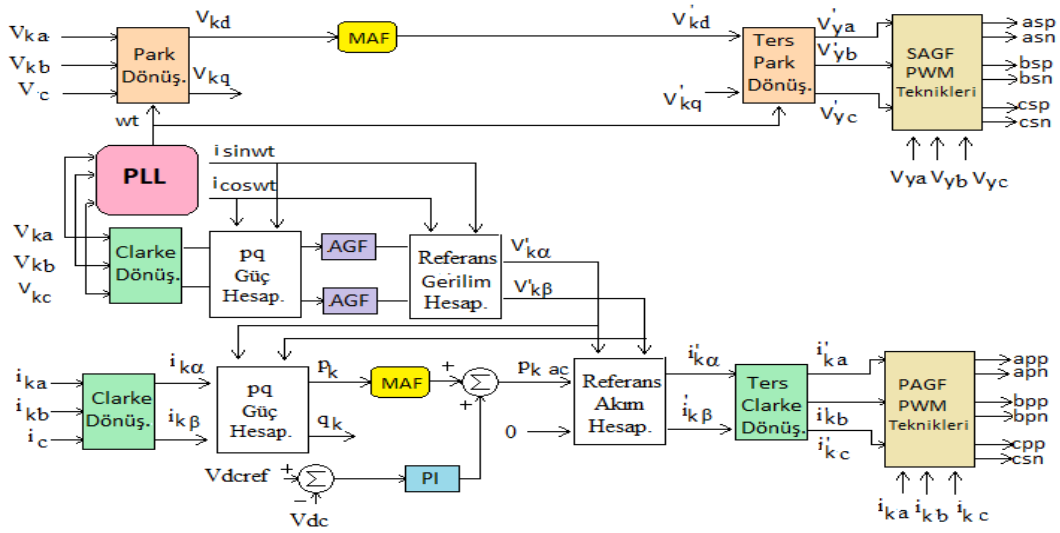
Filtre adından da anlaşıldığı gibi sürekli ortalamalar alan bir filtredir. Her yeni değer okunduğunda en eski değeri bırakır, yeni gelen değerle ile ortalamayı tekrar alır ve bunu çıkış olarak verir. Yani her okunan değerde ortalama değeri güncellenir

(Sriranjani ve Jayalalitha, 2017). MAF, integrasyon periyodunun ( $T$ ) tersi veya temel bileşen periyodu olarak tanımlanan eşzamanlı frekansın çoklu frekans bileşenlerini reddetme yeteneğine sahip, uygulanması kolay bir filtredir (Silva ve Negro, 2018). Filtre çıkışında elde edilen güç, Eşitlik 5.10'da hesaplanan kayıp güce ilave edilerek Eşitlik 5.11'deki referans akım hesaplama matrisinin girişine uygulanmaktadır (Senthilnathan ve Annapoorani, 2016).

Eşitlik 5.11'te elde edilen  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki kaynak akımlarının Eşitlik 5.7'deki ters carke dönüşümü ile referans abc akımları hesaplanmaktadır. Kaynak akım değerleri ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) ile referans akım değerleri ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) karşılaştırılmaktadır ve sinüzoidal PWM kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

#### 5.4.8. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi

Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde geliştirilmiş senkron referans yapı ve paralel aktif güç filtresinde MAF(ARGT) yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.15'te detaylı geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi.

Seri AGF'de SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Kaynak geriliminin c fazı Eşitlik 5.24 kullanılarak hesaplanmaktadır.  $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$  ve  $V_c$  gerilimleri Eşitlik 5.12'deki park dönüşümü ile dq bileşenleri hesaplanmaktadır. Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5'teki PLL devresi kullanılmaktadır.

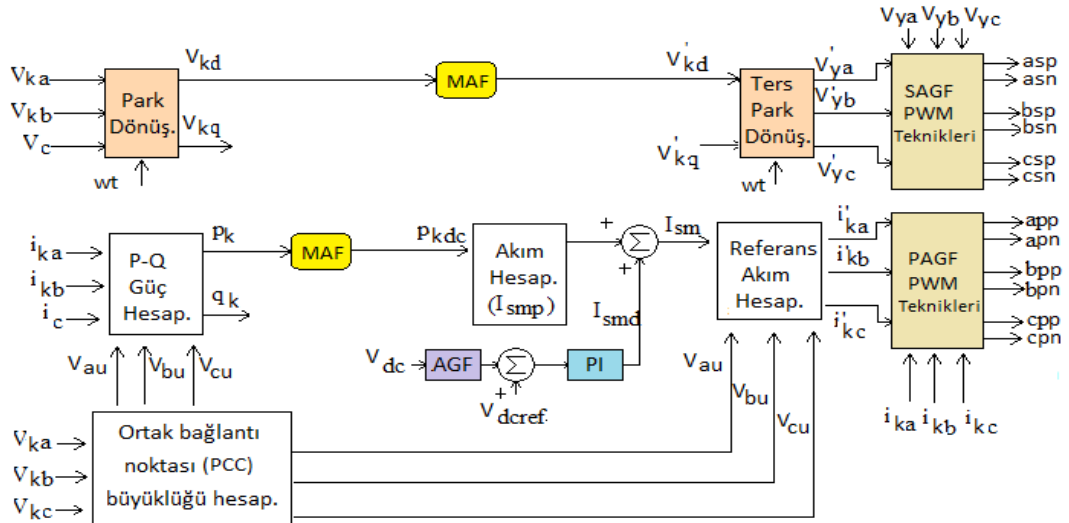
Kaynak geriliminin d bileşeni MAF filtreden geçirilerek referans gerilimlerin d ve q bileşenleri elde edilmektedir. Eşitlik 5.14'teki ters park dönüşümü ile referans abc bileşenleri hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans gerilim değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırmaktadır ve sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

Paralel AGF'de MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.25'te kaynak akımlarının a ve b fazı ( $i_{ka}$  ve  $i_{kb}$ ) kullanılarak c fazı ( $i_c$ ) hesaplanmaktadır. Eşitlik 5.2'deki clarke dönüşümü kullanılarak kaynak akımlarının ( $i_{ka}, i_{kb}, i_c$ )  $\alpha\beta$  bileşenleri elde edilmektedir. Aktif ve reaktif güçler Eşitlik 5.9'daki gibi hesaplanmaktadır.

Aktif güç, dinamik filtreleme yanıtını iyileştirmek için hareketli ortalama filtreden (MAF) geçirilmektedir. Filtre çıkışında elde edilen güç, Eşitlik 5.10'da hesaplanan kayıp güce ilave edilerek Eşitlik 5.11'deki referans akım hesaplama matrisinin girişine uygulanmaktadır. Eşitlik 5.11'te elde edilen  $\alpha\beta$  koordinatlarındaki kaynak akımlarının ters clarke dönüşümü ile referans abc akımları hesaplanmaktadır. Kaynak akım değerleri ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) ile referans akım değerleri ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) karşılaştırılmaktadır ve sinüzoidal PWM kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

#### **5.4.9. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi**

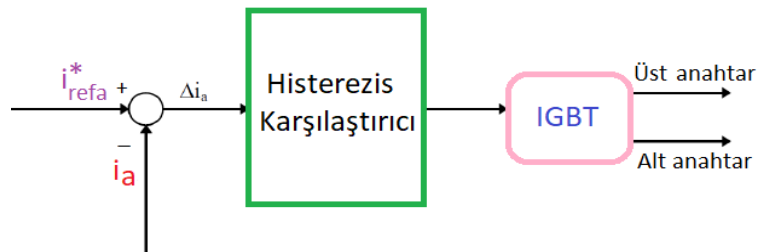
Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yönteminde, seri aktif güç filtresinde SRY ve paralel aktif güç filtresinde güç dengeleme hareketli ortalama filtre kaynak akımları yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.15'te detaylı geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi.

Seri AGF’de SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Kaynak geriliminin c fazı Eşitlik 5.24 kullanılarak hesaplanmaktadır.  $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$  ve  $V_c$  gerilimleri Eşitlik 5.11 kullanılarak park dönüşümü ile dq bileşenlerine dönüştürülmektedir. Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5’teki PLL devresi kullanılmaktadır.

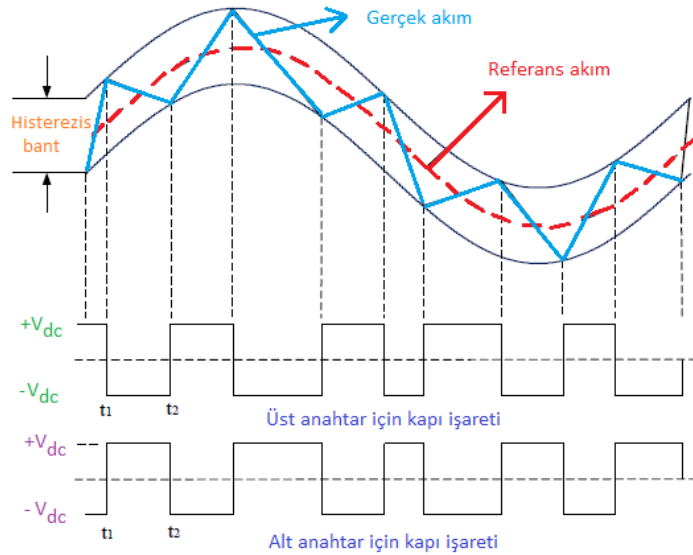
Kaynak geriliminin d bileşeni MAF filtreden geçirilerek referans gerilimlerin d ve q bileşenleri elde edilmektedir. Referans abc bileşenleri ters park dönüşümü ile Eşitlik 5.13 kullanılarak hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans gerilim değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırmaktadır ve histerezis PWM (HPWM) tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.



Şekil 5.17. Histerezis PWM kontrol tekniği blok şeması.

Şekil 5.17’de, histerezis PWM kontrol tekniği blok şeması verilmektedir. Histerezis akım kontrol yöntemi, zaman alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Histerezis kontrolör, gerçek akımı referans akımıyla karşılaştırırken bir histerezis bandı

kullanmakta ve hata, atanmış bir bandı aştığında anahtarlar için doğrudan sinyal komutları üretmektedir. Bu hata değerine göre bir karşılaştırıcı yardımıyla akımın belirli bir bant aralığında kalması sağlanmaktadır. Akım hatasının değeri, belirlenen bant genişliği  $H$  olmak üzere,  $+H/2$  üst ve  $-H/2$  alt sınırları ile karşılaştırılır. Evirici anahtarlarına ait kapı işaretleri, bu karşılaştırma verilerinden yararlanarak üretilir. Eviricinin bir fazı için kapı darbelerinin üretilmesi akımın üst sınıra ulaştığı  $t_1$  anında akımın düşürülmesi için evirici çıkışının  $-V_{dc}$  üretecek şekilde sürülmesi sağlanır ve alt anahtar tetiklenir. Akımın alt sınıra ulaştığı  $t_2$  anında ise akımın yükseltilmesi için evirici çıkışının  $+V_{dc}$  üretecek şekilde sürülmesi sağlanır. Bu durumda üst anahtar tetiklenir (Patel ve Bhavsar, 2015).



**Şekil 5.18.** Histeresis PWM akım ve gerilim dalgaları.

$i_{gerçek}(t) < i_{ref} - h(t)$  ise üst anahtar kapalı ve alt anahtar açık durumdadır.

$i_{gerçek}(t) > i_{ref} + h(t)$  ise üst anahtar açık ve alt anahtar kapalı durumdadır.

Filtre giriş reaktöründeki akım histeresis bandının üst limitini aştığında, anahtar kapatılır ve reaktör negatif gerilime maruz kalarak, alt anahtar açılır. Akım alt limit değerine ulaştığında ise pozitif gerilim uygulayarak reaktör akımının çıkışa geçmesi sağlanmaktadır (Vahedi ve Sheikholeslami, 2010).

HPWM tekniğinin avantajları devre yapısındaki basitlik, doğruluk değerinin yüksek olması, kolay uygulanabilirlik, sistem parametrelerinden etkilenmemesi ve sisteme cevap verme hızının yüksek olmasıdır. Kontrol devresi istenen büyüklük ve frekansta sinüs referans akım sinyali üretmekte ve gerçek akım sinyali ile karşılaştırılmaktadır (Yadaiah, vd., 2006; Xiu ve Liu, 2009).

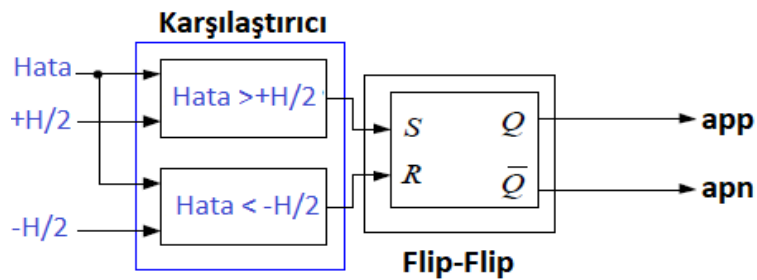
Histerezis kontrolörü (PWM) doğrusal olmayan bir özellik göstermektedir. Histerezis Eşitlik 5.26'da verilen fonksiyon ile modellenmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

$$f(s, \alpha) = \frac{1}{1+e^{-c(s+\alpha\Delta s)}} \quad (5.30)$$

$\alpha$ , histerezdeki alanı etkileyen bir ölçeklendirme parametresi,  $c$  fonksiyon eğimini gösteren şekil parametresidir.  $\alpha$  sifira eşit olduğunda, histerezis özelliği kaybolmakta,  $\alpha$  arttığında histerezis bandı genişlemektedir. Eşitlik 5.30 parametreleri APF değişkenleri ile yer değiştirmiş ve Eşitlik 5.27, anahtarlama fonksiyonunun referans ve gerçek akımlar arasındaki hataya bağlı olduğunu göstermektedir.

$$f_a(\varepsilon_\alpha, HB) = \frac{1}{1+e^{-c(\varepsilon_\alpha+HBx\Delta\varepsilon_\alpha)}} \quad (5.31)$$

Bir  $\Delta\varepsilon_\alpha$  nedeniyle, anahtarlama işlevinin cevabı aynı zamanda hatanın değişmesine de bağlıdır.



Şekil 5.19. Histerezis PWM.

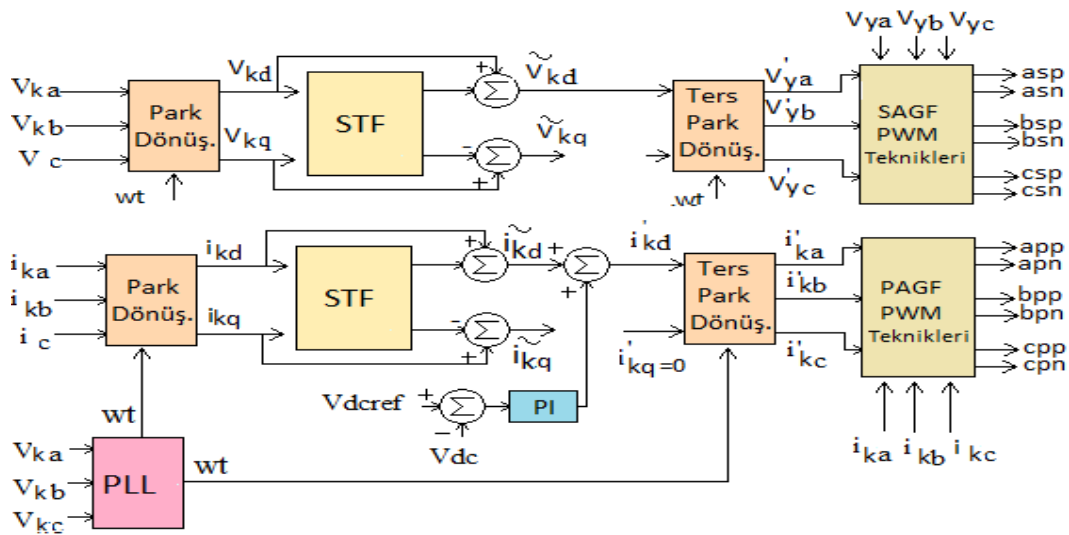
Paralel AGF'de güç dengeleme yöntemi kullanılmaktadır. Kaynak akımının  $c$  fazı Eşitlik 5.25 kullanılarak hesaplanmaktadır. Aktif güç, kaynak akımları ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_c$ ) kullanılarak Eşitlik 5.18'deki gibi hesaplanmaktadır. Aktif gücün alternatif bileşeni

MAF filtre kullanılarak elde edilmektedir. Hesaplanan güç referans akım hesaplama bloğuna gönderilmektedir.

Eşitlik 5.15 kullanılarak referans akım değerleri hesaplanmaktadır. Referans akım değerleri ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) ile kaynak akım değerleri ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) karşılaştırılmakta ve gerekli anahtarlama sinyalleri Şekil 5.17'deki histerezis PWM tekniği kullanılarak üretilmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

#### 5.4.10. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi

Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde ve paralel aktif güç filtresinde geliştirilen senkron referans yapı yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.20'de geliştirilen STF filtreli SRY-SRY yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5.20. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.

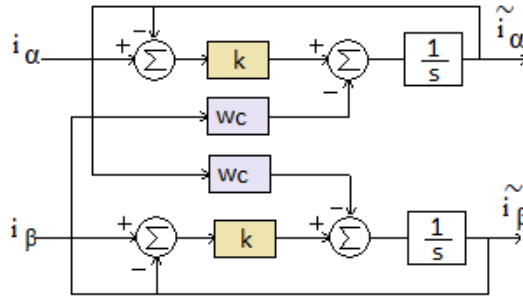
Seri AGF'de kullanılan geliştirilen STF filtreli SRY kontrol yönteminde kaynak geriliminin c fazı Eşitlik 5.24'teki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlik 5.12 kullanılarak park dönüşüm ile  $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$  ve  $V_c$  gerilimlerinin dq bileşenleri hesaplanmaktadır. Türkçede kendi kendini ayarlayan filtre olarak tanımlanan Self Tuning Filter (STF) PWM dönüştürücülerinin ürettiği gerilimin faz açılarını tahmin etmek için önerilmiş bir transfer fonksiyonudur. Gerilimin dq bileşenleri STF filtreden geçirilerek aktif gerilim elde edilmektedir (Biricik, 2018).

Yüksek geçiren veya alçak geçiren filtrelere dayalı klasik harmonik giderme yöntemleri yerine harmonik akımları çıkarmak için kendinden ayarlamalı filtre kullanılmaktadır. STF kontrol yöntemi üç bölüme ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi referans akım üretimi kısmıdır. STF'yi kullanarak harmonik akım referanslarını oluşturmayı içermektedir. STF'nin diğer kısımları ise kullanılan harmonikleri tanımlama kısmı ve kontrol yöntemidir. Şebeke gerilim sinyalleri STF'den geçirilerek üç fazlı sinüzoidal ve dengeli gerilim, sinüzoidal ve dengeli olmayan şebeke geriliminde temizlenmektedir (Abdusalam, vd., 2007, Ahmed, vd., 2012).

$$V_{xy}(t) = e^{j\omega t} \int e^{-j\omega t} U_{xy}(t) dt \quad (5.32)$$

Bu eşitlikte, girişteki  $U_{xy}(s)$  ve çıkış  $V_{xy}(s)$  aynı fazda olduğu gösterilmektedir. Transfer fonksiyonu, Eşitlik 5.32'nin Laplace dönüşümü sonrası elde edilmektedir.

$$H_s = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = \frac{s+j\omega}{s^2+\omega^2} \quad (5.33)$$



Şekil 5.21. STF kontrol bloğu.

Şekil 5.21'de kendinden ayarlamalı filtre blok şeması verilmektedir.  $H(s)$  transfer fonksiyonuna bir sabit  $k$  değeri eklenmekte ve böylece Denlem 5.34'te eşik frekansı  $\omega_c$  olan STF elde edilmektedir (Abdusalam, vd., 2007).

$$H_s = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = k \frac{(s+k)+j\omega_c}{(s+k)^2+\omega_c^2} \quad (5.34)$$

$H(s)$  parametresinde  $k$  değeri kullanıldığında, transfer fonksiyonu büyüklüğü sınırlı ve  $\omega=\omega_c$  olarak alınmaktadır. Ayrıca, kesme gecikmesi  $\omega_c$  için faz gecikmesi

sıfırdır.  $U_{xy}(s)$  giriş sinyallerini  $x_{\alpha\beta}(s)$  ile değiştirerek ve  $V_{xy}(s)$  çıkışlarını  $\widehat{x}_{\alpha\beta}(s)$  ile değiştirerek Eşitlik 5.35'teki fadeler elde edilmektedir (Ahmed, vd., 2012).

$$\widehat{x}_{\alpha}(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_{\alpha}(s) - k \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_{\beta}(s) \quad (5.35)$$

$$\widehat{x}_{\beta}(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_{\beta}(s) - k \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_{\alpha}(s) \quad (5.36)$$

$x_{\alpha\beta}(s)$  ve  $\widehat{x}_{\alpha\beta}(s)$  filtreleme öncesinde ve sonrasında sırasıyla bir akım veya bir gerilim sinyali olabilmektedir. Böylece, bir STF kullanılarak, temel bileşen, herhangi bir faz gecikmesi ve genlik değişimi olmaksızın, harmonikli elektrik sinyalleri geriliminden veya akımından çıkarılabilmektedir (Biricik, 2018).

Gerilimin d bileşeni Eşitlik 5.14'teki ters park dönüşümünün girişine uygulanarak referans abc bileşenleri hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans gerilim değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri histerezis PWM tekniği kullanılarak elde edilmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

Paralel AGF'de geliştirilen STF filtreli SRY yöntemi kullanılmaktadır. Eşitlik 5.25'de kaynak akımlarının a ve b fazı ( $i_{ka}$  ve  $i_{kb}$ ) kullanılarak c fazı ( $i_{kc}$ ) hesaplanmaktadır. Eşitlik 5.13'teki park dönüşüm ile hesaplanan kaynak akımlarının dq bileşenleri elde edilmektedir (Vinnakoti ve Kota, 2017). Sistem ile senkronizasyonu sağlamak için Şekil 5.5'teki PLL devresi kullanılmaktadır. Akım harmoniklerini telafi etmek için, Eşitlik 5.35 ve 5.36'da akımın alternatif bileşeni STF kullanılarak elimine edilmektedir (Ahmed, vd., 2012).

Akımlarının ( $i_{kd}$  ve  $i_{kq}$ ) bileşenleri Şekil 5.21'deki STF filtreden geçirilerek alternatif bileşenleri ( $\widetilde{i}_{kd}$  ve  $\widetilde{i}_{kq}$ ) elde edilmektedir. Aktif ve reaktif akım, doğru bileşenin ve alternatif bileşenin toplamı olarak yazılmaktadır.

$$i_d = \bar{i}_d + \widetilde{i}_d, i_q = \bar{i}_q + \widetilde{i}_q \quad (5.37)$$

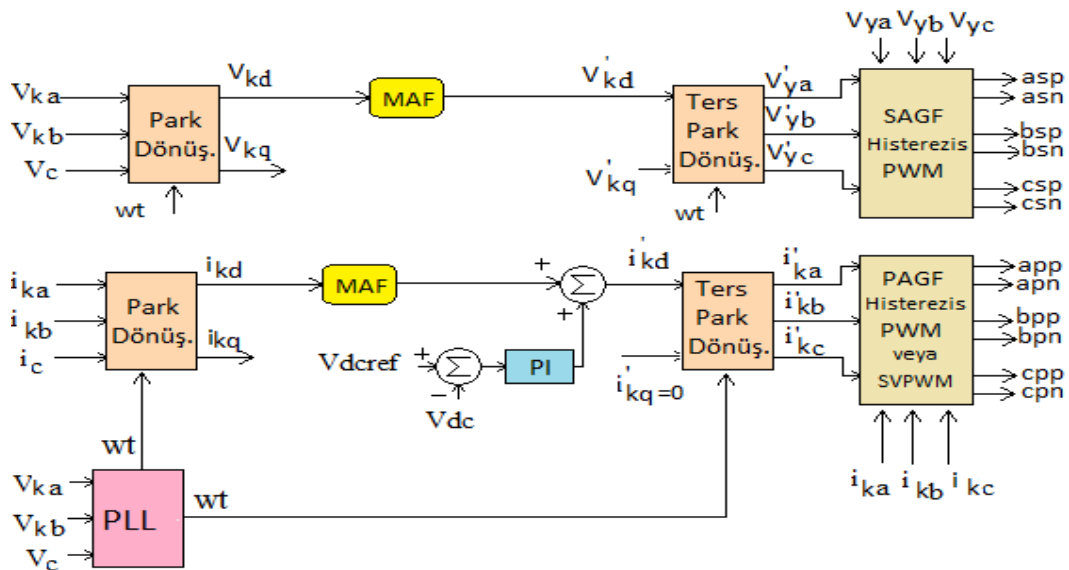
Eşitlik 5.10'da elde edilen kayıp akım, alternatif akıma ( $\widetilde{i}_{kd}$ ) ilave edilerek referans akım bileşenlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Eşitlik 5.15'teki ters park dönüşümü ile referans abc akımları elde edilmektedir. Referans akım değerleri

$(i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc})$ , kaynak akım değerleriyle  $(i_{ka}, i_{kb}, i_{kc})$  ile karşılaştırmaktadır ve hata bir PI denetleyiciden geçirilmektedir. Anahtarlama sinyalleri Şekil 5.17'deki histerezis PWM tekniği kullanılarak üretilmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

#### 5.4.11. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi

Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yönteminde seri aktif güç filtresinde ve paralel aktif güç filtresinde önerilen MAF filtreli senkron referans yapı yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 5.22'de önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi gösterilmektedir. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY ile BGKD'nin denetim yöntemi, kaynak gerilimleri ( $V_{kabc}$ ), kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{yabc}$ ) ve DA bara gerilimi ( $V_{DA}$ ) olmak üzere toplam dört ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir.

Önerilen MAF filtreli SRY-SRY ile BGKD'nin denetiminin basit olmasının yanında ölçüm sayısının, işlem sayısının az olması nedeniyle PBT ve ARGT tabanlı BGKD denetim yöntemlerine göre avantajlıdır.



Şekil 5.22. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi.

Seri AGF'de önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Kaynak geriliminin  $V_c$  fazı Eşitlik 5.24 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 5.24'teki gerilim değerleri PLL girişine uygulanarak  $\omega t$  açısı elde edilmektedir. Kaynak gerilimlerinin  $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_c$  fazları Eşitlik 5.12'deki park dönüşümünün girişine

uygulanmaktadır. Gerilimin d bileşeni Şekil 5.14'teki MAF filtreden geçirilerek ters park dönüşümüne gönderilmektedir.

Eşitlik 5.13'teki ters park dönüşümü ile gerilimin referans abc bileşenleri hesaplanmaktadır. Kontrol yöntemi tarafından üretilen referans gerilim değerleri ( $V'_{ya}, V'_{yb}, V'_{yc}$ ), yük gerilim değerleriyle ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) karşılaştırmaktadır. Gerekli anahtarlama sinyalleri Şekil 5.17'deki histerezis PWM tekniği kullanılarak elde edilmektedir (Xiu ve Liu, 2009).

Paralel AGF'de MAF filtreli SRY kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Akımın c fazı ( $i_c$ ) Eşitlik 5.25 kullanılarak elde edilmektedir. Eşitlik 5.12'teki park dönüşümü kullanarak kaynak akımlarının ( $i_{ka}, i_{kb}, i_c$ ) dq bileşenleri hesaplanmaktadır. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY ile BGKD'nin denetiminde kaynak akım harmoniklerinin yok edilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmek için akımın d ( $i_{kd}$ ) bileşeni kullanılmaktadır.

Aktif akım ( $i_{kd}$ ) dinamik filtreleme yanıtını iyileştirmek için Şekil 5.14'teki hareketli ortalama filtreden geçirilmektedir. Dinamik performansı bozmadan DA bileşenini ayıklamak için MAF kullanılmaktadır.  $i_{dkayıp}$  akımı  $V_{DA}$  bara geriliminin PI denetleyici anlık akım çıkışı olup, filtre kayıplarını gidermek anlık  $i_{kd}$  akım bileşenine ilave edilmektedir. Toplama bloğu çıkışında elde edilen akımlar ile harmoniklerini düzeltecek referans kaynak akımları ( $i'_{kd}$  ve  $i'_{kq}$ ) üretilmektedir Eşitlik 5.15'te verilen ters park dönüşümü ve PLL ile üretilen  $\omega t$  kullanarak referans kaynak akımları ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) üretilmektedir.

Paralel AGF denetim yöntemi tarafından üretilen referans kaynak akımları ( $i'_{ka}, i'_{kb}, i'_{kc}$ ) ile kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) karşılaştırılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri Şekil 5.17'deki histerezis PWM veya SVPWM tekniği kullanılarak elde edilmektedir.

## 6. BGKD SİSTEMİNİN BİLGİSAYAR TABANLI MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Birleşik güç kalite düzenleyici sisteminde, seri aktif güç filtresi denetim yönteminde kaynak geriliminden kaynaklanan güç kalitesi problemlerini düzeltecek referans yük gerilimleri ( $V'_{yabc}$ ) hesaplanmaktadır. Kaynak gerilimleri ( $V_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans gerilimleri ( $V'_{yabc}$ ) karşılaştırılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri, sinüzoidal PWM, histeresiz PWM ve uzay vektör PWM tekniklerinden biri kullanılarak üretilmektedir. Paralel aktif güç filtresi denetim yönteminde, doğrusal olmayan yükten kaynaklanan akım harmonik problemlerini düzeltecek referans akımları ( $i'_{abc}$ ) hesaplanmaktadır. Kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans  $i'_{kabc}$  akımları karşılaştırılmaktadır. Yapılan kontrol yöntemlerinde anahtarlama sinyalleri üretmek için PWM teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, doğrusal olmayan tristörlü yüküne sahip üç fazlı bir sistem olan BGKD kontrol yöntemlerinin simülasyonu, PSIM yazılımı ile test edilmiştir. Simülasyon çalışmasının parametreleri Tablo 6.1'de verilmektedir.

**Tablo 6.1.** BGKD simülasyon parametreleri.

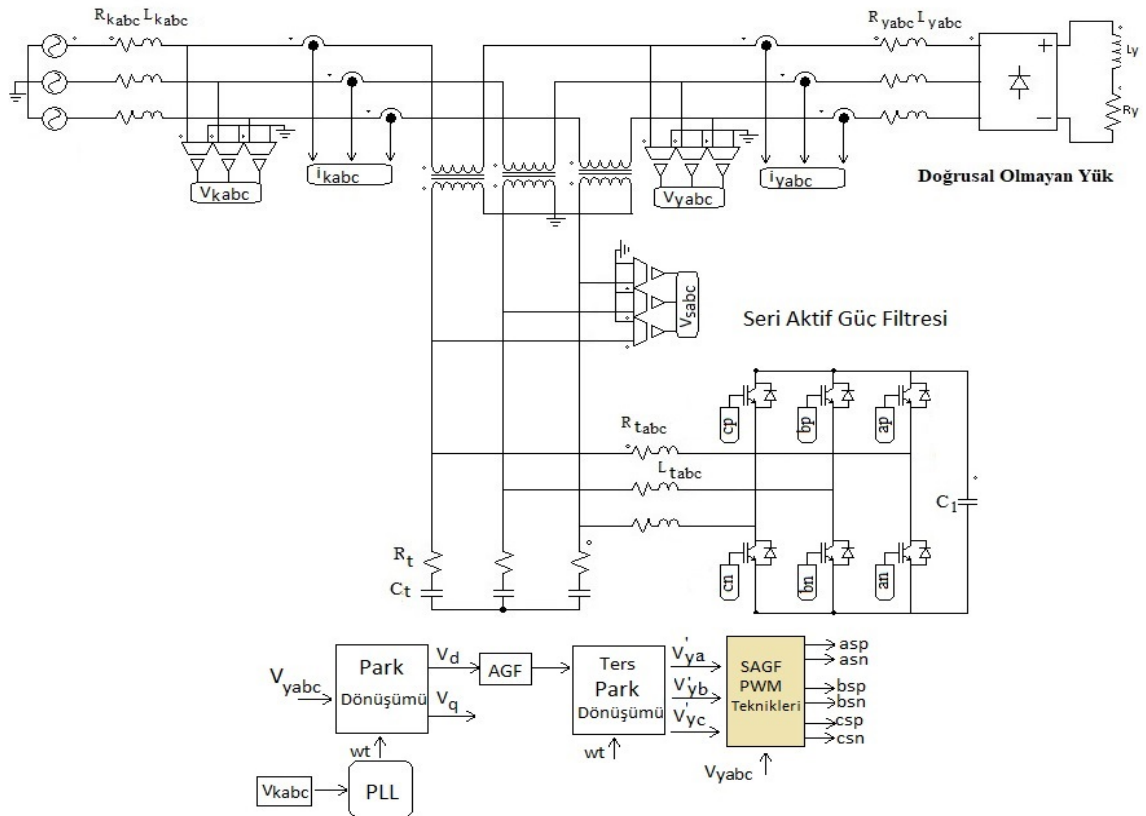
Kaynak Parametreler		
Kaynak gerilimi	$V_{Kabc}$	190 Vrms
AA Frekans	$f$	50 Hz
AA kaynak direnci	$R_{Kabc}$	10 m $\Omega$
AA kaynak bobini	$L_{Kabc}$	0.1 mH
Yük Parametreleri		
AA hat direnci	$R_{Yabc}$	0.25 $\Omega$
AA hat bobini	$L_{Yabc}$	1.47 mH
DA direnci	$R_Y$	30 $\Omega$
DA bobini	$L_Y$	11.53 mH
Paralel Aktif Güç Filtresi		
AA hat direnci	$R_{Fabc}$	0.6 m $\Omega$
AA hat bobini	$L_{Fabc}$	3.5 mH
Filtre direnci	$R_F$	4 $\Omega$
Filtre kondansatörü	$C_{Fabc}$	50 $\mu$ F
Anahtarlama frekansı	$f_{PWM}$	15 kHz
Seri Aktif Güç Filtresi		
Filtre direnci	$R_{Tabc}$	0.65 m $\Omega$
AA hat bobini	$L_{Tabc}$	3 mH
Anahtarlama frekansı	$f_{PWM}$	18 kHz
DA hat Gerilim	$C_1$	2350 $\mu$ F
Kondansatör	$V_{DA}$	400 V

Birleşik güç kalite düzenleyicisi seri ve paralel aktif güç filtresinin birleşiminden oluşmaktadır. İlk olarak seri ve paralel AGF’de kullanılan kontrol yöntemlerinin simülasyon sonuçlarına değinilmiştir.

### 6.1. Seri AGF’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu

Bu bölümde, PSIM yazılımında oluşturulan seri AGF’nin benzetim modelinden elde edilen sonuçlar, farklı referans gerilim çıkarma yöntemleri kullanılarak simüle edilmiştir. PSIM blokları ile oluşturulan benzetim modeli Şekil 6.1’de verilmiştir.

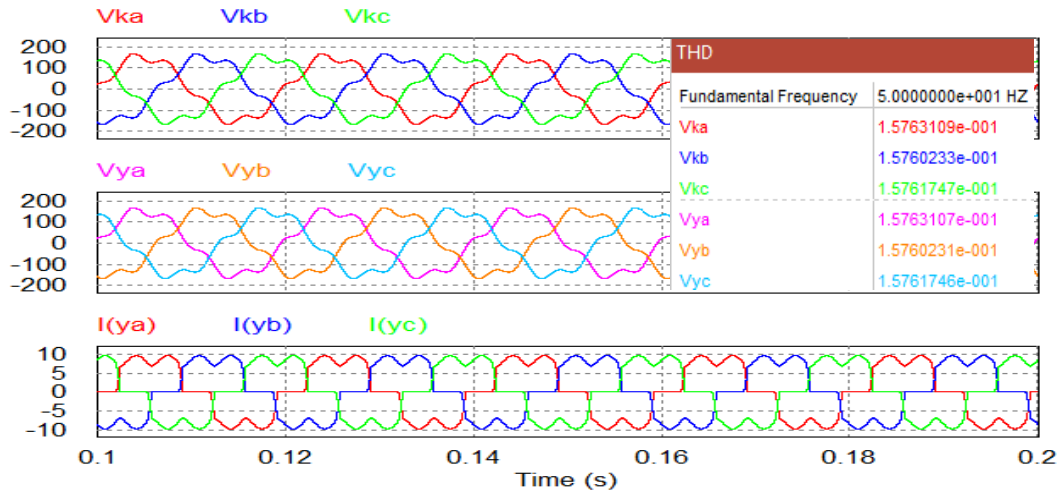
Bu benzetim modeli yardımı ile SAGF’nin harmonik kompanzasyonu performansı, farklı referans akım çıkarma yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Kontrol yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmalarında anahtarlama sinyalleri üretmek için SPWM ve HPWM teknikleri kullanılmaktadır. Yük olarak ise R-L yükünü besleyen 3 fazlı tristörlü köprü doğrultucu kullanılmıştır. Simülasyon çalışması için Tablo 6.1’deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Seri aktif güç filtresinin PSIM tasarımı.

Seri AGF, şebekeye bir transformatör yardımıyla yükten önce seri olarak bağlanmaktadır. SAGF, güç sistemindeki gerilim harmoniklerini filtrelemek için şebekeye harmonikli gerilimler enjekte etmekte ve güç sistemlerinde gerilim regülasyonu, gerilim dengeleme, gerilim kırılgasının azaltılması, gerilim düşmelerinin ve yükselmelerinin giderilmesi sağlamaktadır.

Şekil 6.2’de doğrusal olmayan 3 faz tristörlü yük koşullarına filtreleme olmadan kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) ve yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ) simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Seri AGF sisteminin çalışması Şekil 6.2’de verildiği gibi, kaynak ve yük gerilimleri THB değeri %15.76 olarak ölçülmektedir.

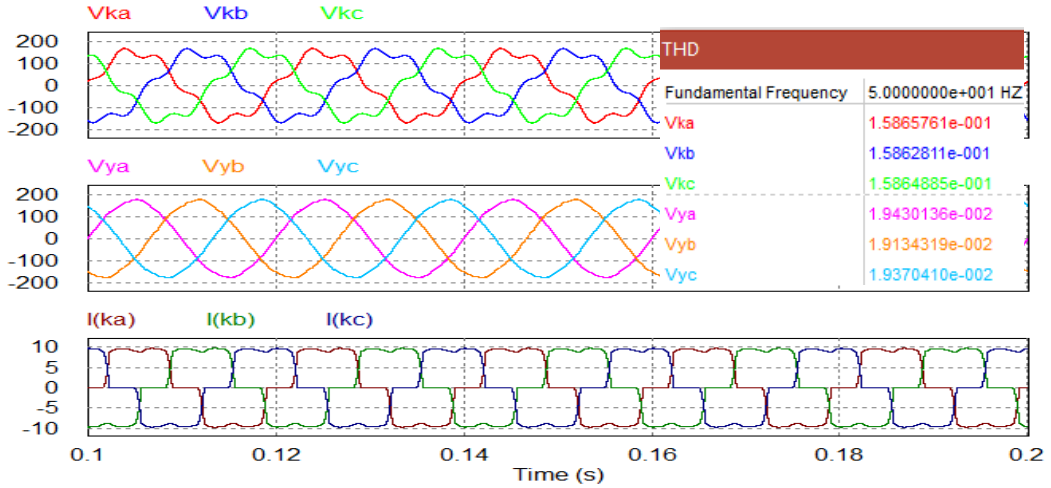


**Şekil 6.2.** SAGF’de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) ve yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları.

### 6.1.1. Seri AGF’de ARGV kontrol yöntemi

Seri AGF’ye anlık reaktif güç kontrol yöntemi uygulanmaktadır. 3 faz kaynak gerilimleri  $V_{kabc}$  ile hesaplanan referans filtre  $V'_{Tabc}$  gerilimleri karşılaştırılmakta ve sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Şekil 6.3’te kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) ve kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) simülasyon dalga şekilleri ve THB ölçüm sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 6.3'te kaynak akımındaki harmonikler elimine edilerek sinüzoidal dalga şekli görülmektedir. SAGF'ye ARGT tabanlı kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.86 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1.94 oranına düşürülmektedir.

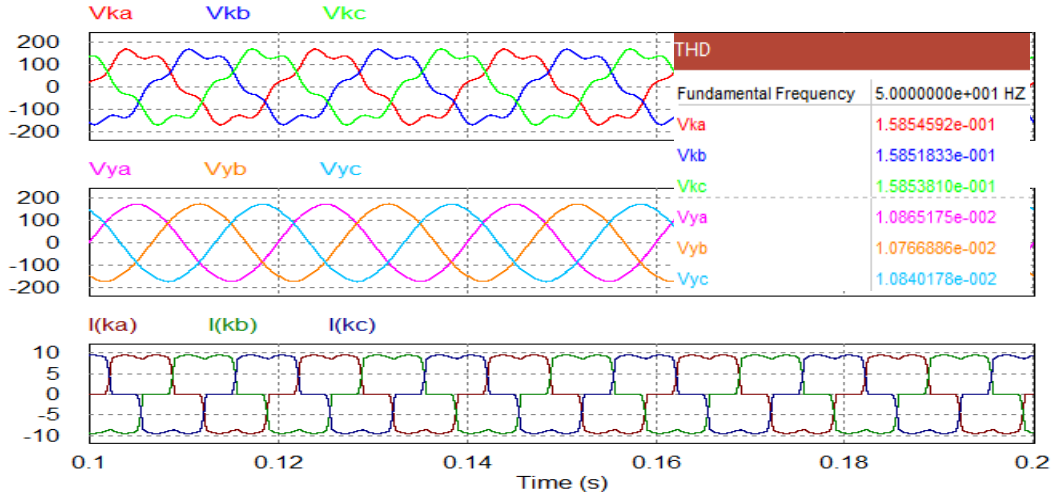


Şekil 6.3. ARGT kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.

### 6.1.2. Seri AGF'de SRY kontrol yöntemi

Seri AGF'ye senkron referans yapı kontrol yöntemi uygulanmaktadır. 3 faz kaynak gerilimleri  $V_{kabc}$  ile hesaplanan referans filtre  $V'_{yabc}$  gerilimleri sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak karşılaştırılmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Şekil 6.4'te harmonikli bir gerilim dalgası ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimi ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) ve doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği harmonik içerikli kaynak akımı ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) simülasyon sinyal şekilleri ve THB ölçüm sonucu gösterilmektedir.

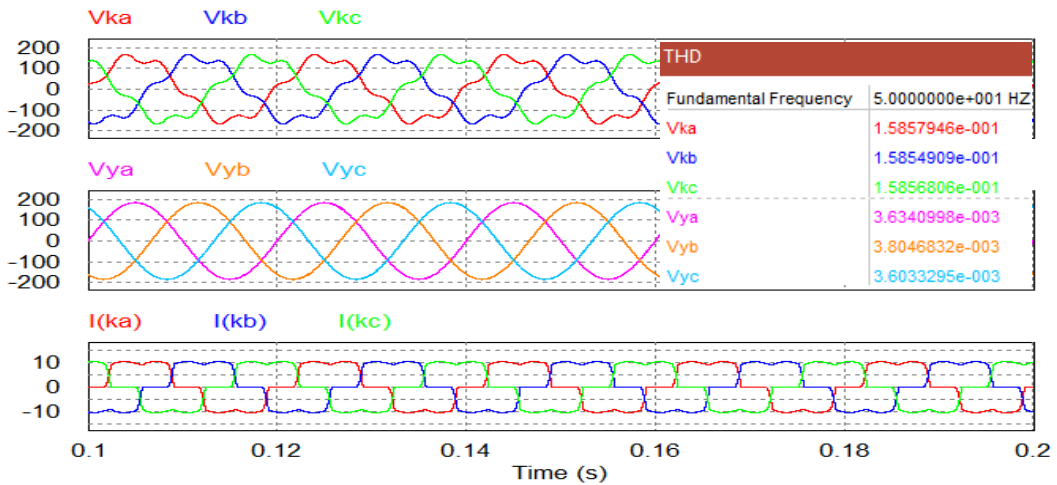
SAGF'ye SRY tabanlı kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.85 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1.08 oranına düşürülmektedir. Kaynak gerilimindeki harmonikler elimine edilerek dengeli ve sinüzoidal dalga şekli görülmektedir.



**Şekil 6.4.** SAGF’de SRY kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.

### 6.1.3. Seri AGF’de geliştirilen MAF filtreli ARGT kontrol yöntemi

Seri AGF’ye geliştirilen MAF filtreli anlık reaktif güç kontrol yöntemi uygulanmaktadır. 3 faz kaynak gerilimleri  $V_{kabc}$  ile hesaplanan referans filtre  $V'_{Tabc}$  gerilimleri karşılaştırılmakta ve histerezis PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Şekil 6.3’te kaynak gerilimleri, yük gerilimleri ve kaynak akımları simülasyon dalga şekilleri ve THB ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



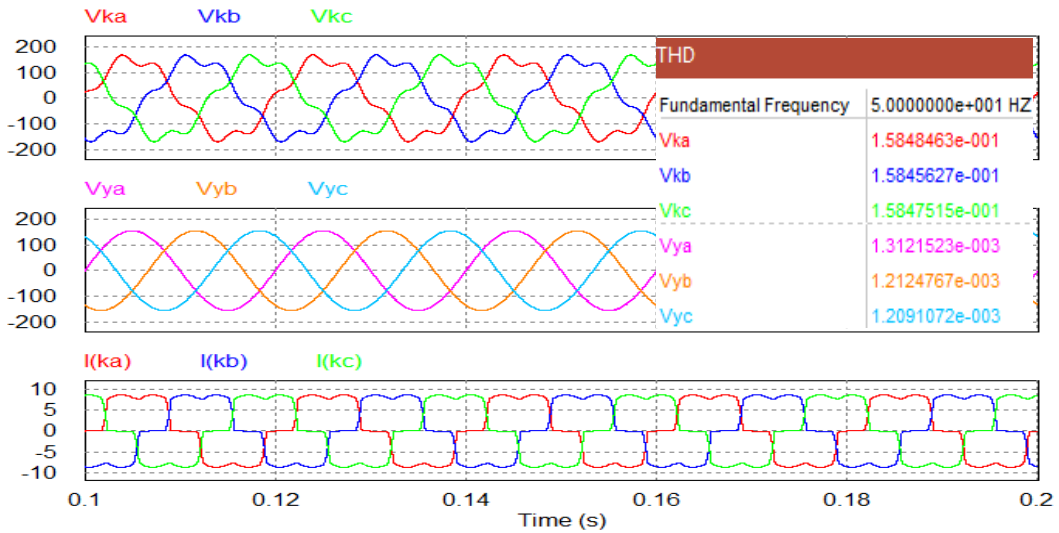
**Şekil 6.5.** Geliştirilen MAF filtreli ARGT kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.

Şekil 6.5'te kaynak akımındaki harmonikler elimine edilerek sinüzoidal dalga şekli görülmektedir. SAGF'ye geliştirilen MAF filtreli ARG T kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.85 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %0.36 oranına düşürülmektedir.

#### 6.1.4. Seri AGF'de önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi

Seri AGF'ye önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. 3 faz kaynak gerilimleri  $V_{kabc}$  ile hesaplanan referans filtre  $V'_{yabc}$  gerilimleri karşılaştırılmakta ve histerezis PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Şekil 6.6'da kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ) yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ) ve kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) simülasyon dalga şekilleri ve THB ölçüm sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 6.6'da kaynak akımındaki harmonikler elimine edilerek sinüzoidal dalga şekli görülmektedir. SAGF'ye önerilen MAF filtreli SRY tabanlı kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.84 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %0.13 oranına düşürülmektedir.



Şekil 6.6. Önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi ile SAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin ve kaynak akımlarının simülasyon sonuçları.

Tablo 6.2'de yapılan simülasyon çalışmaları özetlenmektedir. ARG T ve SRY kontrol yöntemleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bölümde, seri aktif güç

filtresine yeni bir kontrol yöntemi uygulanmakta ve literatürdeki yöntemler ile karşılaştırılmaktadır. Tablo 6.2’de görüldüğü üzere, önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi ARGV ve SRY yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Seri AGF’ye önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.84 oranındaki kaynak gerilim harmoniği **%0.13** oranına düşürülmektedir.

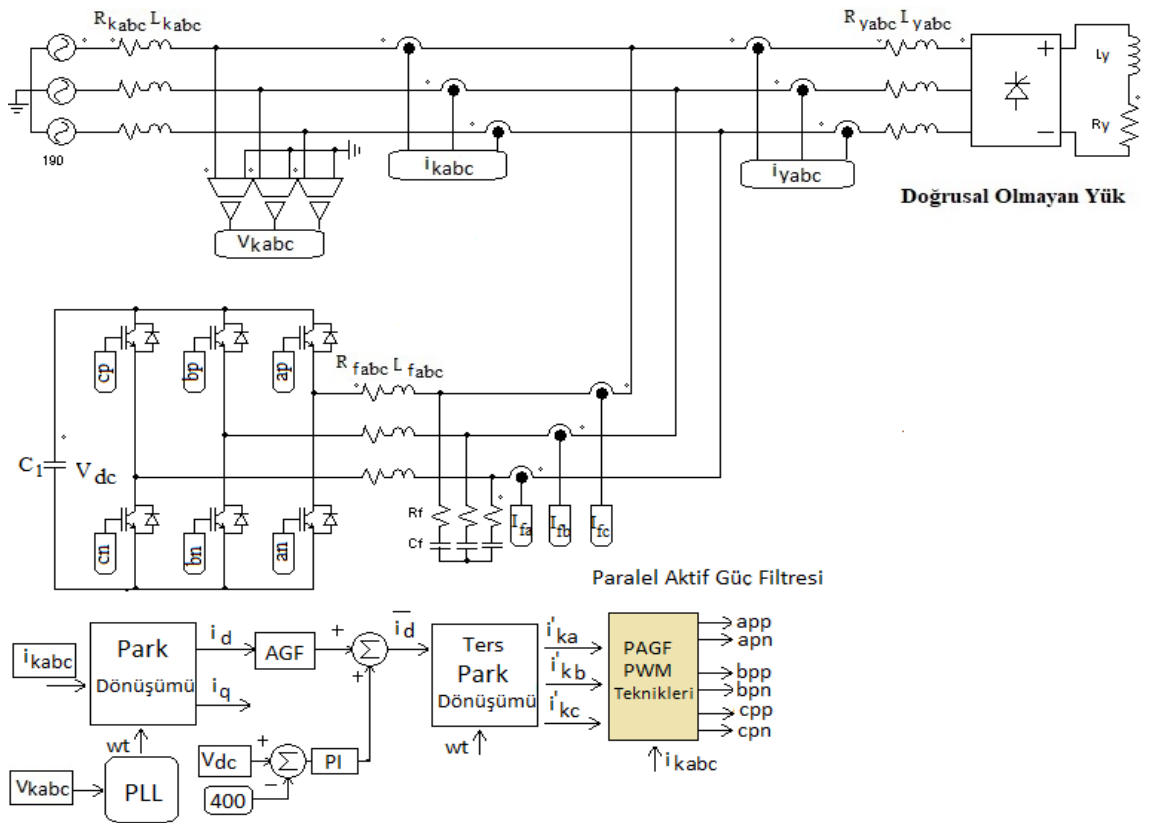
**Tablo 6.2.** Seri AGF’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması.

SAGF kontrol yöntemleri	Filtresiz THB (%)	PWM teknikleri	
		SPWM	HPWM
ARGV	%15.85	%1.94	%0.72
Geliştirilen MAF (ARGV)		%1.75	%0.36
SRY		%1.07	%0.32
Bulanık mantık denetleyici (Ngotakun, vd., 2012)		%0.47	-
<b>Önerilen MAF (SRY)</b>		<b>%0.16</b>	<b>%0.13</b>

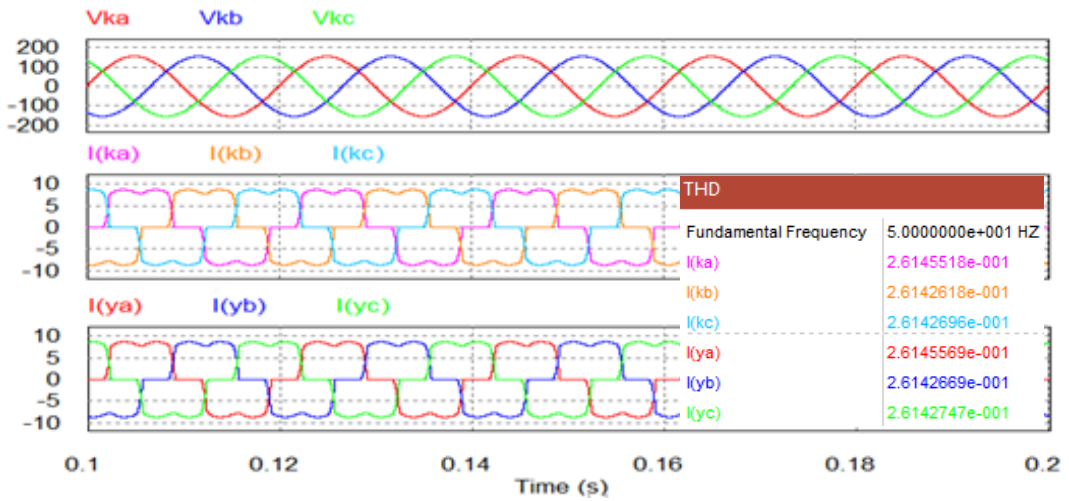
## 6.2. Paralel AGF’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu

Bu bölümde, PSIM programında oluşturulan PAGF’nin benzetim modelinden elde edilen sonuçlar, farklı referans akım çıkarma yöntemleri kullanılarak simüle edilmiştir. PSIM blokları ile oluşturulan benzetim modeli Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi PAGF devresinde, üç fazlı bir şebeke, evirici, bu eviriciyi şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı, doğrusal olmayan yük ve evirici akımının denetimi için bir kontrol birimi bulunmaktadır. PAGF’nin harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu performansı, farklı kontrol yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Yük olarak ise R-L yükünü besleyen 3 fazlı tristörlü köprü doğrultucu kullanılmıştır. Kontrol yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmalarında anahtarlama sinyalleri üretmek için SPWM, HPWM ve SVPWM teknikleri kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmasının parametreleri Tablo 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.7. Paralel aktif güç filtresinin PSIM tasarımı.



Şekil 6.8. PAGF’de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_{kc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_{kc}$ ) ve yük akımları ( $i_{ya}$ ,  $i_{yb}$ ,  $i_{yc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları.

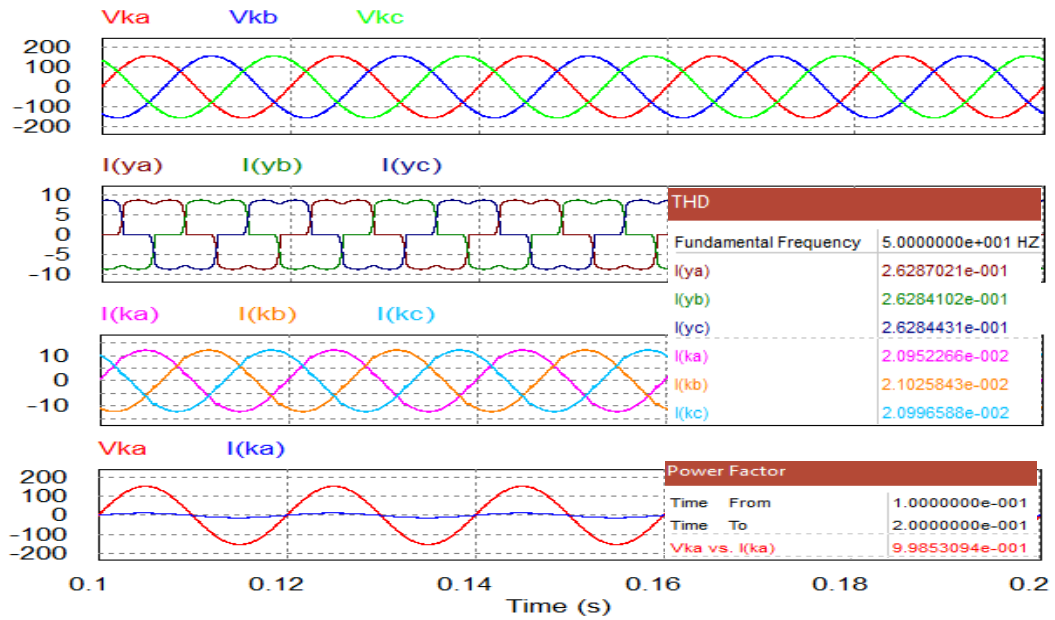
Şekil 6.8’de doğrusal olmayan 3 faz tristör yük koşullarına filtre olmadan kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_{kc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_{kc}$ ) ve yük akımları

$(i_{ya}, i_{yb}, i_{yc})$  simülasyon sonuçlarını göstermektedir. PAGF sisteminin çalışması Şekil 6.8'de verildiği gibi, kaynak ve yük akımları THB değeri %26.14 olarak ölçülmektedir.

### 6.2.1. Paralel AGF'de ARGT kontrol yöntemi

Paralel AGF'ye ARGT kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.9'da kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. 3 faz kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans filtre ( $i'_{fabc}$ ) akımları sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak karşılaştırılmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Şekil 6.9'da kaynak akımındaki harmonikler elimine edilerek, dengeli ve sinüzoidal dalga şekli görülmektedir. Paralel AGF'ye ARGT tabanlı kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %26.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.09 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.9'da ARGT kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü göstermektedir. PAGF sistemine ARGT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, 0.9985 olarak ölçülmektedir.

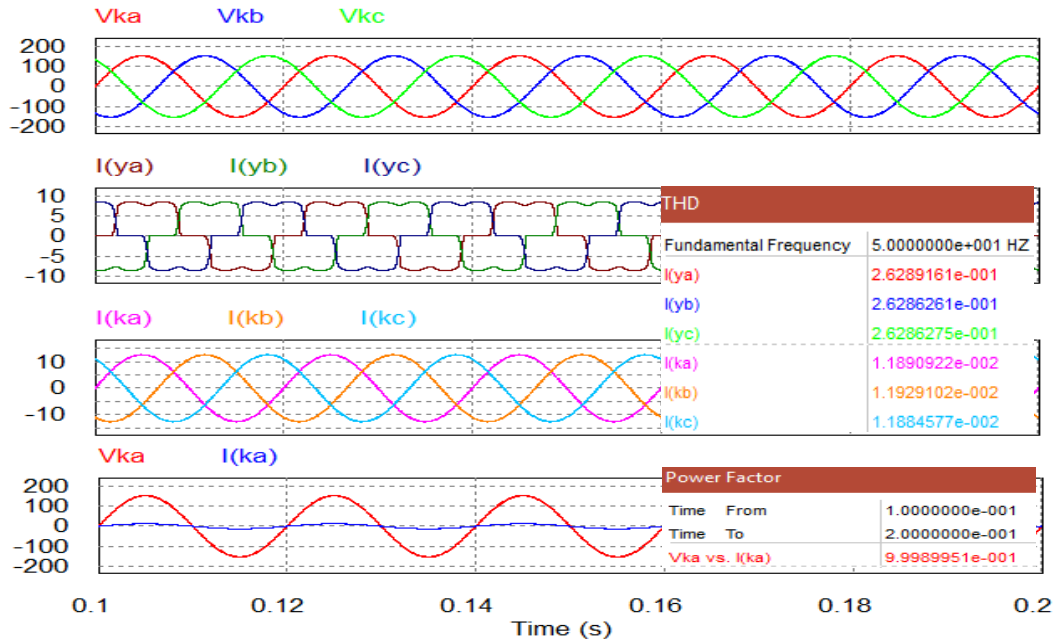


Şekil 6.9. ARGT kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

### 6.2.2. Paralel AGF’de PBT kontrol yöntemi

Paralel AGF’ye güç dengeleme kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.10’da kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), filtre akımları ( $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. 3 faz kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans filtre ( $i'_{fabc}$ ) akımları sinüzoidal PWM tekniği ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Paralel AGF’ye PBT tabanlı kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %26.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.18 oranına düşürülmektedir. PAGF’nin yük harmonik akımını dengelediği görülmektedir. Şekil 6.10’da PBT kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü göstermektedir. PAGF sistemine PBT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, 0.9998 olarak ölçülmektedir.



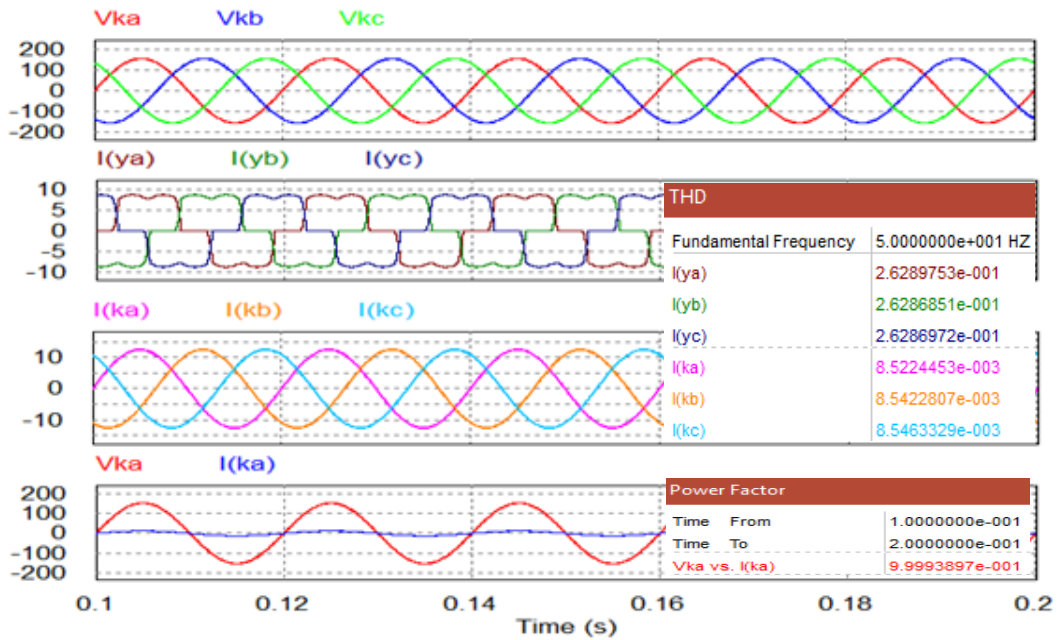
Şekil 6.10. PBT kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

### 6.2.3. Paralel AGF’ de SRY kontrol yöntemi

Paralel AGF’ye senkron referans yapı kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.11’de kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları

$(i_{ka}, i_{kb}, i_{kc})$ , filtre akımları  $(i_{fa}, i_{fb}, i_{fc})$ , kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. 3 faz kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans filtre ( $i'_{kabc}$ ) akımları sinüzoidal PWM tekniği ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Paralel AGF'ye SRY kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %26.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %0.85 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.11'de SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü göstermektedir. PAGF sistemine SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, 0.9999 olarak ölçülmektedir.

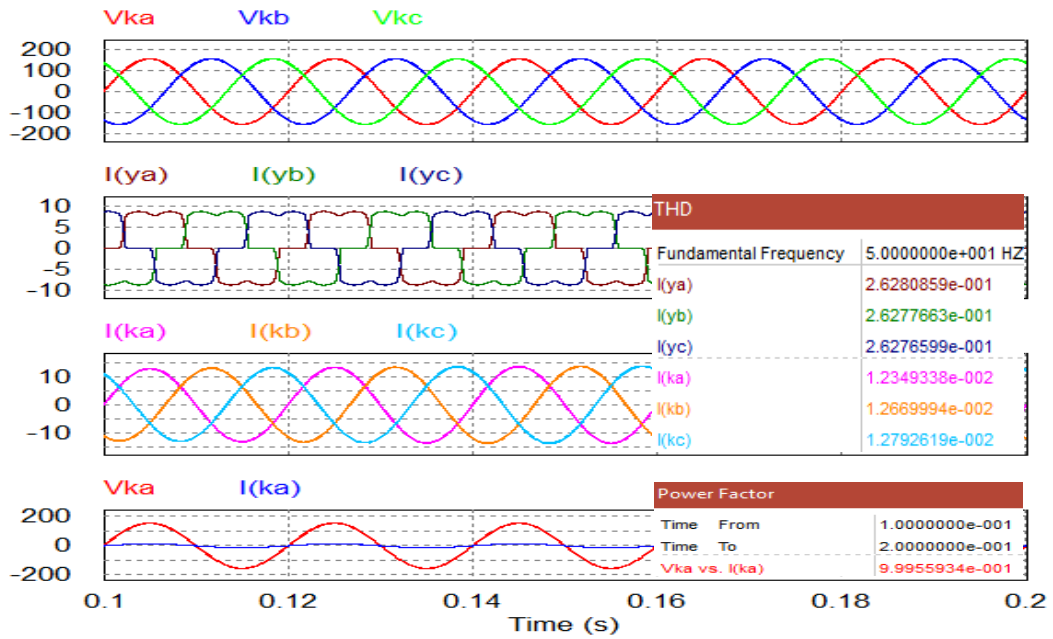


Şekil 6.11. SRY kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

#### 6.2.4. Paralel AGF'de geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi

Paralel AGF'ye geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.12'de kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), filtre akımları ( $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. 3 faz kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans filtre akımları ( $i'_{kabc}$ ) histerezis PWM tekniği kullanılarak karşılaştırılmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Paralel AGF'ye geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %26.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.23 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.12'de geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü göstermektedir. PAGF sistemine geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi uygulandıktan sonra kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, 0.9995 olarak ölçülmektedir.



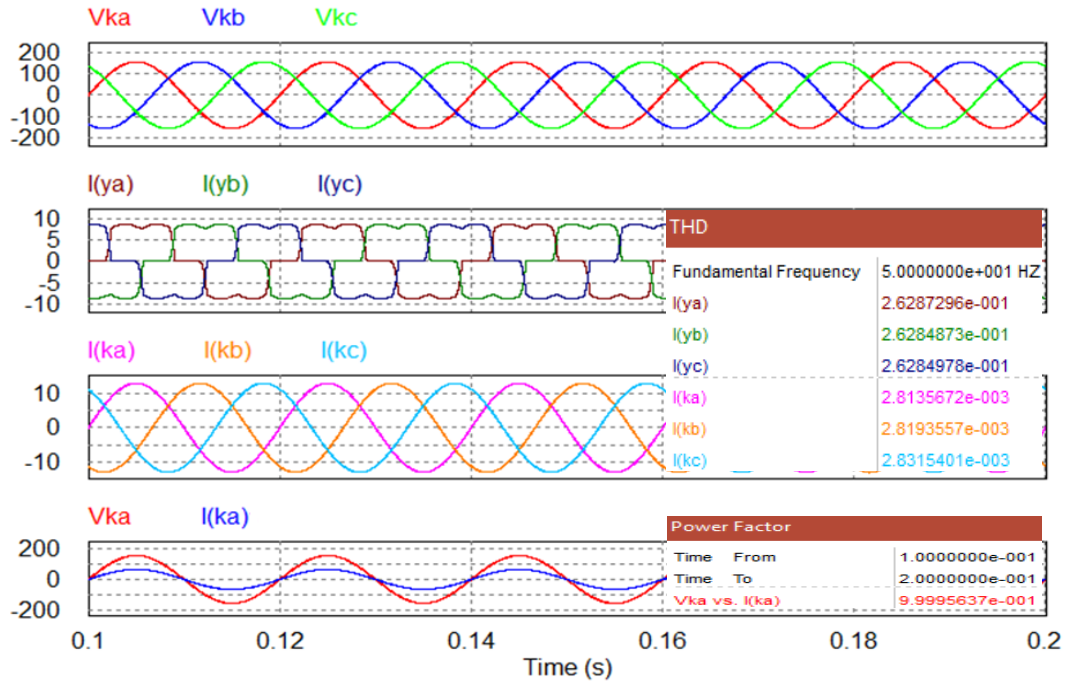
Şekil 6.12. Geliştirilen MAF filtreli ARGV kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

### 6.2.5. Paralel AGF'de önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi

Paralel AGF'ye önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.13'te kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), filtre akımları ( $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. 3 faz kaynak akımları ( $i_{kabc}$ ) ile hesaplanan referans filtre ( $i'_{kabc}$ ) akımları histerezis PWM tekniği kullanılarak karşılaştırılmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Paralel AGF'ye önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi uygulandığında a fazı için %26.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %0.28 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.13'te önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü

göstermektedir. PAGF sistemine önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, 0.9999 olarak ölçülmektedir.



**Şekil 6.13.** Önerilen MAF filtreli SRY kontrol yöntemi ile PAGF sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Tablo 6.3'te paralel AGF'de kullanılan kontrol yöntemleri ile literatürde kullanılan yöntemlerin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir. Yapılan simülasyon sonuçlarında, kaynak akımının sinüzoidal olduğu ve THB değerinin IEEE standartlarını karşılayan % 5'ten daha az olduğu görülmektedir.

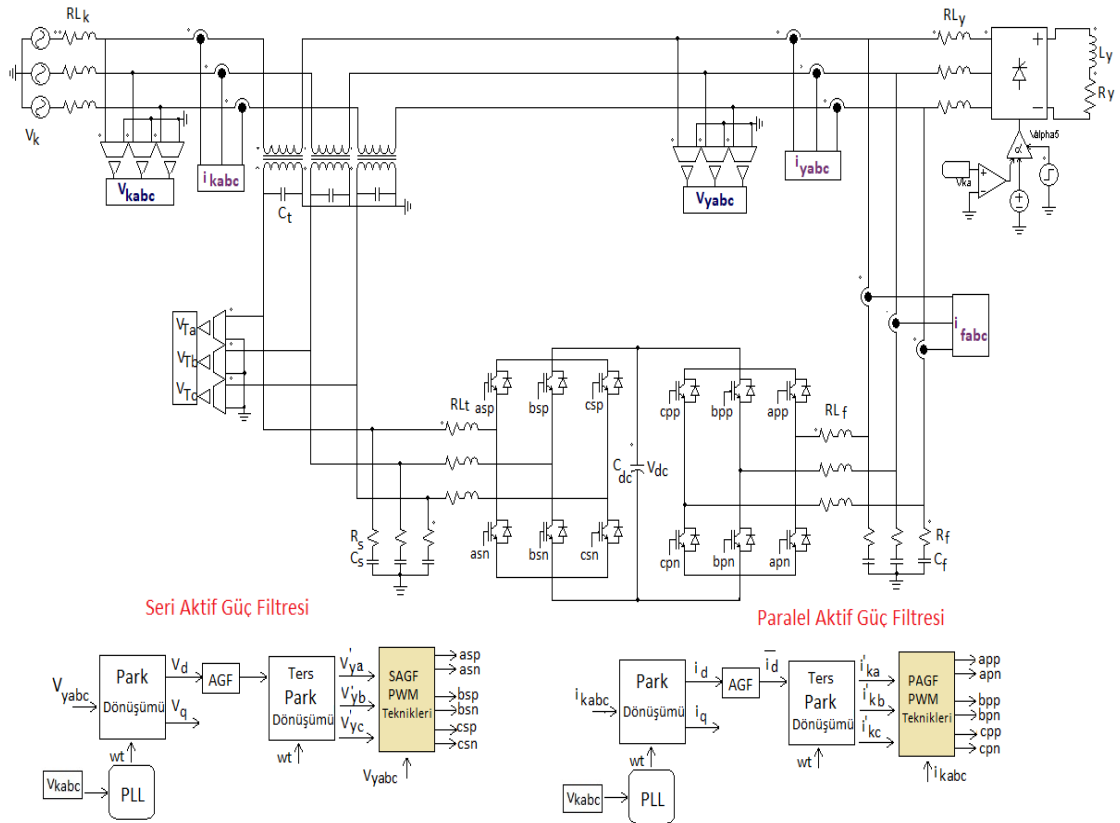
PAGF'ye anlık reaktif güç kontrol yöntemi, güç dengeleme yöntemi, senkron referans yapı kontrol yöntemi ve önerilen MAF filtreli kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Ayrıca, önerilen MAF filtreli SRY kontrol yönteminin, THB ölçüm sonucunun Tablo 6.3'te gösterildiği gibi harmoniklerin giderilmesinde en düşük değeri verdiği gözlenebilmektedir ki bu, diğer yöntemlere kıyasla en iyi kontrol yöntemi olduğu anlamına gelmektedir. Mevcut harmoniklerin ve reaktif gücün ortadan kalktığı görülmektedir.

**Tablo 6.3.** Paralel AGF’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması.

PAGF kontrol yöntemleri	Filtresiz THB (%)	PWM teknikleri		
		SPWM (%)	SVPWM (%)	HPWM (%)
SMC yöntemi (Ghamri, vd., 2012)	26.42	-	-	3.53
STF SRY yöntemi (Chebabhi, vd., 2018)	13.92	2.82	-	-
Tahmini yöntemi (MPC) (Mamdouh, vd., 2014)	28.75	-	1.29	1.39
Direkt güç kontrolü (DPC) (Mesbahi, vd., 2014)	15.44	-	-	1.28
PQ yöntemi (Salunkhe ve Gaur, 2017)	19.88	1.57	0.87	-
ARGT	26.28	2.10	-	-
Geliştirilen MAF ARGT		1.23	-	-
PBT		1.18	0.93	0.95
Geliştirilen MAF PBT		1.01	1.25	0.88
SRY		0.85	0.70	0.57
<b>Önerilen MAF SRY</b>		<b>0.76</b>	<b>0.67</b>	<b>0.28</b>

### 6.3. BGKD’de Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Simülasyonu

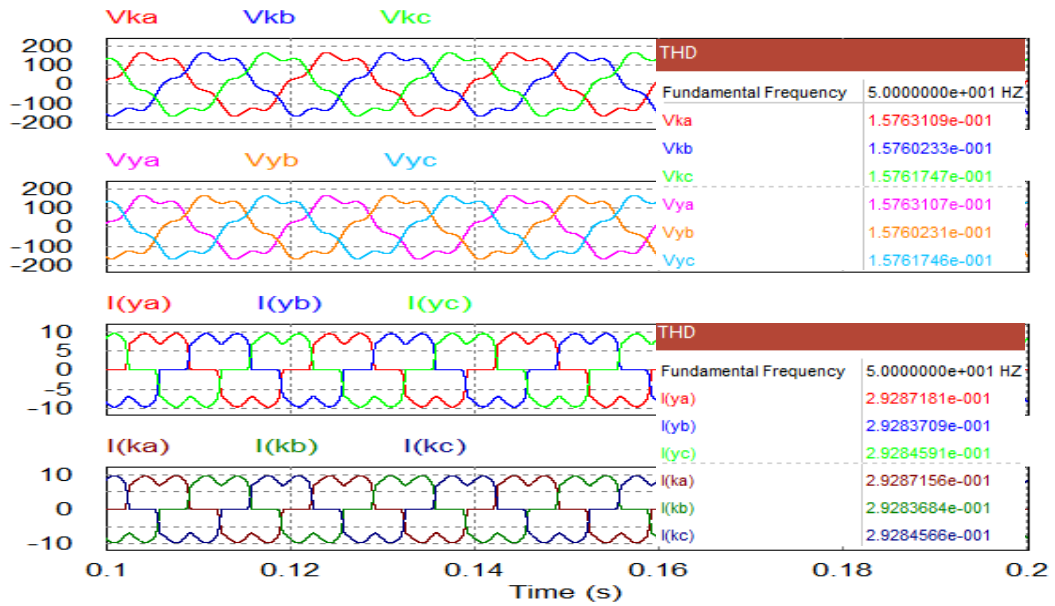
BGKD kontrol yöntemini oluşturan, reaktif ve doğrusal olmayan yüklerin aktif güçlerinin hesaplanması, referans kaynak ve filtre akımlarının belirlenmesi, anahtarlama sinyallerinin sinüzoidal, histerezis PWM teknikleri kullanılarak elde edilmesi PSIM simülasyon programı ile yapılmıştır. Bu bölümde, PSIM programında oluşturulan BGKD’nin benzetim modelinden elde edilen sonuçlar, farklı referans çıkarma yöntemleri kullanılarak simüle edilmektedir. Şekil 6.14’te BGKD devre şeması verilmektedir.



**Şekil 6.14.** Birleşik güç kalite düzenleyicisinin PSIM tasarımı.

Şekil 6.14'te seri ve paralel aktif güç filtrelerinin birlikte kullanıldığı BGKD sistemi görülmektedir. Görüldüğü gibi benzetim modeli; üç-fazlı bir şebeke, ortak bir DA enerji depolama elemanı, kondansatöre bağlı iki tane gerilim kaynağı evirici devresi ve kaynak gerilimine seri bağlı transformatörden oluşmaktadır. Bu eviricilerden biri, gerilim kaynağı olarak çalışan seri aktif güç filtresi ve diğeri akım kontrollü gerilim kaynağı olarak çalışan paralel aktif güç filtresidir. Eviricileri şebekeye bağlamak için bir bağlantı endüktansı, doğrusal olmayan yük ve kontrol biriminden oluşmaktadır. Yük olarak ise R-L yükünü besleyen 3 fazlı tristörlü köprü doğrultucu kullanılmaktadır.

BGKD'nin harmonik akım kompanzasyonu, gerilim bozulmaları (dengesizlik, çökme, yükselme, dalgalanma, geçici durumlar) ve reaktif güç kompanzasyonu performansı çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak değerlendirilmektedir. Kontrol yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmalarında anahtarlama sinyalleri üretmek için SPWM, HPWM ve SVPWM teknikleri kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmasının parametreleri Tablo 6.1'de verilmektedir.

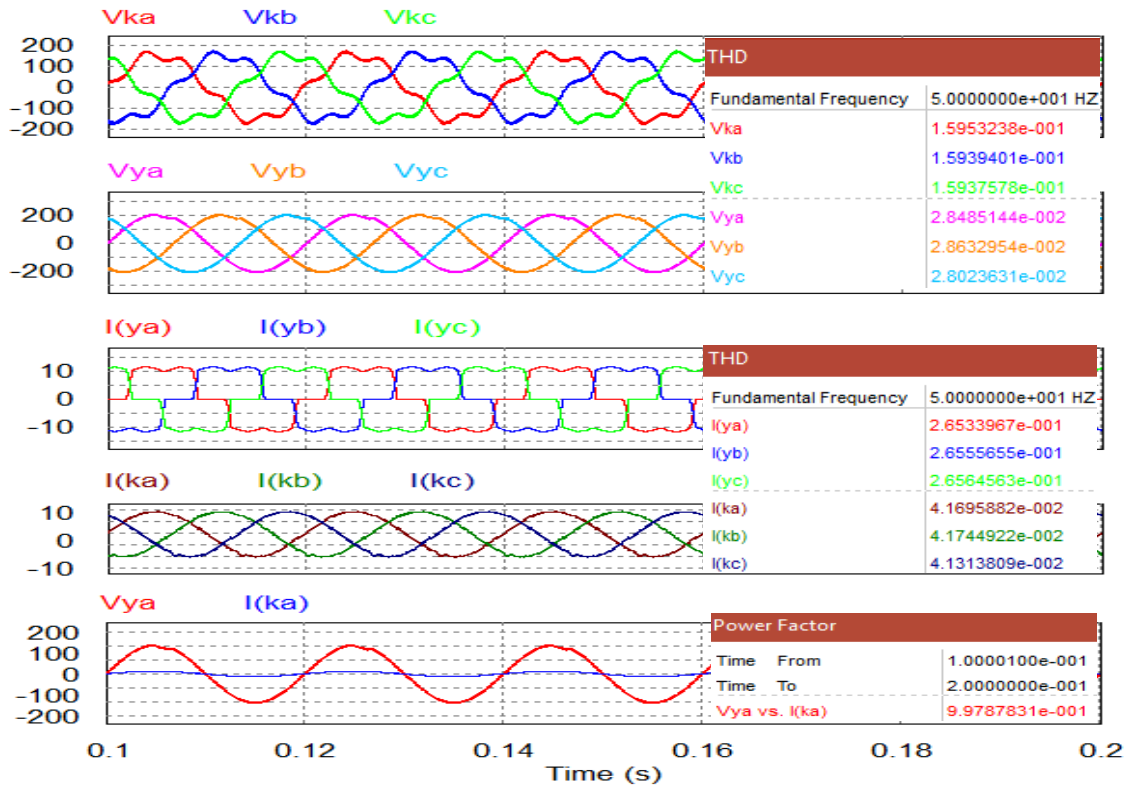


**Şekil 6.15.** BGKD’de filtre olmadan 3 faz kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}$ ,  $V_{yb}$ ,  $V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}$ ,  $i_{yb}$ ,  $i_{yc}$ ) ve kaynak akımları ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_{kc}$ ) simülasyon ve THB ölçüm sonuçları.

Şekil 6.15’te doğrusal olmayan 3 faz tristör yük koşullarına filtre olmadan kaynak gerilimleri ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}$ ,  $V_{yb}$ ,  $V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}$ ,  $i_{yb}$ ,  $i_{yc}$ ) ve kaynak akımları ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_{kc}$ ) simülasyon sonuçlarını göstermektedir. BGKD sisteminin çalışması Şekil 6.15’te verildiği gibi, a-fazı için kaynak ve yük gerilimleri THB değeri %15.76, kaynak ve yük akımları THB değeri %29.28 olarak ölçülmektedir.

### 6.3.1. ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi

Birleşik güç kalite düzenleyicisine ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.16’da kaynak gerilimine ait harmonikli üç faz dalga şekilleri ( $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$ ,  $V_{kc}$ ), filtreleme sonrası yük gerilimleri ( $V_{ya}$ ,  $V_{yb}$ ,  $V_{yc}$ ), doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği harmonik içerikli yük akımı ( $i_{ya}$ ,  $i_{yb}$ ,  $i_{yc}$ ), filtreleme sonrası elde edilen sinüzoidal kaynak akımı ( $i_{ka}$ ,  $i_{kb}$ ,  $i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

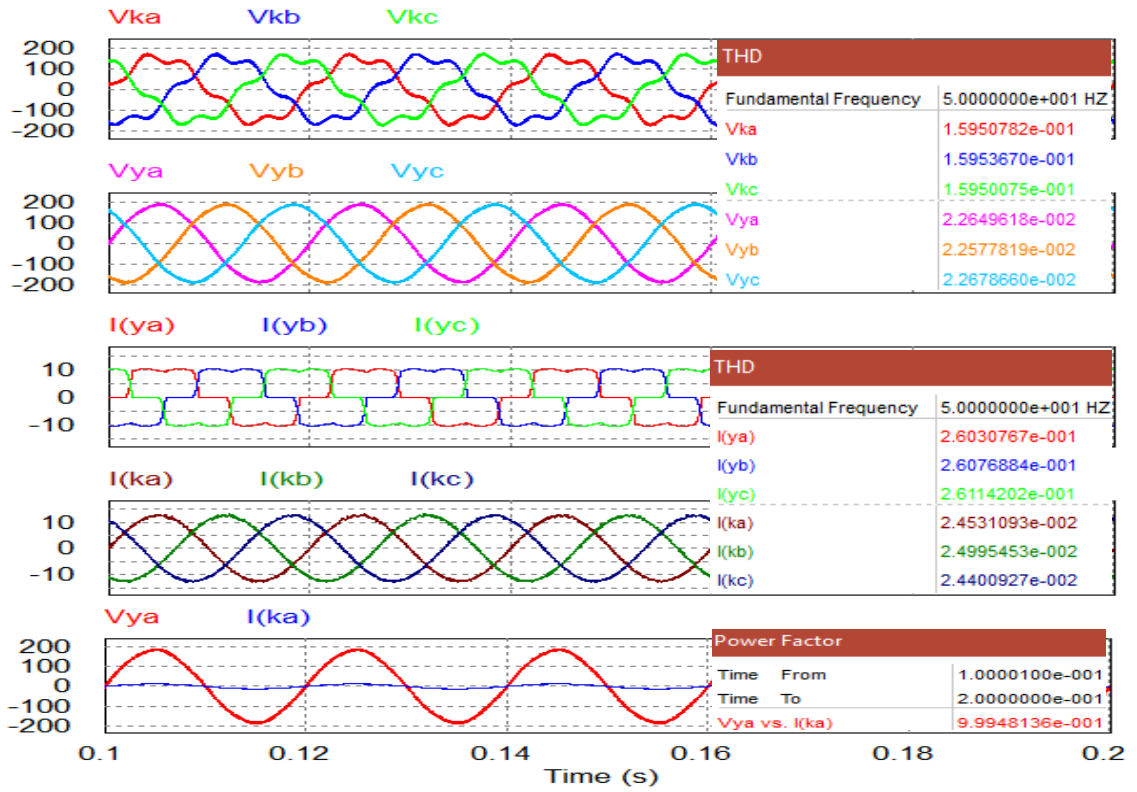


**Şekil 6.16.** ARGV-ARGV kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye ARGV-ARGV kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.95 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.84 oranına, %26.53 oranındaki kaynak akım harmoniği %4.16 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.16'da ARGV-ARGV kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine ARGV-ARGV kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9978'dir.

### 6.3.2. ARGV-SRY kontrol yöntemi

BGKD'ye ARGV-SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.17'de harmonikli kaynak gerilimi ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), filtreleme sonrası yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), harmonikli yük akımı ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), filtreleme sonrası elde edilen sinüzoidal kaynak akımı ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

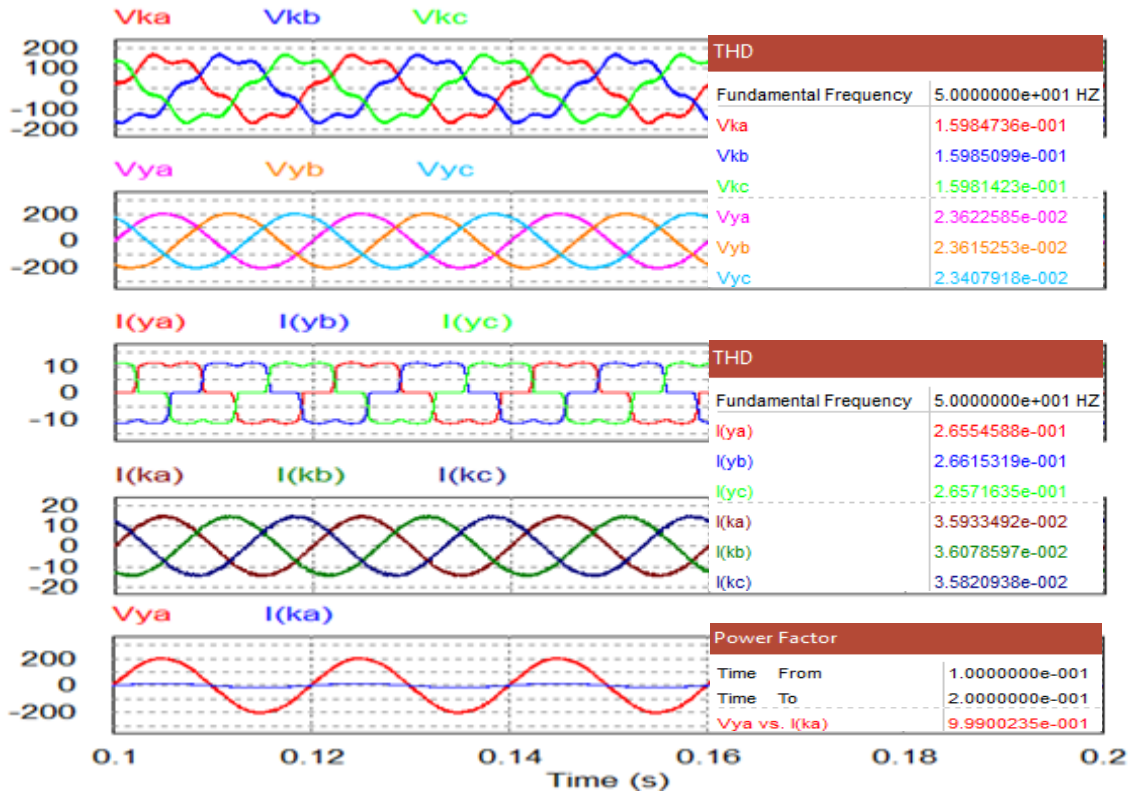


**Şekil 6.17.** ARG-T-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye ARG-T-SRY kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.95 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.26 oranına, %26.03 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.45 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.17'de ARG-T-SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine ARG-T-SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9994'dür.

### 6.3.3. ARG-T-PBT kontrol yöntemi

BGKD'ye ARG-T-PBT kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.18'de harmonikli kaynak gerilimi ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), filtreleme sonrası yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), harmonikli yük akımı ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), filtreleme sonrası elde edilen sinüzoidal kaynak akımı ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

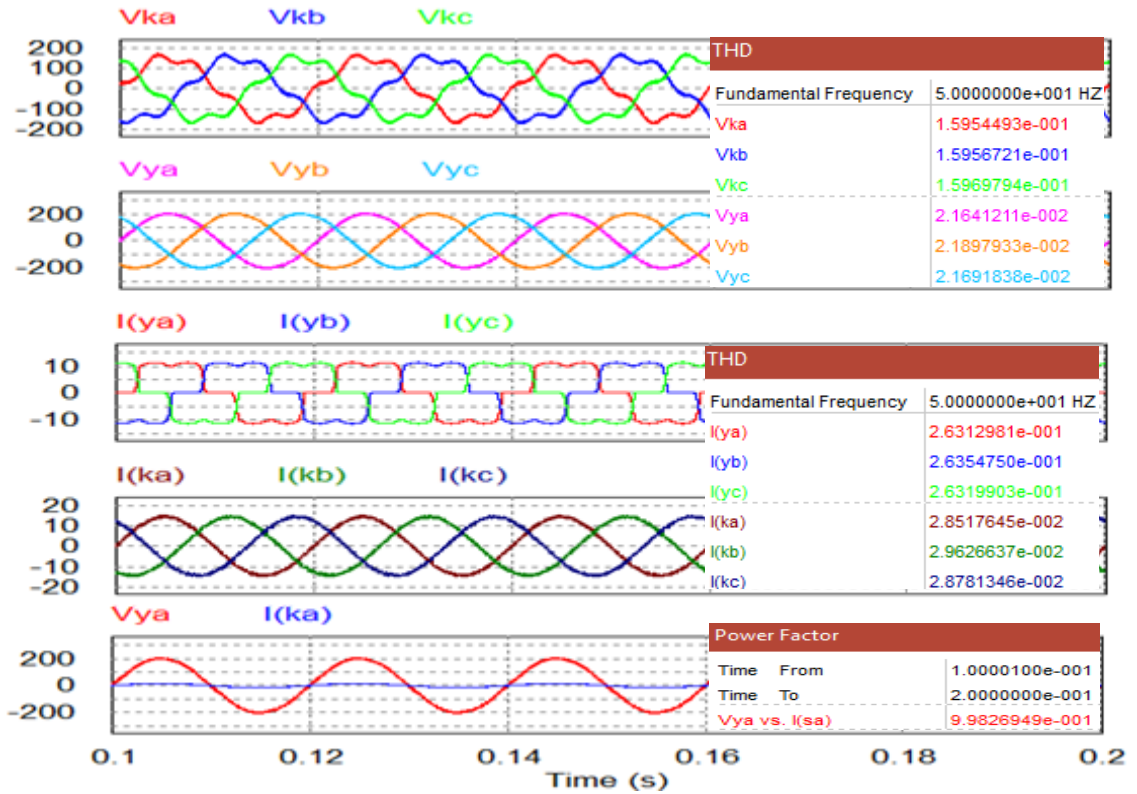


**Şekil 6.18.** ARG-T-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye ARG-T-PBT kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.98 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.36 oranına, %26.55 oranındaki kaynak akım harmoniği %3.59 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.18'de ARG-T-PBT kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine ARG-T-PBT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9990'dır.

### 6.3.4. SRY-ARGT kontrol yöntemi

BGKD'ye SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.19'da harmonikli kaynak gerilimi ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), filtreleme sonrası yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), harmonikli yük akımı ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), filtreleme sonrası elde edilen sinüzoidal kaynak akımı ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

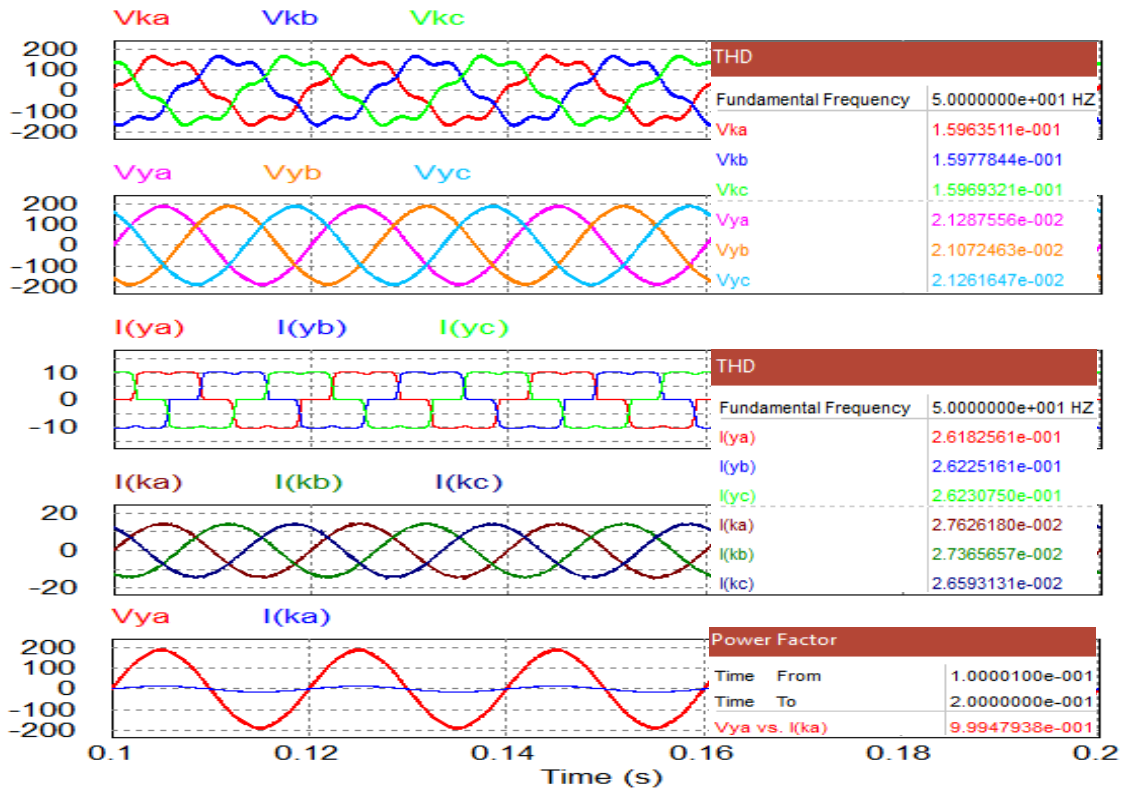


**Şekil 6.19.** SRY-ARGT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.95 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.16 oranına, %26.31 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.85 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.19'da SRY-ARGT kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9982'dir.

### 6.3.5. SRY-PBT kontrol yöntemi

BGKD'ye SRY-PBT kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.20'de kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), yük gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

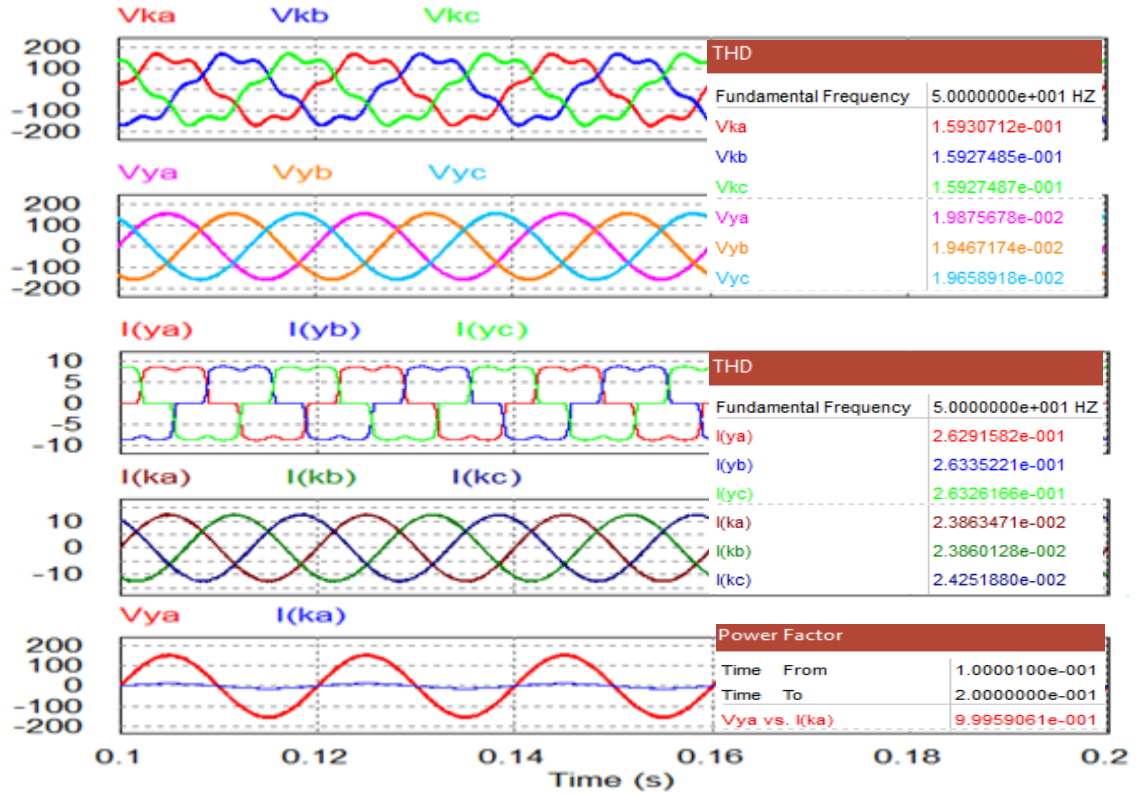


**Şekil 6.20.** SRY-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye SRY-PBT kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.96 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.12 oranına, %26.18 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.76 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.20'de SRY-PBT kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine SRY-PBT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9994'tür.

### 6.3.6. SRY-SRY kontrol yöntemi

BGKD'ye SRY-SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.21'de kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), yük gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

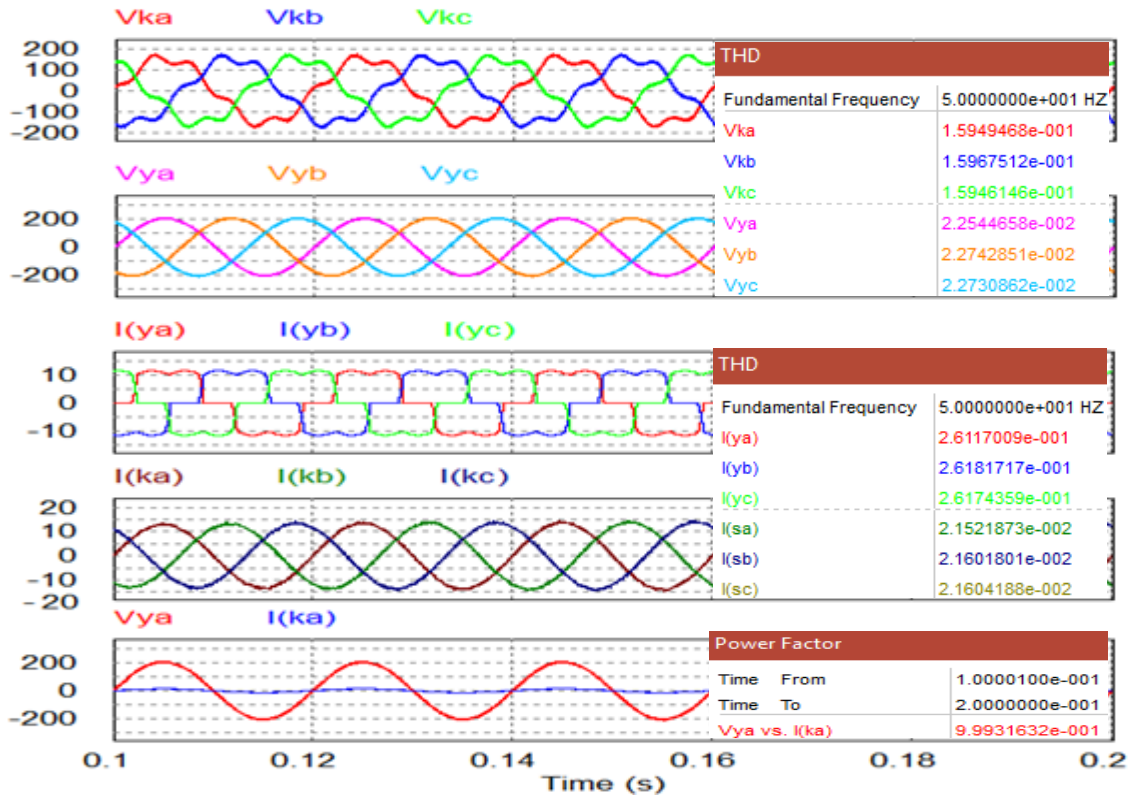


**Şekil 6.21.** SRY-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.93 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1.98 oranına, %26.29 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.38 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.21'de SRY-SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9995'tir.

### 6.3.7. Geliştirilen ARG-T-MAF filtrelili ARG-T kontrol yöntemi

BGKD'ye geliştirilen ARG-T-MAF filtrelili ARG-T kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.22'de kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), yük gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

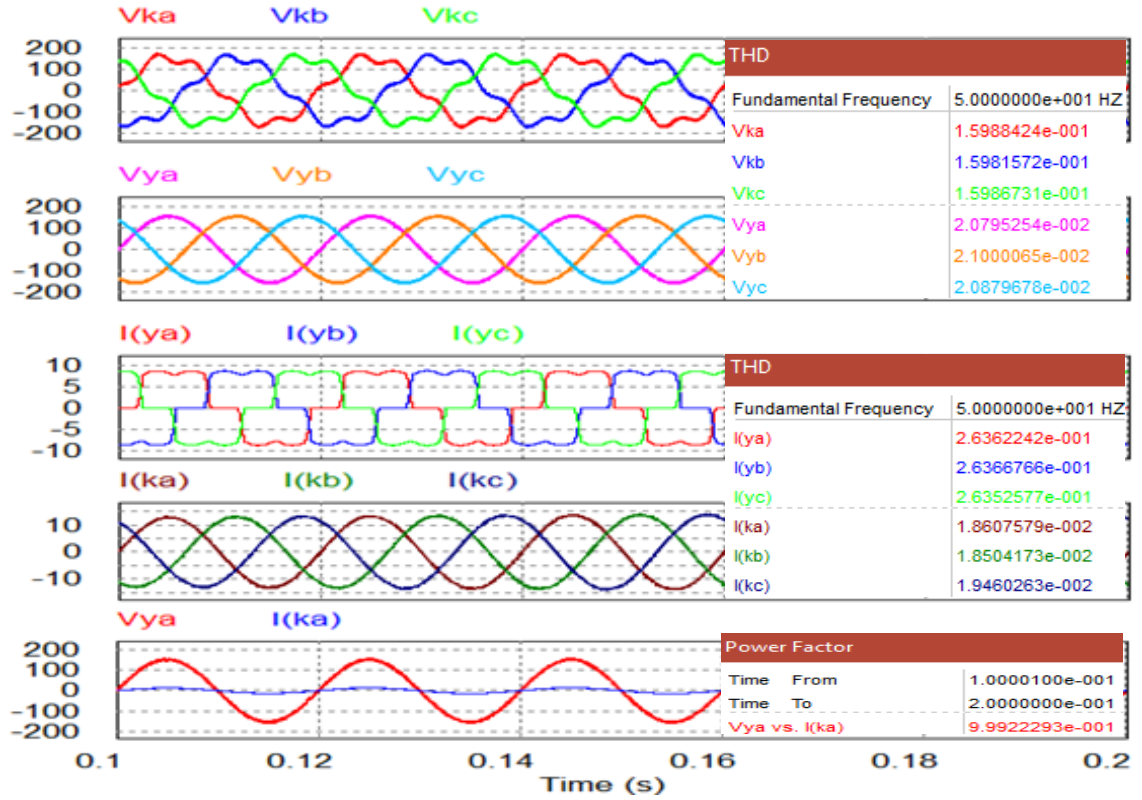


**Şekil 6.22.** Geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılmaktadır. BGKD'ye geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.94 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.25 oranına, %26.11 oranındaki kaynak akım harmoniği %2.15 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.22'de geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine geliştirilen ARG-T-MAF filtreli ARG-T kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9993'tür.

### 6.3.8. Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi

BGKD'ye geliştirilen MAF filtreli SRY-ARG-T kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.23'te kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

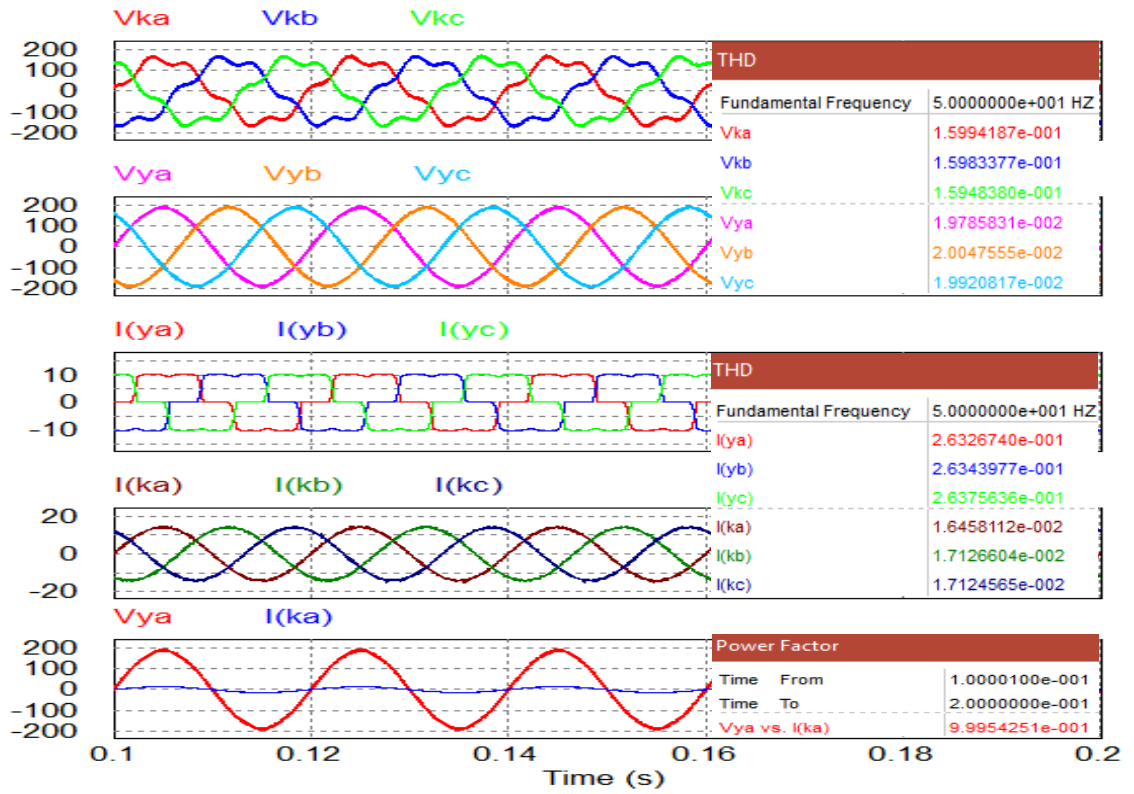


**Şekil 6.23.** Geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.98 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.07 oranına, %26.36 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.86 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.23'te geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine geliştirilen MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9992'dir.

### 6.3.9. Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi

BGKD'ye geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.24'te kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.

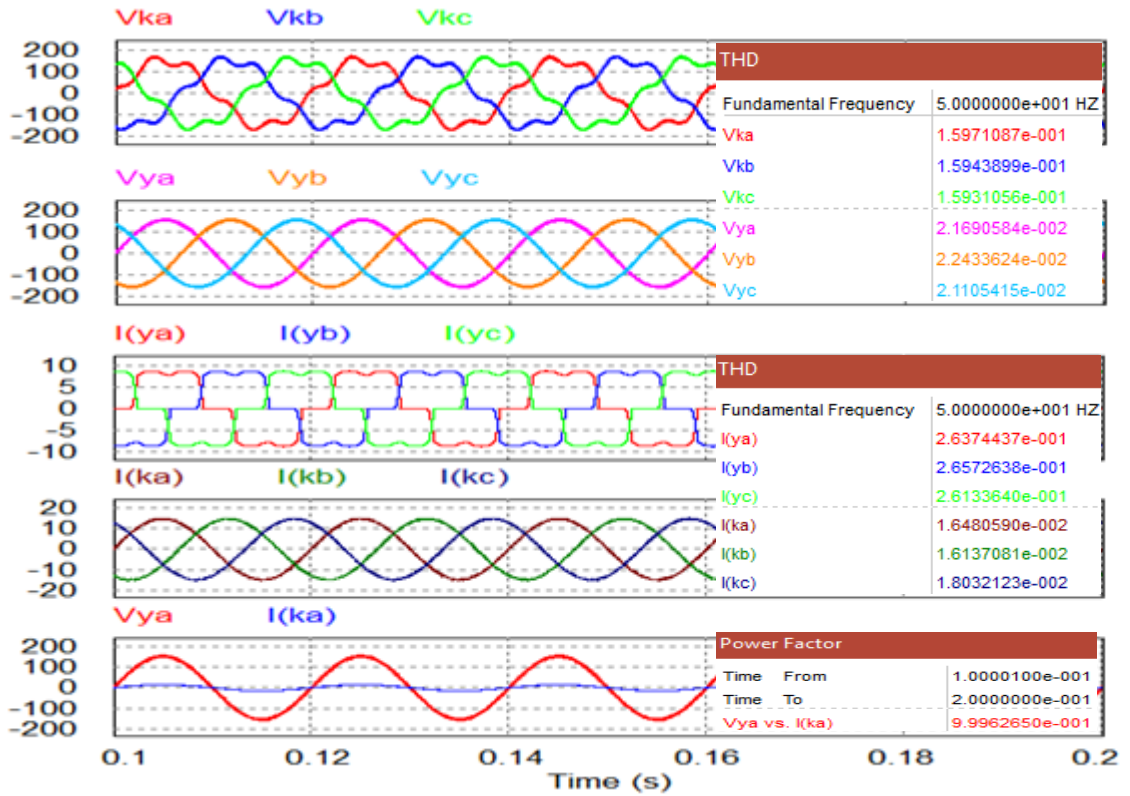


**Şekil 6.24.** Geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda histerezis PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.99 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1.97 oranına, %26.32 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.64 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.24'te geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. Yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü, BGKD sistemine geliştirilen MAF filtreli SRY-PBT kontrol yöntemi uygulandıktan sonra 0.9995'tir

### 6.3.10. Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi

BGKD'ye geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.25'te kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), harmonikli yük akımları ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ), kaynak akımları ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ), kaynak gerilimi ( $V_{ka}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}$ ) güç faktörü simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir.



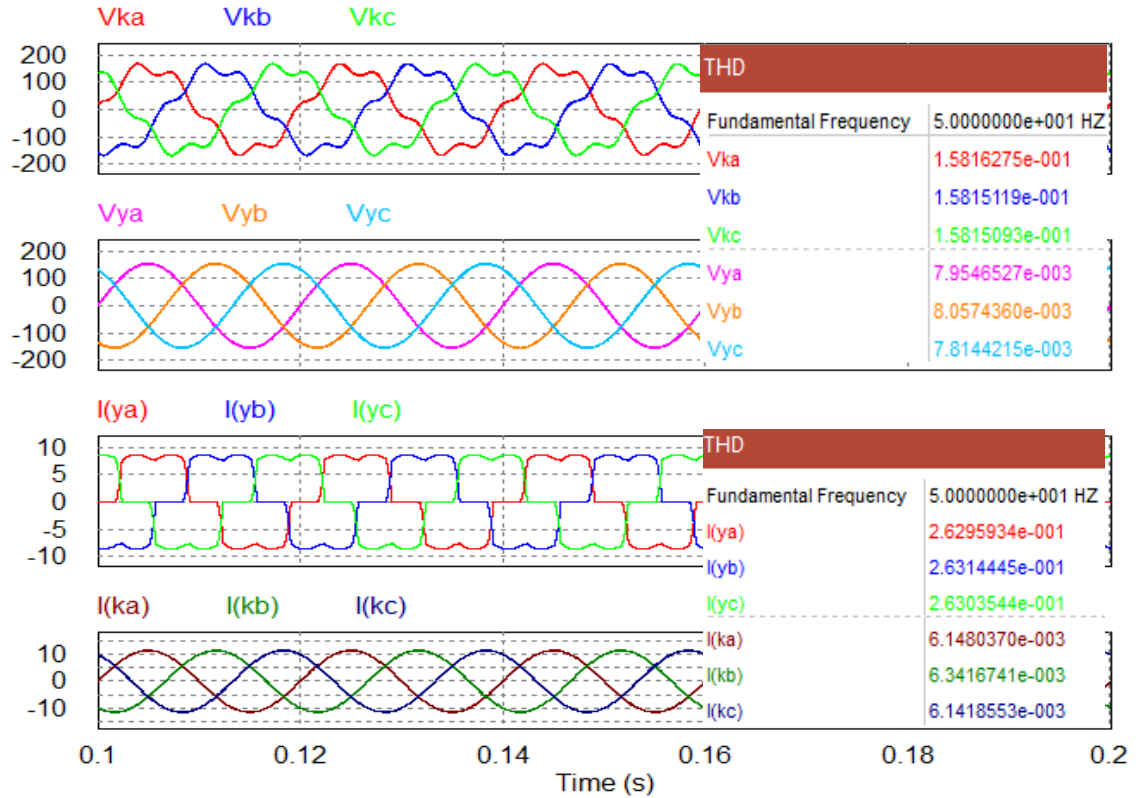
**Şekil 6.25.** Geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak gerilimlerinin, yük gerilimlerinin, yük akımlarının, kaynak akımlarının, yük gerilimi ve kaynak akımının simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda sinüzoidal PWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.94 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.16 oranına, %26.38 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.64 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.25'te geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörü gösterilmektedir. BGKD sistemine geliştirilen STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra, yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü 0.9996'dır.

### 6.3.11. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi

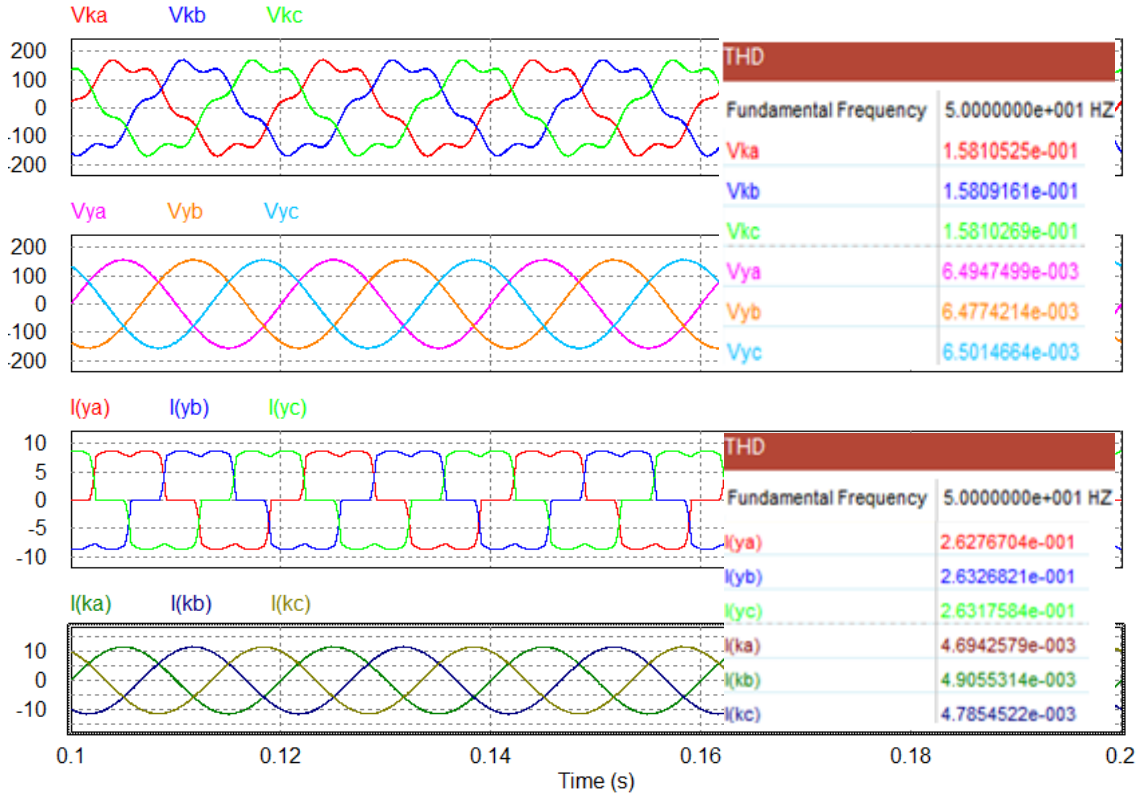
BGKD'ye MAF filtreli önerilen SRY-SRY kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Şekil 6.26'te harmonikli kaynak gerilimleri ( $V_{ka}, V_{kb}, V_{kc}$ ), yük gerilimleri ( $V_{ya}, V_{yb}, V_{yc}$ ), yük akımı ( $i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}$ ) ve kaynak akımı ( $i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}$ ) simülasyon dalga şekilleri gösterilmektedir. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY ile BGKD'nin denetiminde

ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tam denetimli tristörlü yük koşullarında gerçekleştirilmektedir.

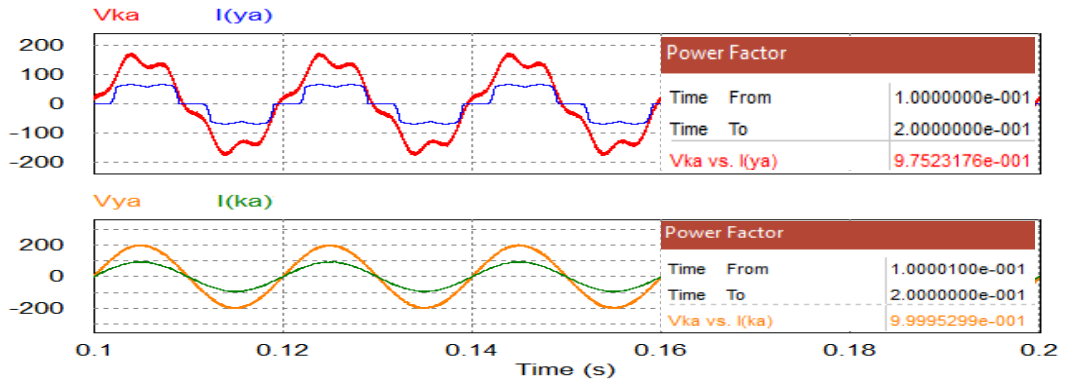


**Şekil 6.26.** Önerilen MAF filtreli SRY-SRY histeresiz PWM kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının, simülasyon sonuçları.

Kontrol yönteminde yapılan karşılaştırmalarda histeresiz PWM veya SVPWM tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. BGKD'ye önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında histeresiz PWM tekniği kullanılarak a-fazı için %15.81 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %0.79 oranına, %26.29 oranındaki kaynak akım harmoniği %0.61 oranına düşürülmektedir. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi histeresiz PWM tekniği kullanılarak a-fazı için %15.81 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %0.64 oranına, %26.27 oranındaki kaynak akım harmoniği %0.46 oranına düşürülmektedir.



**Şekil 6.27.** Önerilen MAF filtreli SRY-SRY SVPWM kontrol yöntemi ile BGKD sisteminin çalışmasından sonra kaynak ve yük gerilimlerinin, yük ve kaynak akımlarının, simülasyon sonuçları.



**Şekil 6.28.** Reaktif güç kompanzasyonu için, yük gerilimi ve kaynak akımı simülasyon sonuçları.

Yükün endüktif ve kapasitif akım içermesi kaynaktan aktif akımlarla birlikte reaktif akımlarda çekilmesine neden olmaktadır. Enerji iletim hatlarında reaktif güç, şebekenin gereksiz yere yüklenmesine, kabloların fazla akım çekmesine ve kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle reaktif gücün minimum seviyede tutulması

istenmektedir. Doğrusal olmayan yük içindeki endüktif ve kapasitif bileşenler akım ile gerilim arasında faz farkı oluşturmaktadır. Şekil 6.28'de görüldüğü gibi kaynak akımın harmonik bileşenleri ve reaktif akım bileşeni yok edilerek gerilimle akım aynı faza getirilmektedir.

Şekil 6.28'de önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi sonrası güç faktörünü göstermektedir. BGKD sistemine önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandıktan sonra, yük gerilimi ile kaynak akımı arasındaki güç faktörü 0.9999 olarak ölçülmektedir.

Bu bölümde, BGKD'de MAF filtreli SRY tabanlı yeni bir kontrol yöntemi önerilmekte ve geleneksel kontrol yöntemleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında alınan sonuçlar Tablo 6.4'te özetlenmektedir. Birleşik güç kalite düzenleyicisinde kullanılan; ARG-T-ARG-T, ARG-T-PBT, ARG-T-SRY, SRY-ARG-T, SRY-PBT, SRY-SRY, MAF filtreli ARG-T-ARG-T, MAF filtreli SRY-ARG-T, MAF filtreli SRY-PBT, STF filtreli SRY-SRY ve önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmaları açıklanmaktadır. Yapılan simülasyon sonuçlarından ve Tablo 6.4'te görüldüğü üzere, önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yönteminin, ARG-T, SRY ve literatürden alınan diğer sonuçlara göre harmonikleri azaltmada daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4'te görüldüğü gibi birleşik güç kalite düzenleyicisine ARG-T-ARG-T kontrol yöntemi uygulandığında a-fazı için %15.76 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.84 oranına indirilmekte ve %29.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %4.16 oranına düşürülmektedir. BGKD'ye ARG-T-PBT kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %2.36 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %3.59 oranına düşürülmektedir. ARG-T-SRY kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %2.26 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.45 oranına düşürülmektedir. SRY-ARG-T kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %2.16 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.85 oranına düşürülmektedir. SRY-PBT kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %2.12 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.76 oranına düşürülmektedir.

**Tablo 6.4.** BGKD’de kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması.

BGKD kontrol yöntemleri		BGKD öncesi THB(%)		BGKD sonrası THB(%)					
				SPWM		HPWM			
SAGF	PAGF	Gerilim (%)	Akım (%)	Gerilim (%)	Akım (%)	Gerilim (%)	Akım (%)		
SRY (Vinnakoti ve Kota, 2017)		14.14	15.12	5.79		-	4.80		
P yöntemi (Vinnakoti ve Kota, 2017)				4.81	-	-	3.83		
STF (Biricik, 2018)		10	10	2.10	8.99	-	-		
H $\infty$ optimal (Li, vd., 2006)		30	21	7	3	-	-		
DQ Bulanık mantık kondrollör (Chourasia ve Panda, 2014)		25.38	28.28	3.75	3.25	-	-		
UTT	ISCT (Pal, vd.,2011)	5.38	15.10	-	-	2.47	4.36		
SMC (Patjoshi, vd., 2017)		20	32.3	2.38	2.84	-	-		
ARGT	ARGT	15.76	29.28	2.84	4.16	-	-		
	PBT			2.36	3.59	2.01	1.84		
	SRY			2.26	2.45	2.11	1.69		
SRY	ARGT			2.16	2.85	1.96	2.79		
	PBT			2.12	2.76	2.19	1.76		
	SRY			1.98	2.38	2.09	1.72		
SRY (STF)	SRY (STF)			2.30	2.13	2.16	1.64		
ARGT (MAF)	ARGT (MAF)			2.25	2.15	-	-		
SRY (MAF)	ARGT (MAF)			2.07	1.86	2.11	1.92		
	PBT (MAF)			2.00	2.34	1.97	1.64		
<b>Önerilen MAF SRY-SRY</b>						<b>2.09</b>	<b>1.80</b>	<b>0.79</b>	<b>0.61</b>
								<b>SVPWM</b>	
						<b>0.64</b>	<b>0.46</b>		

Birleşik güç kalite düzenleyicisine SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %1.98 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.38 oranına düşürülmektedir. STF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında, a-fazı için %15.76 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2.16 oranına indirilmekte ve %29.28 oranındaki kaynak akım harmoniği %1.64 oranına düşürülmektedir. Geliştirilmiş ARGT-MAF filtreli ARGT kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %2.25 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.15 oranına düşürülmektedir. MAF filtreli SRY-ARGT kontrol yöntemi uygulandığında,

kaynak gerilim harmoniği %2.07 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %1.86 oranına dūřurılmaktadır. MAF filtreli SRY-PBT kontrol yōntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %1.97 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %1.64 oranına dūřurılmaktadır.

BGKD'ye önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yōntemi uygulandığında histerezis PWM tekniği kullanılarak a-fazı için %15.81 oranındaki kaynak gerilim harmoniği **%0.79** oranına, %26.29 oranındaki kaynak akım harmoniği **%0.61** oranına dūřurılmaktadır. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yōntemi SVPWM tekniği kullanılarak a-fazı için %15.81 oranındaki kaynak gerilim harmoniği **%0.64** oranına, %26.27 oranındaki kaynak akım harmoniği **%0.46** oranına dūřurılmaktadır.

## 7. SONUÇLAR

Endüstriyel güç uygulamalarında, güç kalitesini artırmak, akımlar ve gerilimler üzerindeki harmonik yok etmek, elektrik enerjisinin verimliliğini sağlamak amacıyla pasif filtreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Pasif filtrelerin, büyük boyutlu olması, çok fazla yer kaplamaları, sık sık bakım gerektirmeleri, sabit bir kompanzasyon imkanı sunmaları gibi dezavantajları bulunmaktadır. Güç kalitesi problemlerini gidermek ve kaliteli bir güç sağlayabilmek için modern güç elektroniği tabanlı özel güç cihazları kullanılmaktadır. Özel güç cihazlarından biri olan BGKD sistemleri güç kalitesi problemlerine karşı çözüm olarak geliştirilmiştir.

Bölüm 5'te, BGKD'ye MAF filtreli senkron referans yapı tabanlı yeni bir kontrol yöntemi önerilmekte ve literatürde kullanılan kontrol yöntemleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Kontrol devresi istenen büyüklük ve frekansta sinüs referans gerilim dalgasını üretmekte ve gerçek gerilim dalgası ile karşılaştırılmaktadır. Gerilim bir üst histerezis bandını aştığında, yarım köprüdeki üst anahtar kapatılır ve alt anahtar açılır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi için histerezis PWM veya SVPWM kontrolü, eviricinin anahtarlama modelini oluşturmak için kullanılmaktadır. Aktif güç filtresi konfigürasyonları için çeşitli PWM kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri elde edilmesinde genel olarak sinüzoidal PWM tekniği kullanılmaktadır. Ancak histerezis PWM ve SVPWM kontrol yönteminin, hızlı kontrol edilebilirliği, kolay uygulanması ve dinamik cevabının hızlı olması nedeniyle diğer PWM kontrol teknikleri arasında en iyi sonuçları vermektedir.

Önerilen kontrol yöntemi ve literatürde kullanılan kontrol yöntemleri BGKD'ye uygulanmadan önce seri ve paralel AGF'ye ayrı ayrı simüle edilmektedir. Seri ve paralel AGF'nin simülasyon sonuçları sırasıyla Tablo 6.2 ve 6.3'te özetlenmektedir. BGKD'de gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarından alınan sonuçlar Tablo 6.4'te özetlenmektedir. Birleşik güç kalite düzenleyicisi devrede değil iken a-fazı için, akımdaki harmonik bozulma %29.28 ve gerilimdeki harmonik bozulma %15.76 olarak ölçülmektedir. BGKD'ye ARGV-ARGV kontrol yöntemi uygulandığında kaynak gerilim harmoniği %2.84 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %4.16 oranına düşürülmektedir. SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında, kaynak gerilim harmoniği %1.98 oranına indirilmekte ve kaynak akım harmoniği %2.38 oranına düşürülmektedir. BGKD'ye önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi

uygulandığında histerezis PWM tekniği kullanılarak kaynak gerilim harmoniği **%0.79** oranına, kaynak akım harmoniği **%0.61** oranına düşürülmektedir. Önerilen MAF filtreli SRY-SRY kontrol yöntemi uygulandığında SVPWM tekniği kullanılarak kaynak gerilim harmoniği **%0.64** oranına, kaynak akım harmoniği **%0.46** oranına düşürülmektedir.

PSIM paket programı ile yapılan simülasyon çalışmalarında, önerilen MAF filtreli SRY kontrol yönteminden alınan sonuçların, ARGV ve SRY yöntemlerinden alınan simülasyon sonuçlarına göre harmonikleri gidermede daha başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen MAF filtreli SRY sistemi ile temiz enerji üretimi ve güç kalitesi iyileştirme, eş zamanlı gerilim ve akım harmoniklerin giderilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca önerilen kontrol yönteminin BGKD’de SRY kontrolünde MAF kullanımı ile geliştirilmiş yük akımı telafisi, gerilim düşme ve yükselmelerin giderilmesi, yük akımının dengelenmesi başlıca avantajları arasındadır.

BGKD’nin doğrusal olmayan yükün neden olduğu harmonikleri azalttığı ve IEEE 519-2014 standardı sınırlarında kaynak gerilimi ve akımının THB değerini koruduğu gözlenmiştir. Güç kalitesi problemlerinde ve harmoniklerin giderilmesinde geleneksel kontrol yöntemlerinin performansı önerilen MAF filtreli SRY-SRY yöntemi kullanımı ile geliştirilmiştir. Sistemin, gerilim düşme ve yükselmelerini, frekans değişimlerini, gerilimde dalgalanmalarını ve yük dengesizliği gibi çeşitli güç kalitesi problemlerine karşı kararlı olduğu görülmektedir. Modern dağıtım sistemi için BGKD’ye MAF filtreli SRY-SRY yöntemi uygulandığında iyi bir çözüm olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abardeh H.M., Ghazi, R., “A New Reference Waveform Estimation Strategy for Unified Power Quality Conditioner (UPQC)”, *IEEE International Energy Conference*, Manama, Bahrain, 704-709 (2010).
- Abdusalam, M., Poure, P., Saadate, S., “A New Control Scheme of Hybrid Active Filter Using Self-Tuning-Filter”, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 35-40 (2007).
- Ahmed, S., Madjid, G., Meslem Y.M., Tedjini, H., “Real Time Control of an Active Power Filter under Distorted Voltage Condition”, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, ISSN: 2088-8694, December, 2(4): 424-433 (2012).
- Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components”, *IEEE Transaction on Industry Application*, 20(3): 625-630 (1984).
- Alexander, K., Thompson, M.T., “Power Quality in Electrical Systems”, *McGraw Hill Companies*, 6(12): 25-98 (2007).
- Apay T.F., “Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2008).
- Arrilaga, J., Watson, N.R., “Power System Harmonics”, *John Wiley & Sons, Ltd West Sussex*, England (2003).
- Biricik, S., “Design of Unified Power Quality Conditioner for Power Quality Improvement in Distribution Network”, *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 6(1): 47-52 (2018).
- Bosch, S., Staiger, J., Steinhart, H., “Predictive Current Control for an Active Power Filter with LCL Filter”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(6): 4943-4952 (2018).
- Carvalho, P.M.S., Correia, P.F., Ferreira, F.M., “Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2): 766-772 (2008).
- Castello, J., Espi, M.J., Gil, R.G., “A New Generalized Robust Predictive Current Control for Grid Connected Inverters Compensates Anti Aliasing Filters Delay”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(7): 4485-4494 (2016).
- Chourasia, M., Panda, A., “Instantaneous DQ Method for UPQC with PI And Fuzzy Controller”, *6th IEEE Power India International Conference (PHICON)*, 1-6 (2014).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Chebabhi, A., Abdelhalim, K., Fellah, F.M.K., “Self Tuning Filter and Fuzzy logic Control of Shunt Active Power Filter for Eliminates the Current Harmonics Constraints under Unbalanced Source Voltages and Loads Conditions”, *Journal of Power Technologies*, 98(1): 1-19 (2018).
- Cheung, V.S., Yeung, R.S., Chung, H.S., Lo, A.W., Wu, W., “A Transformer Less Unified Power Quality Conditioner with Fast Dynamic Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(5): 3926–3937 (2018).
- Czarnecki, S.L., “Constraints of Instantaneous Reactive Power  $P_q$  Theory”, *IET Power Electronics*, 7(9): 2201-2208 (2014).
- Darwish, A., Holliday, D., Ahmed, S., Massoud, A.M., Williams, B.W., “A Single-Stage Three- Phase Inverter Based on Cuk Converters for PV Applications”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, December, 2(4): 797-807 (2014).
- Deshpande, P., Shrivastava, A., Khare, A., “Different Modeling Aspects and Energy Systems of Unified Power Quality Conditioner (UPQC):An Overview”, *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(2): 395-402 (2013).
- Devassy, S., Singh, B., “Design and Performance Analysis of Three Phase Solar PV Integrated UPQC”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1): 73-81 (2018).
- Djazia, K., Krim, F., Chaoui, A., Sarra, M., “Active Power Filtering Using the ZDPC Method under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions”, *Energies* 2015, ISSN 1996-1073, 8(3): 1584-1605 (2015).
- Dursun, M., “Doğrusal Olmayan Sistemler için Bir Seri Aktif Güç Filtresi Tasarımı ve Analizi”, *Journal of Polytechnic*, 6(3): 523-530 (2003).
- Elphick, S., Gosbell, V., Smith, V., Perera, S., Ciufu, P., Drury, G., “Methods for Harmonic Analysis and Reporting in Future Grid Applications”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2):989-995 (2017).
- Ertl, H., Kolar, J.W., Zach, F.C., “A Novel Multicell DC-AC Converter for Applications in Renewable Energy Systems”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 49(5): 1048-1057 (2002).
- Feng, L., Wang, Y., “Modeling And Resonance Control of Modular Three Level Shunt Active Power Filter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, September, 64(9): 7478-7486 (2017).
- Fuchs, E.F., Masoum M.A.S., “Power Quality in Electrical Machines and Power Systems”, *Academic Press*, 443-468 (2008).

**KAYNAKLAR (Devam ediyor)**

- Fujita, H., Akagi, H., “The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series Active Filters and Shunt Active Filters”, *27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 1: 494-501 (1996).
- Ge, J., Zhao, Z., Yuan, L., Lu, T., He, F., “Direct Power Control Based on Natural Switching Surface for Three-Phase PWM Rectifiers”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6): 2918-2922 (2015).
- Ghamri, A., Benchouia, M. T., Golea, A., “Sliding Mode Control Based Three-Phase Shunt Active Power Filter: Simulation and Experimentation”, *Electric Power Components and Systems*, 40(4): 382-398 (2012).
- Graovac, D., Katic, V., Rufer, A., “Power Quality Problems Compensation with Universal Power Quality Conditioning System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2): 968-976 (2007).
- Gohil, S.N., Makwana, M.V., Kadivar, K.T., Tetar, G.J., “Three Phase Unified Power Quality Conditioner (UPQC) for Power Quality Improvement by using UVTG Technique”, *International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, Coimbatore, India, 151-156 (2013).
- Gopal, M. R., Yarangula, S., “Simulation and Analysis of Shuntactive Power Filter for Power Quality Improvement”, *International Journal of Advanced Trends In Computer Science And Engineering*, 3(1): 26-31 (2014).
- Guihua, L., Lei, G., Hailiang, T., Xiaohui, Z., Wei, W., “PQ-U Control Method of Grid-Connected Pv Inverter Under Weak Grid”, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Harbin, China, 1-6 (2017).
- Gyugyi, L., “Unified Power Flow Control Concept For Flexible Ac Transmission Systems”, *Proc. IEEE 139(C)*, 139(4): 323-331 (1992).
- Hafezi, H., D’Antona, G., Dede, A., Giustina, D.D., Faranda, R., Massa, G., “Power Quality Conditioning in LV Distribution Networks: Results by Field Demonstration”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1): 418-427 (2017).
- Harirchi, F., Simoes, M.G., “Enhanced Instantaneous Power Theory Decomposition for Power Quality Smart Converter Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(11): 9344-9359 (2018).
- Hemram, M., Tudu, K.A., “Mitigation of Power Quality Problems Using Unified Power Quality Conditioner (UPQC)”, *Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT)*, 1-5 (2015).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- IEEE PES., “IEEE Recommended Practices and Rrequirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, New York, 1-29 (2014).
- Johal, H., Divan, D., “Design Considerations for Series-Connected Distributed FACTS Converters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(6): 1609-1618 (2007).
- Julian, A.L., Oriti, G., “A Comparison of Redundant Inverter Topologies to Improve Voltage Source Inverter Reliability”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(5): 1371-1378 (2007).
- Jung, T.H., Gwon, G.H., Kim, C.H., Han, J., Oh, Y.H., Noh, C:H., “Voltage Regulation Method for Voltage Drop Compensation and Unbalance Reduction in Bipolar Low Voltage DC Distribution System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1): 141-149 (2018).
- Kamble, Y. S., Waware, M. M., “Unified Power Quality Conditioner for Power Quality Improvement with Advanced Control Strategy”, *International Mutli-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (IMAC4S)*, Kottayam, India, 432-437 (2013).
- Kesler, M., “Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinin Senkron Referans Yapı Tabanlı Uygulama Tasarımı Ve Analizi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli (2010).
- Kesler, M., Ozdemir, E., “Synchronous-Reference-Frame-Based Control Method for UPQC Under Unbalanced and Distorted Load Conditions”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(9): 3967-3975 (2011).
- Khadkikar, V., Chandra, A., “A New Control Philosophy for a Unified Power Quality Conditioner (UPQC) to Coordinate Load Reactive Power Demand Between Shunt and Series Inverters”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, October, 23(4): 2522-2534 (2008).
- Kinhal, V.G., Agarwal, P., Gupta, H.O., “Performance Investigation of Neural Network Based Unified Power Quality Conditioner”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(1): 431-437 (2011).
- Kumar A., Bhole, A.A., “Design of Hybrid Filter for Elimination of Current Harmonics”, *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT)*, May 19-20, India, 1337-1343 (2017).
- Kumawat, P., Zaveri, N., Verma, D., “Analysis of Power Quality Disturbances using M-Band Wavelet Packet Transform” *2017 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC)*, Coimbatore, India, 364-368 (2017).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Li, P., Bai, Q., Li, G., “Coordinated Control Strategy for UPQC and its Verification”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 8 (2006).
- Matysik, J.T., “The Current and Voltage Phase Shift Regulation in Resonant Converters with Integration Control”, *IEEE Trans. Ind. Electron*, April, 54(21): 1240-1242 (2007).
- Mamdouh, M.M., Mansour, A.A., Nashed, M.N.F., Zobaa, A.F., Elzahab, E.E.A., “Comparison between Hysteresis and Space Vector PWM of Shunt Active Power Filter Based on Prediction Harmonic Current Extraction”, *Journal of Next Generation Information Technology (JNIT)*, May, 5(2): 9-19 (2014).
- Mesbahia, N., Ouaria, A., Abdeslamb, O.D., Djamahc, T., Omeiri, A., “Direct Power Control of Shunt Active Filter using High Selectivity Filter (HSF) Under Distorted or Unbalanced Conditions”, *Electric Power Systems Research*, March, 108: 113-123 (2014).
- Mi, C., Bai, H., Wang, Gargies, C.S., “Operation Design And Control of Dual H-Bridge-Based Isolated Bidirectional DC-DC Converter”, *IET Power Electronics*, December, 1(4): 507-517 (2008).
- Modesto, A.R., Oliveira, A.A., Silva, S.A.O., Bacon, D.V., “A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(8): 5503-5514 (2016).
- Modi, S.P., Parmar K.S., Joshi, S.K., “Flexible 3P4W System using UPQC with Combination of SRF and P-Q Theory Based Control Strategy”, *22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Bali, Indonesia, 1-5 (2012).
- Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., “Power Electronics, Converters, *Applications and Design*”, Canada (1995).
- Mongkol, D., Trin, S., Srithorn, P., “Evaluation of DVR Capability Enhancement Zero Active Power Tracking Technique”, *IEEE Access*, ISSN:2169-3536, 5(10): 285-295 (2017).
- Nie, C., Wang, Y., Lei, W., Chen, M., Zhang, Y., “An Enhanced Control Strategy for Multiparalleled Grid Connected Single-Phase Converters with Load Harmonic Current Compensation Capability”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7): 5623-5633 (2018).
- Ngotakun, A., Areerak, K.L., Areerak, K.N., Srikaew, A., “Control of Series Active Power Filter using Fuzzy Logic Controller”, *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 16-18 May, 1-4 (2012).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Özdemir, E., Uçar, M., Kesler, M., Kale, M., “A Simplified Control Algorithm for Shunt Active Power Filter without Load and Filter Current Measurement”, **32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON)**, France, 2599-2604 (2006).
- Pal, Y., Swarup, A., Singh, B., “A Control Strategy Based on UTT and ISCT for 3P4W UPQC”, **International Science Index, Electronics and Communication Engineering**, 5(3): 372-377 (2011).
- Panchbhai, A., Parmar, S., Prajapati, N., “Shunt Active Filter For Harmonic And Reactive Power Compensation using P-Q Theory”, **International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)**, Chennai, India, 260-264 (2017).
- Patel, K.V., Bhavsar, P.R., “Simulation & Analysis of Series Active filter for Power Quality Improvement”, **International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology(IJAREST)**, May, 02(05): 1-6 (2015).
- Peng, F.Z., Chen, L., Zhang, F., “Simple Topologies of PWM AC-AC Converters”, **IEEE Power Electronics Letters**, 1(1): 10-13 (2003).
- Pereira, M.M.R., Ferreira, M.M.C., Barbosa, M.F., “Comparative Study of STATCOM and SVC Performance on Dynamic Voltage Collapse of an Electric Power System with Wind Generation”, **IEEE Latin America Transactions**, 12(2): 138-145 (2014).
- Perez, R.J., Cerrada, G.A., Gimenez, M.O., Macho, Z.J.L., “On the Power Flow Limits and Control in Series Connected Custom Power Devices”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 31(10): 7328-7338 (2016).
- Patjoshi, R.K., Mahapatra, K., “High-Performance Unified Power Quality Conditioner using Non Linear Sliding Mode and New Switching Dynamics Control Strategy”, **IET Power Electronics**, ISSN:1755-4535, 10(8): 863-874 (2017).
- Rahman, A., Rahman, M., Islam, R., “A study of THD minimization of three phase inverter using modified THPWM”, **2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)**, 1-4 (2017).
- Raju, N.I., Islam, M.S., Uddin, A.A., “Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load Micro System”, **International Journal of Renewable Energy Research**, ISSN:1309-0127, 3(3): 647-658 (2013).
- Rauf, A.M., Sant, A.V., Khadkikar, V., Zeineldin, H.H., “A Novel Ten-Switch Topology for Unified Power Quality Conditioner”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 31(10): 6937-6946 (2016).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Sahoo, K.S., Bhattacharya, T., “Phase Shifted Carrier-Based Synchronized Sinusoidal PWM Techniques for a Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1): 513-524 (2018).
- Salunkhe, P.S., Gaur, S., “Implementation of Shunt Active Power Filter with Comparative Study of SPWM and SVPWM Technique for Reduction of THD”, *Int. Journal of Engineering Research and Application*, ISSN:2248-9622, September, 7(9): 42-47 (2017).
- Serban, E., Ordonez, M., Pondiche, C., “Voltage and Frequency Grid Support Strategies Beyond Standards, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(1): 298-309 (2017).
- Senthilnathan, K., Annapoorani, I., “Implementation of Unified Power Quality Conditioner (UPQC) Based on Current Source Converters For Distribution Grid and Performance Monitoring Through Labview Simulation Interface Toolkit Server: A Cyber Physical Model”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(11): 2622-2630 (2016).
- Shabib, G., Hussein, M.M., Hasseeb, M.M., “Comparative Study of Different Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Non Linear Loads”, *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 1037-1043, (2017).
- Silva, C.H., Pereira, R.R., Silva, B.E.L., Lambert. T.G., Bose, B.K. Improving the Dynamic Response of Shunt Active Power Filter using Modified Synchronous Reference Frame PLL, *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 790-795 (2008).
- Silva, S.A.O., Negrao, F.A., “Single Phase to Three Phase Unified Power Quality Conditioner Applied in Single Wire Earth Return Electric Power Distribution Grids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(5): 3950-3960 (2018).
- Singh B., Venkateswarlu, P., “A Simplified Control Algorithm for Three Phase Four-Wire Unified Power Quality Conditioner”, *Journal of Power Electronics*, January 10(1): 91-96 (2010).
- Singh, B., Arya, S.R., “Implementation of Single Phase Enhanced Phase Locked Loop Based Control Algorithm for Three Phase DSTATCOM”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3): 1516-1524 (2013).
- Smith, C.W., “Power Systems And Harmonic Factors, *IEEE Potentials*, 20(5): 10-12 (2002).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Sriranjani, R., Jayalalitha, S. “Design of Shunt Active Filter using Iterative Method to Mitigate the Harmonics and Reactive Power”, *Journal of Engineering and Applied Sciences (ARPJ)*, December, ISSN 1819-6608, 12(24): 7239-7249 (2017).
- Suslov, K.V., Solonina, N.N., Smirnov, A.S., “Distributed Power Quality Monitoring,” *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 517-520 (2014).
- Sünter, Z., Altun, H., Sünter S., “Tek Darbe Modülasyonlu Bir Fazlı Evirici Sürücü Sisteminde Harmonik Eliminasyonu İçin Yeni Bir Yaklaşım”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(2): 237-247 (2015).
- Teke, A., Saribulut, L., Tumay, M., “A Novel Reference Signal Generation Method for Power Quality Improvement of Unified Power Quality Conditioner”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4): 2205-2214 (2011).
- Xiu, C., Liu, Y., “Hysteresis Response Neural Network and Its Applications”, *ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, 361-364 (2009).
- Wang, B., Yan, W., Wang, N., Huang, X., “Simulation Research on Unified Power Quality Compensator for Distribution System, *Power and Energy Engineering Conference APPEEC'09*, China, 1-4 (2009).
- Wu, F.T., Hsieh, C.H. Hsu, W.C., Chang, R.Y., “Three Phase Three Wire Active Power Filter With D-Σ Digital Control to Accommodate Filter Inductance Variation”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(1): 44-53 (2016).
- Woo, C.L., Dong, M.L., Taeck, K.L., “New Control Scheme for a Unified Power-Quality Compensator Q with Minimum Active Power Injection”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2): 1068-1076 (2010).
- Vadirajacharya, K., Agarwal, P., Gupta, H.O., “Unified Constant Frequency İntegration Control of Universal Power Quality Conditioner”, *International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, 12-15 December, 1-5 (2006).
- Vahedi, H., Sheikholeslami, A., “The Source-Side İnductance Based Adaptive Hysteresis Band Current Control to be Employed in Active Power Filters”, *International Review on Modeling and Simulation Journal*, 3(5): 840-845 (2010).
- Vengatesh, C., Elango, M. K., “Improvement of Power Quality Using a Hybrid UPQC in Renewable Energy”, *International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, Coimbatore, India, 166-169 (2013).

**KAYNAKLAR (Devam ediyor)**

- Vinnakoti, S., Kota, V.R., “SRF and Real Power Theory Based Control of A Nine Switch Converter Based UPQC”, *International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 1-4 (2017).
- Yadaiah, N., Priya, K., Das, T.R., “Design of Neural Hysteris Band PWM Current Controller”, *1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 1-5 (2006).
- Ye, J.,Gooi, H.B., Wu, F., “Optimization of the Size of UPQC System Based on Data Driven Control Design”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, ISSN:1944-9933, 9(4): 1-10 (2018a).
- Ye, J., Gooi, H.B., Wu, F., “Optimal Design and Control Implementation of UPQC Based on Variable Phase Angle Control Method”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7): 3109-3123 (2018b).
- Zhang, Y., Yun, W.L., Zargari, N.R., Cheng, Z., “Improved Selective Harmonics Elimination Scheme with Online Harmonic Compensation for High Power PWM Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(7): 3508-3517 (2015).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :Hacer ÜÇGÜN  
Doğum Yeri ve Tarihi :Eskişehir / 23.06.1994



### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Bilimsel Faaliyetleri :

1. International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Tekirdağ, 20-23 October 2016.
2. 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, 19-21 October 2018.
3. International Journal of Scientific and Technological Research (IJSTR), ISSN:2422-8702, 4(8):6-16, 2018.
4. International Conference on Physical Chemistry and Functional Materials (PCFM'18), Elazığ, 19-21 June 2018.

### İş Deneyimi

Stajlar :TEİAŞ Kütahya (1. Staj)  
:Kütahya Şeker Fabrikası A.Ş. (2. Staj)  
Projeler :Mikrodenetleyici Tabanlı Haberleşme Sistemi (Lisans Çalışması)  
Çalıştığı Kurumlar :Bilecik Yapı Denetim Limited Şirketi

### İletişim

Adres :Bahçelievler Mah. Sarmaşık Sok. No:33/2 Merkez/BİLECİK  
E-Posta Adresi :hacerk.ucgun@gmail.com

### Yabancı Dil Bilgisi

- İngilizce
- Okuma (orta), Yazma (orta), Dinleme (orta), Konuşma (orta)

**Tarih: 11/01/2019**