

**T.C.  
SİİRT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK GERİLİMLİ DOĞRU AKIM İLETİM SİSTEMLERİ İÇİN BİR  
AKTİF DOĞRU AKIM FİLTRESİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat AKDEMİR  
(133103001)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM  
İkinci Danışman : Doç. Dr. Naci GENÇ**

**Haziran-2015  
SİİRT**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Murat AKDEMİR tarafından hazırlanan “Yüksek Gerilimli Doğru Akım İletim Sistemleri için Bir Aktif Doğru Akım Filtresi Tasarımı ve Simülasyonu” adlı tez çalışması 11/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğiyle Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜNDOĞDU

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM

.....

#### Üye

Yrd. Doç. Dr. Fevzi HANSU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Koray ÖZRENK  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışması esnasında sürekli yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM'a ve Doç. Dr. Naci GENÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Murat AKDEMİR  
SİİRT-2015



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖN SÖZ .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT.....	x
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. YÜKSEK GERİLİMLİ DOĞRU AKIM (YGDA) İLE ENERJİ İLETİMİ .....</b>	<b>8</b>
2.1. Genel Bilgi .....	8
2.2. Avantajları .....	9
2.2.1. Uzak mesafe güç iletimi .....	9
2.2.2. Uzun mesafe su geçişleri .....	9
2.2.3. Asenkron şebekeler .....	10
2.2.4. Kontrol edilebilirlik .....	10
2.2.5. Ekonomik değerlendirme.....	10
2.2.6. Çevre sorunları.....	11
2.3. YGDA İletim Sistemlerinin Ana Türleri .....	12
2.3.1. DA devresi .....	12
2.3.2. Sırt-sırta dönüştürücüler .....	13
2.3.3. Tek kutuplu uzun mesafe iletim.....	13
2.3.4. Çift kutuplu uzun mesafe iletimleri .....	14
<b>3. HARMONİKLER.....</b>	<b>17</b>
3.1. Tanımlar ve Kavramlar .....	17
3.1.1. Giriş .....	17
3.1.2. Lineer olmayan elemanlar .....	17
3.1.3. Sinüzoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler .....	18
3.1.4. Harmonik büyüklüklere ait kavramlar .....	18
3.2. Harmonik Kaynakları .....	20
3.3. Harmoniklerin Etkileri .....	20
<b>4. FİLTRELER .....</b>	<b>21</b>
4.1. Pasif Filtreler.....	21
4.1.1. Seri filtreler .....	22
4.1.2. Paralel filtreler .....	22
4.2. Aktif Filtreler .....	23
4.2.1. Aktif filtrenin yapısı.....	24

4.2.2. Paralel aktif filtre .....	31
4.2.3. Seri aktif filtre .....	31
4.3. Hibrit Filtreler .....	32
<b>5. AKTİF DOĞRU AKIM FİLTRESİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU .....</b>	<b>33</b>
5.1. Güç Sistemi Modelini Oluşturan Elemanlar .....	37
5.1.1. Senkronize 12-darbeli üreteç .....	37
5.1.2. PWM üreteci ( 2 seviyeli) .....	38
5.1.3. Güç dönüştürücü bloğu .....	38
5.1.4. Doğru akım iletim hattı .....	38
5.1.5. Birinci dereceden filtre .....	39
5.2. Seri Aktif Filtre .....	39
5.3. Paralel Hibrit Filtre .....	41
5.4. Karma Aktif Filtre (Seri-Paralel Aktif Filtre) .....	44
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>48</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>50</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>54</b>

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 5.1.</b> DA iletim hattı parametreleri .....	38
<b>Tablo 6.1.</b> Uygulanan filtre türleri için THD ve temel bileşenlerin karşılaştırması .....	49

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1.</b> AA ve DA iletim hatlarında maliyet karşılaştırması .....	11
<b>Şekil 2.2.</b> AA ve DA havai hatlarının güç iletim kapasitelerinin karşılaştırması.....	12
<b>Şekil 2.3.</b> Tek kutuplu YGDA iletim sisteminin DA eşdeğer devresi.....	12
<b>Şekil 2.4.</b> Sırt-sırta dönüştürücülere sahip iletim sistemi .....	13
<b>Şekil 2.5.</b> Tek kutuplu toprak geri dönüşlü devre.....	14
<b>Şekil 2.6.</b> Tek kutuplu metal geri dönüşlü devre .....	14
<b>Şekil 2.7.</b> Çift kutuplu normal devre .....	15
<b>Şekil 2.8.</b> Tek kutuplu çalışma için özel metal geri dönüş yollu çift kutuplu devre .....	15
<b>Şekil 2.9.</b> Tek kutuplu çalışma için özel geri dönüş yolu olmadan çift kutuplu devre...	16
<b>Şekil 3.1.</b> Harmonikli bir dalga .....	17
<b>Şekil 4.1.</b> Aktif filtreler ile harmoniklerin yok edilmesi .....	23
<b>Şekil 4.2.</b> Aktif filtrenin yapısı .....	24
<b>Şekil 4.3.</b> Histerezis akım kontrolü .....	28
<b>Şekil 4.4.</b> Histerezis akım kontrol simülasyon diyagramı .....	28
<b>Şekil 4.5.</b> Üçgen dalga metodu .....	29
<b>Şekil 4.6.</b> Üç fazlı tam köprü gerilim beslemeli inverter.....	30
<b>Şekil 4.7.</b> Üç fazlı tam köprü akım beslemeli inverter .....	30
<b>Şekil 4.8.</b> Paralel aktif filtre.....	31
<b>Şekil 4.9.</b> Seri aktif filtre .....	32
<b>Şekil 4.10.</b> Hibrit filtre.....	32
<b>Şekil 5.1.</b> Filtresiz YGDA iletim sistemi modeli.....	34
<b>Şekil 5.2.</b> Filtresiz yük gerilimi .....	35
<b>Şekil 5.3.</b> Filtresiz yük akımı.....	35
<b>Şekil 5.4.</b> Filtresiz yük gerilimi harmonikleri.....	36
<b>Şekil 5.5.</b> Filtresiz yük akımı harmonikleri .....	36
<b>Şekil 5.6.</b> Senkronize 12-darbeli üreteç.....	37
<b>Şekil 5.7.</b> Üreteç darbe sıralaması .....	37
<b>Şekil 5.8.</b> Güç dönüştürücü bloğu .....	38
<b>Şekil 5.9.</b> Filtre bloğu .....	39
<b>Şekil 5.10.</b> Seri aktif filtre kontrol sistemi.....	39
<b>Şekil 5.11.</b> Seri aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli .....	40
<b>Şekil 5.12.</b> Seri aktif filtreli durumda yük gerilimi .....	40
<b>Şekil 5.13.</b> Seri aktif filtreli durumda yük akımı .....	40
<b>Şekil 5.14.</b> Seri aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri.....	41

<b>Şekil 5.15.</b> Seri aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri .....	41
<b>Şekil 5.16.</b> Paralel aktif filtre kontrol sistemi .....	42
<b>Şekil 5.17.</b> Paralel aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli .....	42
<b>Şekil 5.18.</b> Paralel aktif filtreli durumda yük gerilimi.....	42
<b>Şekil 5.19.</b> Paralel aktif filtreli durumda yük akımı .....	43
<b>Şekil 5.20.</b> Paralel aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri .....	43
<b>Şekil 5.21.</b> Paralel aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri.....	44
<b>Şekil 5.22.</b> Karma aktif filtreli YGDA iletim sistemi modeli .....	44
<b>Şekil 5.23.</b> Karma aktif filtreli durumda yük gerilimi .....	45
<b>Şekil 5.24.</b> Karma aktif filtreli durumda yük akımı .....	45
<b>Şekil 5.25.</b> Karma aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri .....	46
<b>Şekil 5.26.</b> Karma aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri.....	46
<b>Şekil 5.27.</b> Karma aktif filtre modelinde seri filtrenin enjekte gerilimi .....	47
<b>Şekil 5.28.</b> Karma aktif filtre modelinde paralel filtrenin enjekte akımı.....	47



## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
<b>THD</b>	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
<b>GF</b>	: Güç Faktörü
<b>TTD</b>	: Toplam Talep Distorsiyonu
<b>YGDA</b>	: Yüksek Gerilimli Doğru Akım
<b>OGDA</b>	: Orta Gerilimli Doğru Akım
<b>AGDA</b>	: Alçak Gerilimli Doğru Akım
<b>ADF</b>	: Aktif Doğru Akım Filtresi
<b>HADF</b>	: Hibrit Aktif Doğru Akım Filtresi
<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları
<b>BJT</b>	: Çift Birleşim Yüzeyle Transistör
<b>GTO</b>	: Kapıdan Söndürmeli Tristör
<b>IGBT</b>	: Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör
<b>JFET</b>	: Birleşim Yüzeyle Alan Etkili Transistör
<b>MOSFET</b>	: Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör
<b>FFT</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>DSP</b>	: Sayısal Sinyal İşleme
<b>PWM</b>	: Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>PAF</b>	: Paralel Aktif Filtre
<b>SAF</b>	: Seri Aktif Filtre

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
<b><math>\delta</math></b>	: Ayar sapma faktörü
<b>P</b>	: Aktif Güç
<b>Q</b>	: Reaktif Güç
<b>D</b>	: Distorsiyon Gücü



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## YÜKSEK GERİLİMLİ DOĞRU AKIM İLETİM SİSTEMLERİ İÇİN BİR AKTİF DOĞRU AKIM FİLTRESİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

**Murat AKDEMİR**

**Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman : Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM**

**İkinci Danışman : Doç. Dr. Naci GENÇ**

**2015, 54 Sayfa**

Bu tezde, tek kutuplu bir Yüksek Gerilimli Doğru Akım (YGDA) iletim sistemi modeli oluşturulmuştur. Bu YGDA iletim sisteminde dönüştürücülerden ve yüklerden kaynaklanan harmonikleri bastırmak için seri, paralel ve seri-paralel aktif doğru akım filtre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu filtrelerin kullanıldığı YGDA iletim sisteminin simülasyonları MATLAB Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Bu iletim sistemi modelinde filtresiz ve filtreli durumlar için yük akımının ve geriliminin dalga şekilleri ile toplam harmonik distorsiyonu (THD) değerleri elde edilmiştir. YGDA iletim sisteminde kullanılan aktif doğru akım filtreleriyle yük gerilimindeki ve akımındaki harmonikler büyük oranda bastırılmıştır. Ayrıca bu akım ve gerilimler için THD değerleri %5'in oldukça altında elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, tasarlanan aktif doğru akım filtrelerinin basit bir yapıya sahip olması ve kontrolünün fazla karmaşık olmaması önemli avantajlar sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif doğru akım filtresi, harmonikler, YGDA

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **DESIGN AND SIMULATION OF AN ACTIVE DC FILTER FOR HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS**

**Murat AKDEMİR**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Siirt University  
The Degree of Master of Science  
in Electrical-Electronics Engineering**

**Supervisor : Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM**

**Co-Supervisor : Doç. Dr. Naci GENÇ**

**2015, 54 Pages**

In this thesis, a monopolar High Voltage Direct Current (HVDC) transmission system model is formed. Series, parallel and series-parallel active direct current filter designs were carried out to suppress harmonics caused by the load and converters in this HVDC transmission system. Simulations of the designed HVDC transmission system using these filter was carried out in MATLAB Simulink. Waveforms and total harmonic distortion (THD) values of load current and voltage were obtained in this transmission system model for filtered and unfiltered conditions. Harmonics in the load voltage and current was suppressed to a large extent by active direct current filter used in the HVDC transmission system. Furthermore, THD values for current and voltage were obtained significantly below 5%. According to these results, designed active direct current filters which have simple structure and not complex controller offer significant advantages.

**Keywords:** Active direct current filter, harmonics, HVDC

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi insanoğlunun günlük yaşantısında çok önemli bir yere sahiptir. Enerji kesintilerinin olduğu zamanlarda hayat durma noktasına gelmektedir. Elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan firmaların temel amacı tüketicilere sürekli, ucuz ve kaliteli bir güç sağlamaktır. Güç kalitesi ile ifade edilmek istenen amaç; sürekli, sabit şebeke frekansında, sabit ve sinüzoidal biçimli tüketici akım ve gerilimidir. Böyle bir enerjiyi sağlayabilmek ancak bir takım gerekli çalışmalarla mümkün olabilir (Erdoğan, 2001).

Güç kalitesinde problemlere yol açan genel etmenler gerilim veya akımdaki anlık artış veya azalış, aşırı gerilimden ya da düşük gerilimden kaynaklanan uzun süreli değişimler, kısa süreli gerilim değişimleri, gerilim dengesizliği (Uyar, 2008), ve güç sistemine bağlı bazı elemanlar ve bunların etkilerinden dolayı sistemdeki gerilim ve akımın sinüs dalga formundan uzaklaşmasıdır (Erdoğan, 2001). Sinüs dalga bozuklukları ise doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentik ve gürültüdür (Uyar, 2008). Bu problemler arasında harmonikler iletim sistemleri için ayrı bir yer tutar.

Yarı iletken elemanların yapısı gereği ve sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları vb.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara harmonik denir (Erkan, 1996).

Yüksek gerilimli doğru akım (YGDA) dönüştürücüler, alternatif akım (AA) ile doğru akım (DA) arasındaki dönüşüm işlemleri esnasında harmonikleri üretirler. Bu harmonikler hem AA hem de DA iletim hatlarına bulaşır. Sisteme bulaşan harmonikler sistemde arızaya ve hat çevresindeki telefon kablolarında elektromanyetik etkileşime neden olurlar. Oluşabilecek zararları engellemek için kabul edilebilir bir bozulma seviyesi belirlenmiştir ve bu seviyeye de ancak harmonik filtrelerin kurulmasıyla ulaşılabilir (Zhang ve Asplund, 1994). AA tarafında harmoniklerin bastırılması için birçok aktif filtre tasarım ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Saad ve Zellouma (2009) tarafından yapılan çalışmada, reaktif güç kompanzasyonu sağlamak ve harmonikleri bastırmak için 3 seviyeli bir darbe genişlik modülasyonlu (PWM) inverter devre tasarlanmıştır. Referans akımlar senkronize

referans çerçeve yöntemiyle elde edilirken, harmonik akımlar ve inverter DA gerilim kontrolü için bulanık mantık kontrol algoritması önerilmiştir.

Ucar ve ark. (2010)'ı tarafından yapılan çalışmada, 3 fazlı bir sistem için biri seri ve diğeri paralel olmak üzere iki tane aktif filtre beraber kullanılarak harmonik bastırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Referans akımlar “aktif olmayan güç teorisi” ile elde edilirken, inverter DA gerilimi PI metodu ile kontrol edilmiştir. Seri aktif filtre (SAF)'de kapı sinyalleri PWM ile paralel aktif filtre (PAF)'de ise histerezis kontrol metodu ile elde edilmiştir.

Wang ve ark. (2010)'ı tarafından yapılan çalışmada, tasarlanan aktif filtrenin kontrolü için inverter DA gerilimi iki adet bulanık mantık kontrolörüyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, kontrolörün eski kontrol tasarımlarına nazaran hem sistemin daha hızlı yanıt verdiğini hem de statik hatayı ve aşırı gerilimi daha çok düşürdüğü görülmüştür.

El-Mamlouk ve ark. (2011)'ı tarafından yapılan çalışmada, tek faz yarım dalga köprü, inverter gerilim kaynağı kullanılarak aktif filtre tasarlanmıştır. Akım ve gerilim harmoniklerini temel bileşenlerinden ayırmak için biri gerilim biri akım olmak üzere iki adet çok katmanlı yapay sinir ağları kullanılmıştır. Elde edilen harmonikler çoklu kapalı döngü geri beslemeli kontrolörden geçirilerek PWM'ye iletilmiş ve kapı sinyalleri üretilmiştir.

Chennai Salim ve ark. (2011)'ı tarafından yapılan çalışmada, bulanık mantıkla kontrol edilen çok seviyeli invertere sahip bir aktif filtre tasarlanmıştır. Referans sinyaller senkronize referans çerçeve yöntemiyle elde edilirken inverter DA gerilimi PI denetleyici ile kontrol edilmiştir.

Bhavsar ve Patel (2011) tarafından yapılan çalışmada, anlık güç teorisi ve PWM kullanılarak bir aktif filtre tasarımı gerçekleştirilmiş ve PSIM programında derlenmiştir.

Rejil ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, referans akımların elde edilmesi için senkronize referans çerçeve yöntemi kullanılarak 3 fazlı bir seri aktif filtre tasarlanmıştır. Kapı sinyalleri histerezis bant akım kontrolörü yardımıyla elde edilmiştir.

Chaturvedi ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, referans akımlar anlık güç teorisi ile, inverterin DA tarafı PI metodu ile ve üç faz köprü doğrultucu tetikleme sinyalleri PWM kullanılarak Matlab-Simulink'te bir aktif filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Patel ve Panda (2014) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel inverter yerine bir dönüşümlü çalışan düşürücü inverter kullanılmıştır. Bu dönüştürücüyle geleneksel

inverter devrelerde var olan ölü zaman problemi ortadan kaldırılmıştır. Referans akımlar senkronize referans çerçeveyle, kapı sinyalleri histerezis metoduyla ve DA gerilimi bulanık mantık ile kontrol edilmiştir.

Sangeetha ve Geetha (2014) tarafından yapılan çalışmada, akıllı şebeke uygulamaları için çok seviyeli inverter devreye sahip bir aktif filtre tasarlanmıştır. İnverter DA geriliminin kontrolünde bulanık mantık ve PI kontrolörü beraber kullanılmıştır. Referans akımlar senkronize referans çerçeve ile elde edilirken kapı sinyalleri PWM ile elde edilmiştir.

Benchouia ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, tasarlanan aktif filtrede referans akımlar, transfer fonksiyonlu bir filtrenin senkronize referans çerçeve metoduna eklenmesinden oluşan bir kontrol metodu ile bulunmuştur. İnverter DA geriliminin kontrolünde kayma mod kontrol ile PI kontrolü karşılaştırılmıştır.

Mathiyalagan ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, lineer olmayan yükler için bir aktif filtre modelleme ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Referans akımlar yapay sinir ağları ile, inverter DA geriliminin kontrolü PI ile, kapı sinyalleri histerezis akım kontrol metodu ile elde edilmiştir. Anahtarlama elemanları olarak MOSFET'ler ve lineer olmayan yük olarak RL yüklü kontrollü köprü doğrultucu kullanılmıştır.

Mahajan ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, çok katmanlı harmonik filtreler için yapay zeka tabanlı kontrolör tasarlanmıştır. Bu tasarımda, referans akımları elde etmek için YSA tabanlı anlık güç teorisi kullanılmıştır. İnverter DA geriliminin düzenlenmesinde ve hata akımlarının kompanzasyonunda iki adet bulanık mantık kontrolörü kullanılmıştır. Bulanık mantık tabanlı hata akımı, çoklu taşıyıcı faz kaydırmalı PWM'ye iletilerek 5 seviyeli inverter devre için kapı sinyalleri üretilmiştir.

Mulla ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, dengesiz kaynak koşulları altında çalışan seri hibrit aktif güç filtresi için referans akımlar elde edilirken aktif ve aktif olmayan güç teorisi kullanılmıştır. Aktif olmayan güç ikinci dereceden bir tensöre sokulmuştur. Ardından PWM ile kapı sinyalleri elde edilmiştir.

Benchouia ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, seri aktif güç filtresinin inverter DA gerilimini düzenlemek için uyarlamalı bulanık mantık metodu ile PI metodu karşılaştırılmıştır. Referans akımlar, transfer fonksiyonlu bir filtrenin senkronize referans çerçeve metoduna eklenmesinden oluşan bir kontrol metodu ile bulunmuştur. Tetikleme sinyalleri histerezis akım kontrol metodu ile elde edilmiştir.

YGDA dönüştürücüler ve lineer olmayan yüklerden dolayı DA iletim hattına da harmonikler bulaşır. İletim hattının DA tarafında harmoniklerin iletim sistemine ve bileşenlerine zarar vermemesi için süzülmesi gerekir. Bu harmoniklerin süzülmesi için kullanılan aktif doğru akım filtreleri (ADF) konusunda da bazı çalışmalar yapılmıştır.

1989 yılında yapılmış olan bir çalışmada, aktif filtre ile pasif filtre maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Aktif filtre için akım kaynağı olarak 4 adet elektronik anahtar ve bu anahtarlara paralel diyotlarla oluşturulan tam köprü PWM inverter kullanılmıştır. Bu inverter devreye sabit gerilim uygulanmıştır. Aktif filtre için elde edilen sonuçların maliyet açısından daha elverişli olduğu gözlenmiştir. Uygulanan aktif filtre tüm harmonikleri yok etmek için değil sadece 12., 24. ve 36. harmonikleri yok etmek için uygulanmıştır (Wong ve ark., 1989). Kontrolörün kararlılığı düşük ve uzun entegrasyon zamanı gerektirdiği için sistem cevabı çok yavaştır (Xiao ve Zhang, 2000).

1993 yılında Konti-Skan YGDA iletim hattı (İsveç-Danimarka) için kurulmuş bir aktif DA filtresi tanıtılmıştır. Bu aktif filtre, var olan pasif filtreye seri olarak bağlanmıştır. Optik harmonik akım ölçüm birimi, koruma ve denetim sistemi, PWM güç yükseltici, yüksek frekanslı transformatör, parafudr ve bağlantı araçları kullanılmıştır (Zhang ve ark., 1993).

1994 yılında Konti-Skan 2 YGDA hattı için yeni bir aktif filtre tasarlanmıştır. Harmonikli akım bir transdüser yardımıyla ölçülmüş ve ölçülen sinyaller, fiber optik kablolar ile DSP tabanlı kontrol sistemine aktarılmıştır. Kontrol sisteminden çıkan sinyaller PWM güç yükselticine gönderilmiş ve ardından transformatör, parafudr ve bypass anahtarlar üzerinden sisteme paralel olarak bağlı olan pasif filtreye seri olarak bağlanmıştır (Zhang ve Asplund, 1994).

1998 yılında yapılan çalışmada doğrultucunun AA tarafına paralel bir filtre ve DA tarafına seri bir filtre olmak üzere iki aktif filtre önerilmiştir. Bu filtrelerin DA hatları ortak olarak bağlanmıştır. AA filtresinin kontrolü için anlık gerçek ve imajiner güç teorisi kullanılırken, DA filtresi için yüksek geçiren filtre kullanılmıştır. Sayısal simülasyon sonuçları EMTP programı kullanılarak elde edilmiştir (Barbosa ve ark., 1998). Ancak bu çalışmada kullanılan seri ADF inverter anahtarlar tüm yük akımlarını ilettikleri için kayıplar artar ve sistemin verimi azalır (Ahmed ve ark., 2010).

2000 yılında bir YGDA sistemine çentik filtre kontrollü aktif DA filtresi uygulanmıştır. Kontrol; iletim akımının geri beslemesi ile elde edilmiştir. Çentik filtre kontrolörünün tasarımı tartışılmış ve önerilen kontrol tasarımının kararlılık ve duyarlılık

analizi yapılmıştır (Xiao ve Zhang, 2000). Çentik filtre tabanlı tasarımlar güç sistem frekanslarındaki sapmalara çok duyarlıdır (Chunlian ve ark., 2002).

Zhang ve ark. (1993), Zhang ve Asplund (1994), Barbosa ve ark. (1998), Xiao ve Zhang (2000) tarafından tasarlanan aktif filtre kontrolörleri birçok teorik hesaplama içermekte ve sistem transfer fonksiyonlarına dayandıkları için harmonik bastırma etkileri devre modelinin kesinliğine göre değişir (Hao ve Zhanji, 2008).

2002 yılında yapılan bir çalışmada harmoniklerin elde edilmesi için iki yeni yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler iyileştirilmiş uyarlamalı gürültü yok etme teorisi ve ortalama değer filtreleme teorisidir (Chunlian ve ark., 2002). Bu çalışmada geliştirilen bu algoritmalar DSP kullanılarak belirli harmoniklerin çıkarılması için uygulanmıştır. Ayrıca birçok teorik hesaplama gereklidir.

2000 yılında yapılan başka bir çalışmada, alçak geçiren filtre ile elde edilen harmonikler ters fazda yükseltilmiş, ardından filtre akımı ile karşılaştırılarak PWM tekniği ile üretilen sinyaller tek faz IGBT'lerden oluşan köprü inverter devreye uygulanarak filtre akımları elde edilmiştir (Xiao ve ark., 2000). Tasarlanan kontrolör devre yapısından ve parametrelerinden bağımsızdır. Yükseltme, yani kazanç değeri sıfırdan başlayarak artırılarak harmonikler bastırılmıştır. Kazanç değeri eşik değerini aşarsa filtreleme kötüye gider ve sistem kararsız hale gelir (Hao ve Zhanji, 2008).

2004 yılında yapılan bir çalışmada DSP teknolojisi kullanmış, filtre kontrolörüne ileri beslemeye ek olarak sistemdeki ani değişikliklere ve gürültülere duyarsız olması için bir geri besleme eklenmiştir (Dongyuan ve ark., 2004). Bu çalışmada kullanılan kontrolör sistemi transfer fonksiyonlarına dayanır ve birçok hesaplama gerektirir.

2004 yılında yapılan bir çalışmada yüksek frekanslı harmoniklerin süzülmesi için yüksek anahtarlama frekansına sahip çok darbeli sinyal genişlik modülasyonu ile çalışan bir inverter tasarlanmıştır (Dongyuan ve ark., 2004). 36 ve 48. harmonik bileşenler için iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada da kontrolör transfer fonksiyonlarına dayanır.

2008 yılında yapılan bir çalışmada, akım harmoniklerini yok etmek için sisteme kompanzasyon akımlarını enjekte eden paralel aktif bir filtre tasarlanmıştır. Devre parametrelerinden bağımsız yüksek kazançlı geri beslemeli kontrol yöntemi önerilmiştir. Pasif filtre ile ADF'nin harmonik bastırma etkileri karşılaştırılmış ve ADF'nin hibrit filtrenin seri empedansını artırabileceği ve pasif filtrenin eşdeğer gerilimi düşürebileceği gözlemlenmiştir (Hao ve Zhanji, 2008). Önerilen yöntem DA

iletim hattı akımına, parametrelerine ve anahtarlama frekansına göre değişir (Nowdeh ve ark., 2013).

2010 yılında yapılan bir çalışmada, dönüştürücünün DA tarafındaki çıkış gerilim harmoniklerini bastırmak için 6 darbeli bir ADF tasarlanmıştır. Düşük dalgalanma faktörüne sahip yük gerilimini elde etmek için yüke seri bir bobin bağlanmıştır. Kompanzasyon akımı bobin üzerinde gerekli gerilim harmoniklerini üretecek şekilde kontrol edilmiştir. Yük gerilimi dalgalanma faktörü %28'den %5'e ve 6. harmonik bileşen %32.3'ten %5.6'ya düşürülmüştür (Ahmed ve ark., 2010).

2011 yılında yapılan bir çalışmada YGDA sistemindeki harmoniklerin bastırılması için modifiye edilmiş bir kontrol metodu önerilmiştir. Bu metot YGDA parametrelerinden bağımsız ve basit bir yapıya sahiptir. Hao ve Zanji (2008)'nin çalışmasında yer alan G yüksek kazanç ortadan kaldırılmış ve F(s) filtresi daha basit bir yapıya indirilmiştir. Anahtarlama gürültü genliği sabit tutulmuş ve dolayısıyla sistemdeki anahtarlama gürültüsünün büyümesi ve bu gürültünün etkisi problemi ortadan kaldırılmıştır (Hajibeigy ve ark., 2011).

2012 yılında yapılan bir çalışmada Hajibeigy ve ark. (2011) tarafından verilen geleneksel hibrit aktif doğru akım filtreleri (HADF) konfigürasyonu modifiye edilmiştir. Bu modifikasyonla beraber, pasif elementlerin uygun seçilmesiyle HADF'nin aktif kısmının anma gücü ayarlanabilir hale getirilmiştir. Anma gücünün düşürülmesi, bağlantı transformatörünün kaldırılması, Hajibeigy ve ark. (2011) tarafından verilen HADF tasarımının karışıklılığının azaltılması bu tasarımın avantajları arasında yer alır (Hajibeigy ve ark., 2012).

2013 yılında yapılan bir çalışmada Hao ve Zanji (2008) tarafından önerilen metot ve HADF aktif kısım konfigürasyonunda yapılan birkaç iyileştirme ile yeni bir metot önerilmiştir. Önerilen metodun yapısı ve işlevi DA iletim hattına, parametrelerine, akımına ve anahtarlama frekansına bağlı değildir (Nowdeh ve ark., 2013).

2011 yılında yapılan bir çalışmada 12 darbeli tristör köprü konfigürasyonuna sahip orta gerilimli doğru akım (OGDA) sistemi için bir ADF önerilmiştir. Önerilen ADF, DA hat dalgalanmalarını giderirken aynı zamanda tüm sistem sönümlenmesini iyileştirmiştir. Önerilen metot ile geçici yüklerden kaynaklanan DA hata geriliminin filtreyi hatta seri bağlayan transformatörü doyuma sokmamasından emin olunur ve harmonikler bastırılır. Ayrıca sınırlı anahtarlama frekansı, sınırlı bant aralığı, uygunsuz anahtarlama ve ölü zaman etkisi gibi donanımsal kısıtlamalardan dolayı tüm



harmonikler sisteme enjekte edilemediği için bu kontrolör ile üretilen referans sinyal ile harmonikler belli frekanslara kadar sisteme enjekte edilir. Seri DAF kontrolörler temelde açık-devre ileri-besleme kontrolör yapısına sahiptir. Basit ve çok iyi bir kararlılık sınırlarına sahip olmalarına rağmen sistem parametreleri değiştiği zaman ya da farklı yük koşulları altında görevlerini yerine getiremeyebilirler (Mirzaee ve ark., 2011).

2013 yılında yapılan bir çalışmada, bir OGDA iletim sistemi için hem akım ve gerilim geri besleme hem de ileri besleme kontrolörüne sahip yeni birçok döngülü kontrol sistemi önerilmiştir. İlgilenilen frekanslarda, frekans tanım kümesi analizi ve simülasyonlar ile önerilen kontrolörün dalgalanma genliğini daha çok bastırdığı ve daha iyi harmonik kompanzasyon sağladığı görülmüştür (Mirzaee ve ark., 2013).

Bu tez çalışmasında, tek kutuplu bir YGDA iletim sistemi modeli oluşturularak, bu iletim sisteminde dönüştürücülerden ve yüklerden kaynaklanan harmonikleri bastırmak için aktif doğru akım filtre tasarımları gerçekleştirilecektir. Daha sonra MATLAB Simulink'te bu filtrelerin kullanıldığı YGDA iletim sisteminin simülasyonları yapılarak gerilim ve akımın THD değerleri iyileştirilecektir.

## 2. YÜKSEK GERİLİMLİ DOĞRU AKIM (YGDA) İLE ENERJİ İLETİMİ

### 2.1. Genel Bilgi

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı doğru akım ile başlamıştır. 1882 yılında, Almanya'da Miesbach ile Münih arasında 50 km uzunluğunda 2 kV'luk gerilime sahip bir DA hattı inşa edilmiştir. O zamanlar, yüksek DA iletim gerilimi ile uygun tüketici gerilimi arasındaki dönüşümler ancak dönen DA makineleri ile gerçekleştirilebiliyordu.

AA sistemlerde gerilim dönüşümleri basittir. AA ile çalışan bir transformatör, yüksek güç seviyeleri ile yüksek yalıtım seviyelerinin aynı birim içinde yer almasına elverişlidir ve düşük kayıplara sahiptir. Oldukça basit bir elemandır ve az bakım gerektirir. Ayrıca, üç fazlı senkron generatörler her açıdan DA generatörlerine göre daha üstündürler. Bu nedenlerden dolayı, AA teknolojisi elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımı için tek uygun teknik olarak görülmüştür. Halbuki, yüksek gerilimli AA iletim hatlarının DA ile iletme göre bazı dezavantajları vardır:

- Havai hatların ve kabloların indüktif ve kapasitif bileşenleri iletim kapasitesini ve AA iletim hatlarının iletim mesafesini sınırlar.
- Bu sınırlama, kablolar için özel bir öneme sahiptir. Gerekli iletim kapasitesine, sistem frekansına ve kayıp değerlendirmesine bağlı olarak AA kabloların ulaşabileceği iletim mesafesi 40 km ile 100 km arasında olabilir. Bu mesafe daha çok şarj akımları tarafından sınırlandırılır.
- Farklı frekanslara sahip iki AA sistem arasında doğrudan bağlantı mümkün değildir.
- Aynı frekansa sahip iki AA sistem arasında ya da enterkonnekte şebekeye yeni bir bağlantı, sistem kararsızlığından, çok yüksek kısa devre akım seviyelerinden ya da istenmeyen güç akış senaryolarından dolayı imkansız olabilir.

Özellikle yüksek gerilim dayanıklılığına sahip IGBT'lerin gelişimi ile yüksek gerilim ve akım dayanıklılığına sahip tristörlerin gelişmesi YGDA iletim sistemi uygulamalarını hızlandırmıştır (Siemens, 2015).

## **2.2. Avantajları**

### **2.2.1. Uzak mesafe güç iletimi**

Uzak mesafelere büyük oranda güç iletildiği zaman DA ile iletim her zaman düşünülmeli gereken bir alternatiftir. Çünkü AA ile iletim birçok nedenden dolayı kısıtlanır. AA ile iletimde beklenen yük seviyeleri ve iletim mesafesi boyunca gerilim önemli ölçüde düşer. Ayrıca kararlılığın, diğer bir deyişle sistemde bir arızadan sonra hem geçici olarak hem de dinamik bir şekilde iletim boyunca senkronizasyon işlemlerinin sürdürülmesi gerekir.

DA hattı AA hatlara göre daha az iletken, daha az yer ve daha az çıkıntılı kuleler gerektirir. Bir AA hattı sistem kararlılığı ya da termal kapasitesinden dolayı sınıra ulaşırsa ve paralel bağlantı eklemek de mümkün değilse hattı DA hattına çevirmek mümkün olabilir. Kule genişliğini ve yerini değiştirmeden sadece kule baş konfigürasyonun değiştirilmesiyle var olan AA hattına DA uygulayarak, hattın AA kapasitesinin üç katı kadar kapasite ile iletim yapmak mümkündür. Hatta AA ve DA hatlarının aynı kulede çalışması da mümkündür, fakat henüz böyle bir çalışma yapılmamıştır.

Ayrıca DA hattı boyunca reaktif güç iletmediği için, DA hattı kısa devre akım seviyesini artırmadan aktif güç alışverişini artırmak için bir yol sağlar (Kim ve ark., 2009).

### **2.2.2. Uzun mesafe su geçişleri**

Denizaltı bağlantıları için, mesafe arttıkça AA kablolar güç akışıyla beraber gerilimin büyük oranda değişimine yol açar ve kablo kapasitesi tam yüklenene kadar devam eder (Kim ve ark., 2009). Dolayısıyla reaktif güç akışı olası maksimum iletim mesafesini kısıtlar. Kablonun ara kısımlarında da kompanzasyon birimi kurulmadığı için kablounun maksimum pratik uzunluğu sınırlıdır ve düşüktür. Aksine DA hatta böyle bir sınırlama yoktur (Kim ve ark., 2009). Bugün Kuzey Norveç'ten Hollanda'ya Kuzey Deniz üzerinden yaklaşık 580 km uzunlukta DA denizaltı kablosu uzanmaktadır (ABB, 2015).

### **2.2.3. Asenkron şebekeler**

Birçok YGDA iletim hatları senkronize olmayan AA hatları birbirine bağlarlar. AA hatlar birbirine bağlandıkları zaman senkronize olmak zorundadırlar. Yani aynı gerilim ve frekansta çalışmalıdırlar. YGDA sistemi asenkron olduğu için herhangi bir anma gerilim ve frekansa sahip alıcıya uyum sağlayabilir. Bu yüzden YGDA dünyanın birçok yerinde büyük AA sistemleri bağlamak için kullanılır. Bugün İskandinavya ile Batı Avrupa arasında, Doğu Amerika ile Batı Amerika arasında, Japonya ve Güney Amerika'da birçok senkronize olmayan hat YGDA hatları ile bağlanmıştır (ABB, 2015).

### **2.2.4. Kontrol edilebilirlik**

YGDA teknolojisinin temel avantajı, hattaki aktif gücün kontrol edilebilmesidir. Çoğu YGDA hatlarında ana kontrol sabit güç transferine dayanmaktadır. Birçok durumda bir YGDA hattı, ilave kontrol olanakları yardımıyla AA güç sistemlerinin performansını da düzeltebilir. Normalde belirli kriterler yerine getirildiğinde bu kontroller otomatik olarak aktifleştirilir. Otomatik YGDA kontrol fonksiyonları, sabit frekans kontrolü, AA şebekelerindeki güç akışının yeniden düzenlenmesi ve AA şebekelerindeki güç salınımlarının sönmülendirilmesi gibi birçok fonksiyonu içerir.

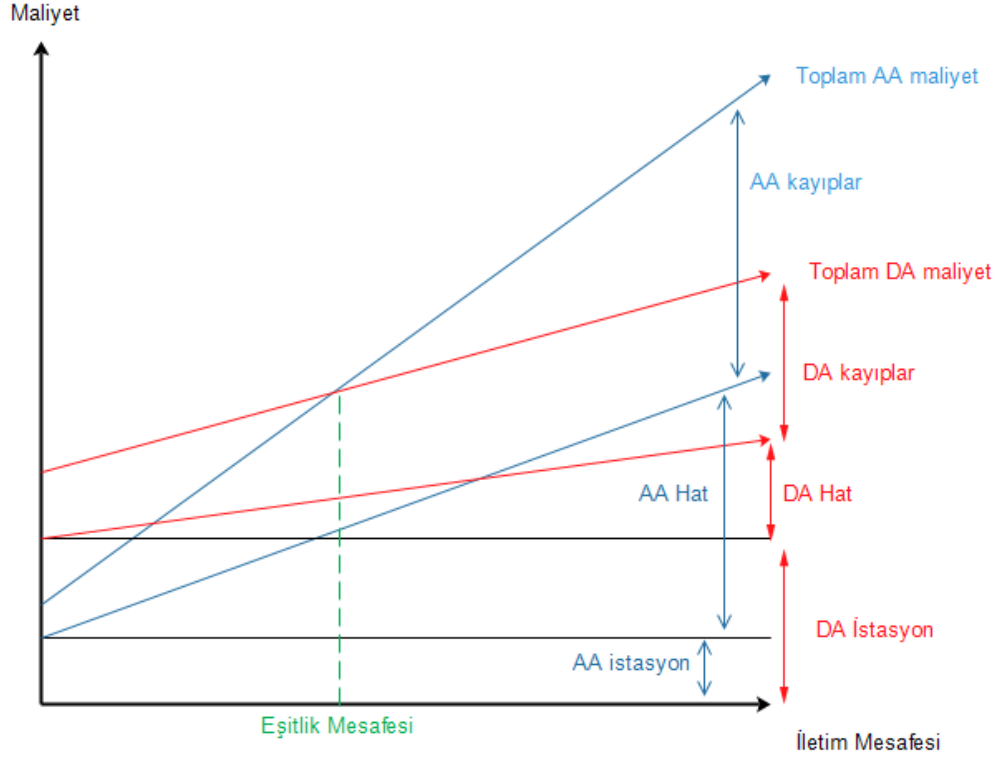
İlave kontrol fonksiyonların olduğu durumlar kararlılığın kısıtlandığı AA iletim hatlarında güç iletim kapasitesindeki güvenli artışı mümkün kılar (ABB, 2015).

Bir YGDA iletim hattı herhangi bir değerdeki gerilim ve frekansa sahip iki AA sistemi birbirine bağlar. Ayrıca YGDA iletim hattı gerilim kontrolü için de kullanılabilir (Kim ve ark., 2009).

Kontrol sistemleri için güç tristörlerinde ve mikroişlemcilerde kullanılan bugünkü ileri yarı iletken teknolojisi, YGDA iletim sistemlerinde neredeyse sınırsız kontrol imkanları sağlar. Çeşitli yazılım programları bu kontrol seçeneklerini destekleyen farklı çalışmalar için kullanılmaktadır (ABB, 2015).

### **2.2.5. Ekonomik değerlendirme**

Verilen bir iletim görevi için, bir YGAA veya YGDA sisteminin hangisinin uygulanacağına ilişkin nihai karar öncesinde fizibilite çalışmaları yapılır. Şekil 2.1, AA ve DA iletim arasında istasyon terminal maliyetleri, hat maliyetleri ve kayıpların sermayelendirilmiş değeri için tipik bir maliyet karşılaştırma eğrisini göstermektedir.



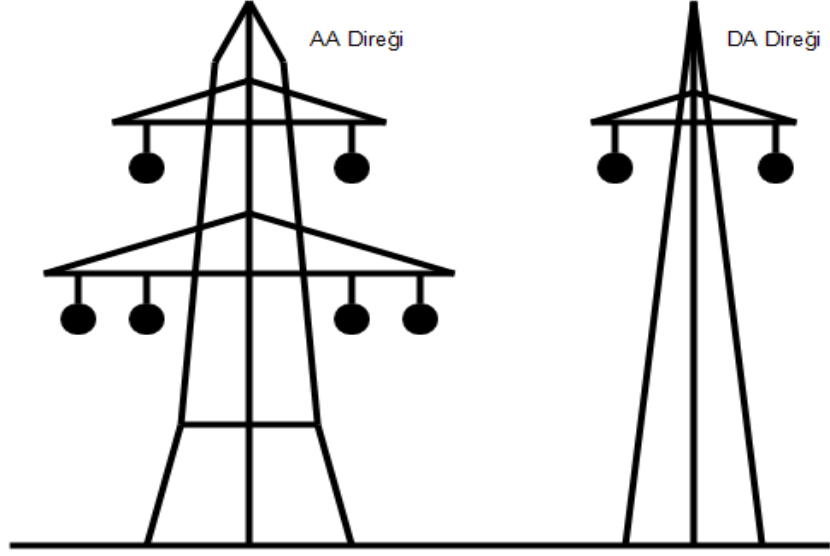
Şekil 2.1. AA ve DA iletim hatlarında maliyet karşılaştırması

DA eğrisi km başına düşen oldukça düşük hat maliyetlerinden dolayı AA eğrisi kadar dik değildir. Uzun AA hatları için ara reaktif güç kompanzasyon maliyeti de hesaba katılmalıdır. Toplam maliyet açısından eşitlik mesafesi 500 ile 800 km arasında değişir ve bu nicelik ülkeye özgü maliyet unsurlarına, kayıp değerlendirmesine ve arazinin maliyeti gibi diğer faktörlere bağlıdır.

### 2.2.6. Çevre sorunları

Bir YGDA iletim sistemi temelde çevre dostudur. Çünkü geliştirilmiş enerji iletim olanakları mevcut güç santrallerinin daha verimli kullanımına katkıda bulunur. Bir YGDA havai iletim hattının arazi kaplama ve ilişkilendirilmiş arazi maliyeti bir AA hattı kadar yüksek değildir. Ayrıca var olan arazilerde güç iletim kapasitesinin artırılması da mümkündür.

AA ve DA havai hatlarına ait direklerin karşılaştırılması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



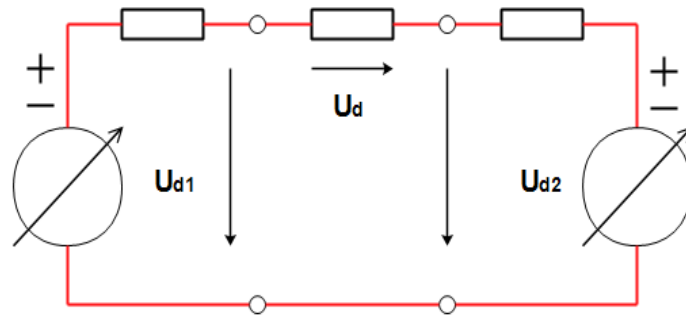
Şekil 2.2. AA ve DA havai hatlarının güç iletim kapasitelerinin karşılaştırması

Fakat dönüşüm istasyonları için düşünülmesi gereken bazı çevresel sorunlar vardır. Duyulabilir gürültü, görsel etki, elektromanyetik uyumluluk, tek kutuplu çalışmada toprak ya da deniz dönüş yolunun kullanılması en önemli sorunlardır. Genel olarak bir YGDA iletim sisteminin herhangi bir çevreyle son derece uyumlu olduğu ve bugünün herhangi bir önemli çevre sorununa neden olmadan sisteme entegre edilebileceği söylenebilir.

## 2.3. YGDA İletim Sistemlerinin Ana Türleri

### 2.3.1. DA devresi

YGDA dönüştürücülerin başlıca türleri kendi DA devre düzenlemelerine göre seçilir. Şekil 2.3'teki eşdeğer devre, tek kutuplu YGDA iletim sisteminin DA devresinin basitleştirilmiş gösterimidir.

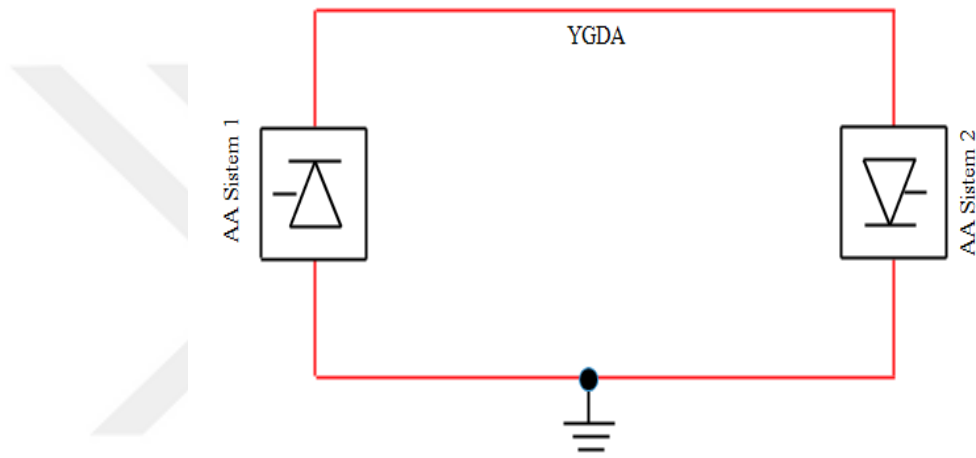


Şekil 2.3. Tek kutuplu YGDA iletim sisteminin DA eşdeğer devresi

Akım ve dolayısıyla güç akışı, kontrol edilen gerilimler arasındaki fark ile kontrol edilir. Akım yönü sabittir ve güç yönü gerilim polaritesi ile kontrol edilir.

### 2.3.2. Sırt-sırta dönüştürücüler

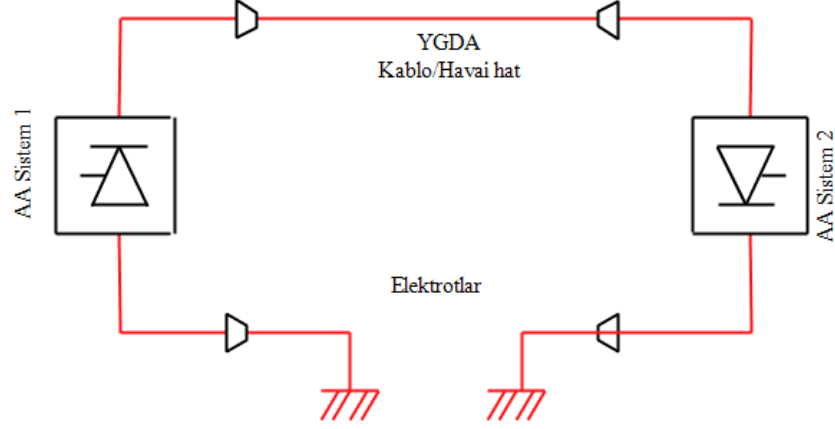
Sırt-sırta ifadesi doğrultucu ve inverterin aynı istasyonda yer aldığını belirtir. Sırt-sırta dönüştürücüler genellikle senkronize edilmeyen komşu iki AA şebeke arasında güç iletimi için kullanılır. Ayrıca tanımlanmış güç akışını sağlamak için bir enterkonnekte sistem içinde de kullanılabilir. Şekil 2.4'te bir sırt-sırta dönüştürücüye sahip iletim sistemi gösterilmiştir.



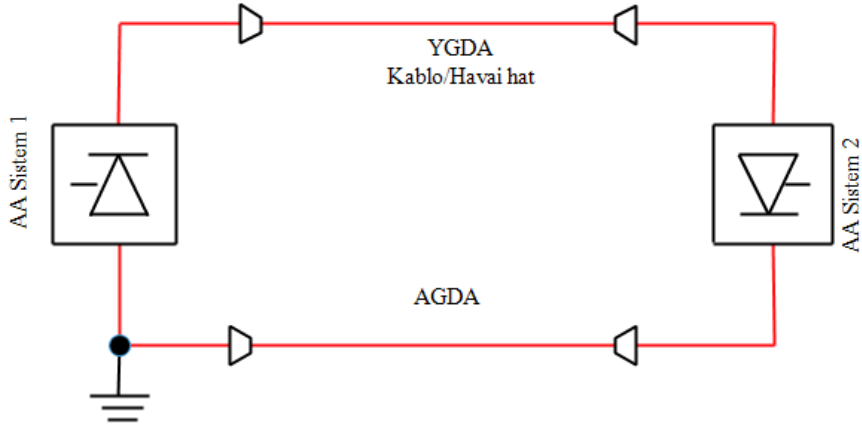
Şekil 2.4. Sırt-sırta dönüştürücülere sahip iletim sistemi

### 2.3.3. Tek kutuplu uzun mesafe iletim

Çok uzun mesafeler için ve özellikle çok uzun denizaltı kablolu iletimler için toprak ya da deniz elektrotlu bir geri dönüş yolu en uygun çözüm olabilir. Çoğu durumlarda mevcut altyapı ya da çevresel kısıtlamalar elektrotların kullanımını engeller. Böyle durumlarda kayıplar ve maliyetin artmasına rağmen bir metal geri dönüş yolu kullanılır. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sırasıyla tek kutuplu toprak geri dönüşlü ve metal geri dönüşlü iletim sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tek kutuplu toprak geri dönüşlü devre



Şekil 2.6. Tek kutuplu metal geri dönüşlü devre

#### 2.3.4. Çift kutuplu uzun mesafe iletimleri

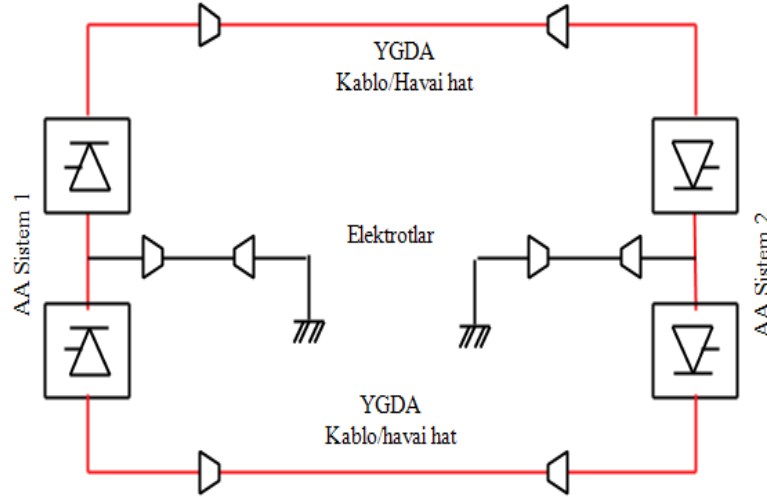
İki kutbun ortak bir düşük gerilim geri dönüş yolu oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşur ve bu yol sadece normal çalışma esnasında var olabilecek küçük dengesiz akımları taşır. Gerekli iletim kapasitesi tek kutbun iletim kapasitesini aşıyorsa bu konfigürasyon kullanılır. Ayrıca daha yüksek güç kullanılabilirliği ya da daha düşük yük atma gücü ihtiyacı söz konusu ise kapasiteyi iki kutba ayırmak gerekir. Bakım durumunda ya da bir kutbun kesildiği zamanlarda hala gücün bir kısmını iletmek mümkündür. İletim kapasitesinin %50'sinden fazlasından yararlanılabilir ve bu kapasite kalan kutbun aşırı yük kapasitesi ile sınırlandırılır. Çift kutuplu çözümün iki ayrı kutup kullanılarak elde edilen çözüme göre avantajı, kayıpların düşmesi ve dönüş yolsuz ya da bir geri dönüş yolu olması nedeniyle maliyetinin düşmesidir.

Temel dezavantajı, komşu bileşenlerle geri dönüş yolunun kullanılamamasının her iki kutbu da etkileyebilmesidir.



### 2.3.4.1. Toprak geri dönüş yollu çift kutuplu devre

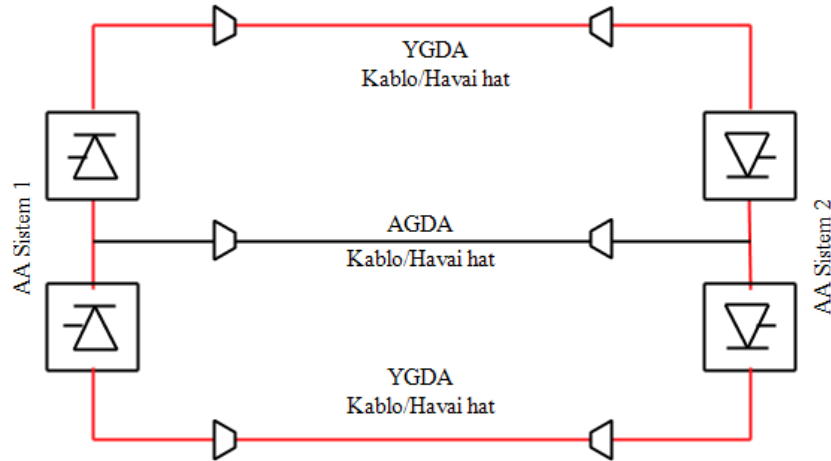
Bu genellikle çift kutuplu iletim sistemi için kullanılan konfigürasyondur. Bu çözüm, beklenmedik durum veya bakım esnasında azalan kapasite ile çalışmak konusunda çok yüksek bir esneklik sağlar. Şekil 2.7’de çift kutuplu normal iletim devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Çift kutuplu normal devre

### 2.3.4.2. Metal geri dönüş yollu çift kutuplu devre

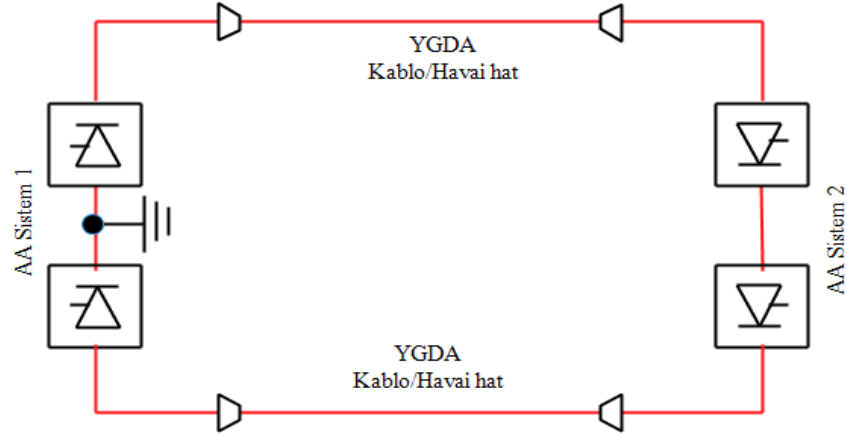
Eğer hala elektrotların geçici kullanımında kısıtlamalar varsa ya da iletim mesafesi kısa ise elektrotlu toprak geri dönüş yoluna bir alternatif olarak, özel bir alçak gerilimli doğru akım (AGDA) metal geri dönüş yolu kullanılabilir. Şekil 2.8’de tek kutuplu çalışma için özel metal geri dönüş yollu çift kutuplu iletim devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Tek kutuplu çalışma için özel metal geri dönüş yollu çift kutuplu devre

### 2.3.4.3. Tek kutuplu çalışma için özel geri dönüş yolu olmadan çift kutuplu devre

Şekil 2.9’da tek kutuplu çalışma için özel geri dönüş yolu olmadan çift kutuplu iletim devresi kullanılmıştır. Tek kutuplu çalışma için elektrotlar ya da özel metal geri dönüş yolu olmayan tasarımlar en düşük başlangıç maliyetini verebilir.



Şekil 2.9. Tek kutuplu çalışma için özel geri dönüş yolu olmadan çift kutuplu devre

Bir dönüştürücü kutbu arızalandığında bypass anahtarlar kullanılarak tek kutuplu çalışma mümkün kılınabilir ama bir YGDA iletkeninde arıza oluştuğunda bypass anahtarlar kullanılarak tek kutuplu çalışma sağlanamaz (Siemens, 2015).

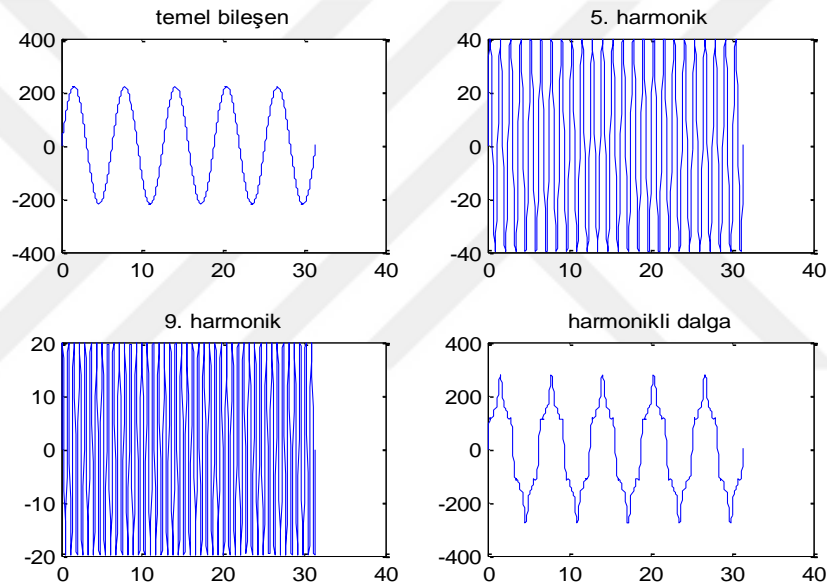
### 3. HARMONİKLER

#### 3.1. Tanımlar ve Kavramlar

##### 3.1.1. Giriş

Yarı iletken elemanların yapısı gereği ve sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları vb.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki bu sinüzoidal dalgalara harmonik denir (Erkan, 1996).

Şekil 3.1’de 5. ve 9. harmoniklerden oluşan periyodik bir dalga gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Harmonikli bir dalga

##### 3.1.2. Lineer olmayan elemanlar

Lineer olmayan elemanlar, akım-gerilim karakteristiği yani uç karakteristiği lineer olmayan devre elemanlarıdır. Manyetik ya da elektrik devre lineersizliğine sahip oldukları için bir güç sistemine bağlandıklarında harmoniklere yol açarlar. Bu olumsuzluklarına rağmen sistemde kullanımlarına çok ihtiyaç vardır ve her geçen gün bu ihtiyaç artmaktadır.

Gaz deşarj aydınlatma elemanları, gerilim veya sıcaklıkla değeri değişen dirençler, yarı iletken elemanlar, demir çekirdekli bobinler ve bu elemanların kullanıldığı transformatörler, indüktif ve elektronik balastlar, bobinler, bilgisayarlar ve

ofis cihazları, motor ve generatörler, kesintisiz güç kaynakları ve benzeri birçok elemanlar nonlinear elemanlar olup sisteme harmonik bileşenleri enjekte ederler.

Sistemde harmoniklere yol açan etkenler sadece nonlinear elemanlar değildir. Sinüzoidal olmayan kaynaklar da harmoniklere yol açarlar.

### 3.1.3. Sinüzoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler

Sinüzoidal olmayan dalgalar bir sistemde üç yolla oluşur. Birinci grup lineer elemanlara sahip bir devreye sinüzoidal olmayan bir kaynağın bağlanması, ikincisi lineer olmayan elemanlara sahip devreye sinüzoidal bir kaynağın bağlanması, üçüncüsü ise lineer olmayan elemanlı devreye sinüzoidal olmayan kaynağın bağlanmasıdır.

Harmonik bileşenler sinüzoidal olmayan formda oldukları için sinüzoidal olmayan durumda elektriksel büyüklüklerin nasıl hesaplanacağı bilinmelidir. Sinüzoidal olmayan büyüklüklerin analizine yönelik en çok kullanılan yöntem Fourier serisi yöntemidir. Joseph Fourier, sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların farklı genlik ve frekanslara sahip sinüzoidal dalgalara ayrılabilmesini ifade etmiştir. Bu yöntem ile sinüzoidal olmayan dalgaları temel frekans bileşeni ile temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını bir zaman aralığında periyodik olarak belirtmek mümkündür. Harmoniklerin analizi Fourier serisinin elde edilme işlemidir (Kocatepe ve ark., 2003).

### 3.1.4. Harmonik büyüklüklere ait kavramlar

Bir sistemde harmonik içeren anlık gerilim ve akım değerleri Fourier serisi ile,

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (3.1)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (3.2)$$

denklemleri ile ifade edilir ve  $v_n$ ,  $i_n$  ifadeleri n. harmonik için anlık gerilim ve akım değerlerini ifade eder. DA terimler basitleştirme amacıyla ihmal edilmiştir.  $V_n$ ,  $I_n$  büyüklükleri, n. harmonik için gerilim ve akımın etkin değerleri,  $\omega_1$  temel açısız frekans,  $\theta_n$  ve  $\delta_n$  n. harmonik için faz açılarıdır.

Anlık güç ise;  $p(t) = v(t) \cdot i(t)$  şeklinde ifade edilir ve  $p(t)$ 'nin T periyodunda aktif gücü,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3.3)$$

olarak verilir. Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak Denklem (3.4) elde edilir.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (3.4)$$

Harmonikli akım ve gerilimin etkin değerleri şu denklemlerle ifade edilir:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) d(t)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (3.5)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) d(t)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.6)$$

D, distorsiyon (bozulma) gücü olup şu şekilde ifade edilir:

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (3.7)$$

Harmonikli durumda reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir.

AA güç sisteminden çekilen akımın yük tarafından ne kadar verimlilikte kullanıldığını ölçmek için kullanılan güç faktörü ise,

$$GF = \frac{P}{S} \quad (3.9)$$

olarak verilir.

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlardan toplam harmonik distorsiyonu (THD) gerilim ve akım için sırasıyla,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.11)$$

denklemleriyle elde edilir.

Toplam talep distorsiyonu (TTD), yüke ait bir değer olup,

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir.  $I_L$  besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından yük tarafından çekilen temel frekanslı en yüksek akımdır. Bir yıl öncesinden başlanılarak hesaplamanın yapılacağı tarihe kadar geçen süre zarfında yük tarafından talep edilen en yüksek

akımların ortalaması olarak hesaplanır. Toplam talep distorsiyonu kavramı IEEE ‘Standard 519’ uygulamasında özellikle ifade edilmiştir (Kocatepe ve ark., 2003).

### 3.2. Harmonik Kaynakları

Harmonik kaynakları akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar olarak nitelendirebiliriz. Lineer uç karakteristiğine sahip olmayan bu elemanlar devreden çekilen akım ve gerilim dalga şeklinin sinüs formundan sapmasına neden olurlar.

Yüksek gerilimli doğru akımla iletim sistemlerinde üretilen enerji ve dağıtılan enerji alternatif akım olduğundan YGDA iletimde AA-DA doğrultucular ve DA-AA inverterler kullanılır. Doğrultucular ve inverterler yarı iletken elemanlardan oluşurlar. Yarı iletken elemanlar lineer olmayan uç karakteristiğe sahip olduklarından dolayı yüksek gerilimli doğru akımla iletim sistemleri de harmoniklere yol açarlar.

Ayrıca generatörler, motorlar, transformatörler, statik VAR kompanzatörler, bilgisayarlar ve ofis cihazları, anahtarlama güç kaynakları, kaynak makineleri, kontrol devreleri, frekans dönüştürücüleri, ark fırınları, floresan lambalar ve indüksiyonla ısıtma harmonik kaynakları arasında yer alırlar (Kocatepe ve ark., 2003).

### 3.3. Harmoniklerin Etkileri

Harmoniklerin güç sistemi üzerindeki genel etkileri şunlardır:

- Generatör ve şebeke gerilimindeki bozulmalar,
- Artan gerilim düşümleri,
- Güç sistemindeki elemanlarda ve yüklerde artan kayıplar ve verimin düşmesi,
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların oluşması ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi
- Yalıtım malzemelerinde delinmeler,
- Toprak kısa devre akım değerlerinin yükselmesi,
- Harmonik frekanslardan dolayı rezonans oluşumu ve yol açtığı yüksek gerilim ve akımlar (Kocatepe ve ark., 2003).

## 4. FİLTRELER

Harmoniklerin devre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkileri yok etmenin birkaç yolu vardır. Bunlardan en önemlisi filtrelerdir.

Sinüzoidal olmayan kaynakların veya lineer olmayan elemanların sistemde oluşturduğu harmonikleri yok etmeye yarayan ek devrelere filtre denir. Filtreler de kendi içinde aktif, pasif ve hibrit filtreler ayrılırlar. Pasif filtreler bağlandıkları sistemde istenilen harmonik bileşen ya da bileşenler frekansında rezonans durumu oluşturarak bu bileşenleri toprağa aktarma işlemini sağlarlar (Çalışkaner, 2008).

Filtreler harmonik kaynak ile alıcı arasına bağlantı şekillerine göre seri ve paralel filtreler olarak iki gruba ayrılır. Pasif filtrelerde amaç; ayarlanılan frekans ya da frekanslarda rezonans oluşturarak veya bir tıkaç vazifesi yaparak, harmonik bileşenleri toprağa akıtmak veya yük tarafına geçişini engellemektir. Aktif filtrelerde ise amaç; sistemde dolaşan harmonikleri sisteme yüklemektir (Bilge, 2008).

### 4.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, bobin, kondansatör ve bazı durumlarda omik dirençlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri yok etmek için kullanılır ve harmonik kaynak ile alıcı arasına yerleştirilirler.

Pasif filtrede amaç, hangi harmonik bileşen yok edilmek isteniyorsa o bileşenin frekansında rezonans oluşacak şekilde kondansatör ve bobin değerlerini seçmektir. Her harmonik bileşen için ayrı bir filtre konulması gerekir. Çünkü her bileşenin rezonans frekansı farklıdır (Kocatepe ve ark., 2003).

Filtrelerin ayar keskinliğini Q kalite faktörü belirler. Tüm filtreler, yüksek veya düşük Q tipindedirler. Yüksek Q tipi filtrelerde, Q değeri 30 ile 60 değeri arasındadır ve düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q tipi filtrelerde ise, Q değeri 0.5 ile 5 aralığındadır ve geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir. Yüksek dereceli harmonikleri yok etmek için kullanıldıklarında yüksek geçiren filtre olarak adlandırılırlar. Ayar keskinliği,

$$Q = \frac{X_r}{R} \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlanır. R filtre direncini belirtirken,  $X_r$  rezonans frekansındaki reaktansı gösterir. Yüksek geçiren filtrelerde ise,

$$Q = \frac{R}{X_r} \quad (4.2)$$

ile ayar keskinliği ifade edilir.

Ayar sapma faktörü  $\delta$ , bir filtrenin anma ayar frekansından uzaklaşması olarak tanımlanır ve  $\omega_n$  filtrenin ayarlandığı açısal frekans olmak üzere,

$$\delta = (\omega - \omega_n)/\omega_n \quad (4.3)$$

olarak verilir. Ayar sapma faktörü, filtre ömrü ve sıcaklığının neden olduğu kondansatör kapasitesi ve indüktanstaki değişimlere, temel frekanstaki değişimlere, yapım toleransına ve Q için öngörülen ayar aralığının neden olduğu etkilere göre değişir. Ayrıca ayar sapma faktörü,

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (4.4)$$

olarak da yazılabilir (Arrillaga ve Watson, 2003).

Pasif filtrelerin basit, fiyatları düşük, etkinlikleri yüksek ve temel frekansta reaktif güç ihtiyacını aynı anda karşılayabilme gibi avantajları vardır. Ama bu filtreler, kaynak empedansları ve sistemdeki frekans değişiminden etkilenmeleri, kaynakla rezonansa girme gibi risklere sahip olmaları, filtreleme frekansının sabit olup kolay kolay değiştirilememesi ve büyük hacimli olmaları gibi dezavantajlara sahiptirler (Akmaz, 2012).

Pasif filtreler devreye seri ve paralel olarak bağlanırlar.

#### 4.1.1. Seri filtreler

Bu bağlantılarda filtre harmonik yalıtıcı gibi davranır, yüksek empedans sergileyerek harmonik akışını engeller. Bu tür filtreler YGDA uygulamaları için bazı dezavantajlara sahiptir. Çünkü filtre temel bileşeni taşımak zorundadır, yalıtım seviyesi temel yalıtım seviyesini takip etmelidir ve filtrenin koruması zor, güvenilirliği tartışmalıdır. Ayrıca YGDA, dönüştürücülerin çalışmasını kötü etkiler. Bu filtreler ancak YGDA istasyonunun tüm sistem filtreleme performansının çok yüksek olması durumunda kullanılır (Plaisant, 1997).

#### 4.1.2. Paralel filtreler

Seri filtrelerin aksine, sistem ile yük arasına paralel olarak bağlanır ve toprağa bir düşük harmonik empedans yol sağlayarak harmonik saptırıcı gibi davranır. Seri



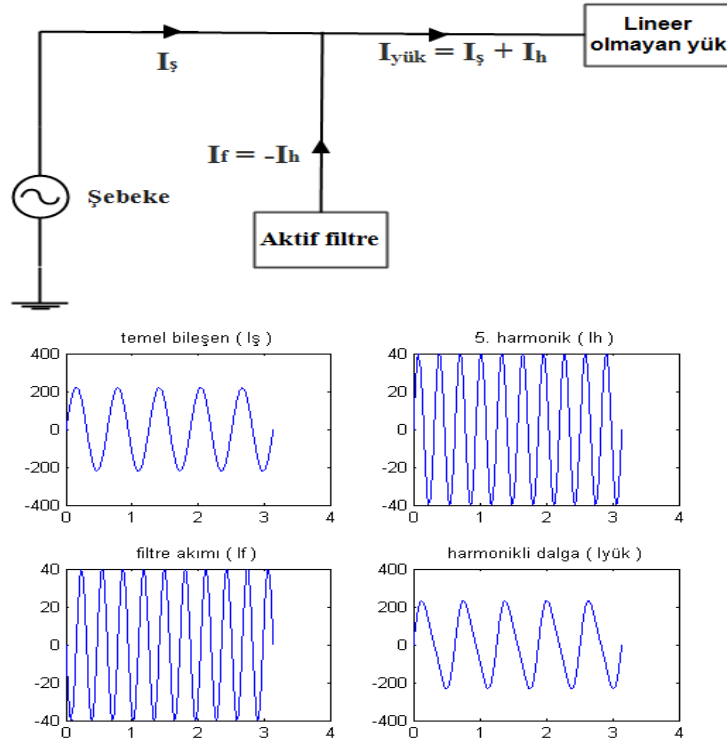
filtrelere göre bir avantajı reaktif güç ihtiyacına katkıda bulunmasıdır. Seri filtreler rezonans frekanslarının altındaki frekans değerlerinde (temel frekans da dahil) indüktif olduklarından dolayı daha çok reaktif güç harcarlar (Plaisant, 1997).

## 4.2. Aktif Filtreler

Geleneksel pasif filtrelerin tasarım karmaşıklığı, pasif filtrelerden kaynaklanan kayıpların yüksek maliyeti ve ara harmoniklerin bastırılması yeteneklerinin kısıtlı olması harmonik kompanzasyonun güç elektroniği elemanları ile yani aktif filtrelerle gerçekleştirilmesine yol açmıştır (Arrillaga ve Watson, 2003).

Aktif filtreler, harmonik bileşenleri yok etmek için oluşturulmuş, temeli ileri güç elektroniğine dayanan programlanabilir filtrelerdir. Temel özelliklerinden biri, birden fazla harmonik bileşeni yok etmek için programlanabilir olmalarıdır. Kullanıldıkları güç sistemlerinde değişiklikler yapılsa bile aktif filtreler kompanzasyonlarına devam ederler. Bu da aktif filtrelerin diğer filtrelere göre en önemli avantajıdır (Efe, 2006).

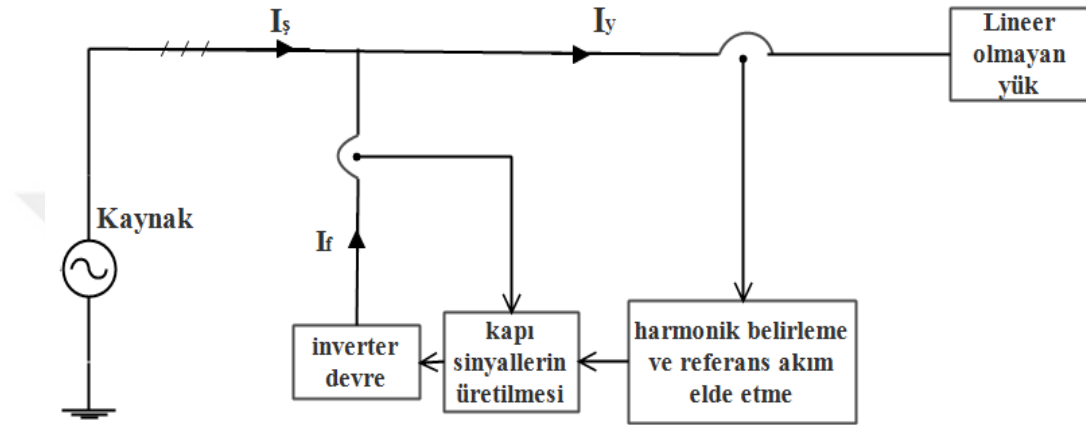
Güç sistemlerindeki aktif filtrelerin temel görevi, iletim hattında var olan harmonikleri tespit etmek ve bu harmoniklerle aynı büyüklükte ters fazda akım veya gerilim üreterek sisteme enjekte etmektir (Jun ve ark., 1998). Şekil 4.1’de aktif filtre kullanılarak harmoniklerin giderilmesi gösterilmiştir. Burada,  $I_h$  harmonik akımına ters fazda  $I_f = -I_h$  filtre akımı üretilerek sisteme enjekte edilmektedir.



Şekil 4.1. Aktif filtreler ile harmoniklerin yok edilmesi

#### 4.2.1. Aktif filtrenin yapısı

Harmonik kompanzasyonunda kullanılan aktif güç filtrelerinde önce harmonikler temel bileşenlerden ayrılır ve ardından bazı kontrol metotları yardımıyla referans akımlar elde edilir. Elde edilen referans akımlar, üretilen filtre akımıyla karşılaştırılır ve bazı kontrol metotları yardımı ile üretilmesi gereken yeni akımlar için sinyaller elde edilir. Bu sinyaller inverter devresine uygulanır ve gerekli filtre akımları üretilir. Şekil 4.2’de aktif filtrenin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Aktif filtrenin yapısı

##### 4.2.1.1. Referans akımların elde edilmesi

Aktif güç filtresinin bu kısmında harmonikler belirlenir ve ardından referans akımlar elde edilir. Referans akımlar için kullanılan birçok metot vardır. Bunlardan birincisi hızlı Fourier dönüşüm (FFT) metodudur (Sucu, 2003). Ayrıca son zamanlarda p-q ve d-q teori olarak da bilinen çeşitli kontrol yöntemleri de önerilmiştir (Patel ve Panda, 2014).

##### a) Hızlı Fourier dönüşüm metodu

FFT metodu, frekans düzleminde düzeltme olarak da bilinir. Bu metot örnek yük akımındaki FFT'nin performansı ile yükteki harmonik bileşenlerini ayrı ayrı belirler ve daha sonra aynı harmonik bileşenlerine sahip aynı genlikte fakat ters fazda bir akım dalgası üretir. Böylece istenilen harmonik derecesi yok edilebilir. FFT metodu, uygulama zorluğu, cevap zamanının yüksek olması ve performansının düşük olması sebebi ile uygulamada pek kullanılmaz (Sucu, 2003).

## b) Anlık aktif ve reaktif güç (p-q) teorisi

P-q teorisi zaman düzleminde tanımlı bir anlık güç dizisine dayanır. Nötr hatlı ya da nötr hatsız 3 fazlı sistemlere uygulanır. Bu teori önce akım ve gerilimleri  $abc$  koordinatlarından  $\alpha\beta 0$  koordinatlarına çevirir ve sonra anlık güçleri bu koordinatlarda belirtir. Bu yüzden p-q teorisi her zaman üç fazlı sistemi fazların ayrı ayrı toplamı olarak değil, bir bütün olarak düşünür. Clarke dönüşümleri kullanılarak  $abc$  koordinatlarından  $\alpha\beta 0$  koordinatlarına dönüşüm yapılır.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \left( \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Aynı şekilde akımlar da dönüştürülür. Ters Clarke dönüşümleri kullanılarak  $\alpha\beta 0$  koordinatlarından  $abc$  koordinatlarına geçiş yapılır.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \left( \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Akımlar için de benzer dönüşüm yapılır. Bu dönüşümü uygulamanın bir avantajı sıfır dizi bileşenlerini abc faz bileşenlerinden ayırmaktır.  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenleri 3 fazlı üç iletkenli sistemlerde ve 3 fazlı dengeli sistemlerde sıfır dizi bileşenlerine katkıda bulunmaz. Anlık sıfır dizi güç, anlık aktif güç ve anlık reaktif güç aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Eğer kompanzasyon yapılacak güçleri  $p_c^*$  ve  $q_c^*$  olarak tanımlarsak;  $\alpha\beta$  referans çerçevesinde kompanzasyon akım değerleri,

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -p_c^* \\ -q_c^* \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

olur ve ardından ters Clarke dönüşümü kullanılarak  $\alpha\beta$  düzleminden  $abc$  düzlemine geçilir ve kompanzasyon akımları elde edilir (Bhavsar ve Patel, 2011).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{2}{3}} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

### c) Anlık aktif ve reaktif akım (d-q) teorisi

Anlık aktif ve reaktif akım kontrol metodunda, kompanzasyon referans akımlarının üretilmesi için 3 fazlı yük akımı ve kaynak gerilimi izlenir. Nonlineer yük akımları 2 aşamalı bir dönüşüm geçirirler. Önce a, b, c ekseninden  $\alpha$ ,  $\beta$  eksenine yani durağan referans çerçeveye aktarılırlar. Ardından d-q eksenine yani senkronize referans çerçeveye aktarılırlar. Gerilim ve akım vektörleri  $\omega$  senkronize hızında dönerler.  $i_{L\alpha}$ ,  $i_{L\beta}$ ,  $i_{L0}$  akımlarından  $i_{Ld}$ ,  $i_{Lq}$ ,  $i_{L0}$  akımlarına dönüşüm denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L0} \end{bmatrix}, \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \quad (4.10)$$

$\theta$  anlık gerilim vektör açısını belirtir ve gerilim vektöründen elde edilir. Gerçek kaynak gerilimi ve nonlineer yük akımlarından  $\alpha$ - $\beta$  dönüşümü aşağıdaki matris yardımıyla ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Denklem (4.10),  $v_\alpha$  ve  $v_\beta$  cinsinden şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L0} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$i_{Ld}$  ve  $i_{Lq}$ , d-q yük akımları aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi bir DA bileşenine ve bir AA bileşenine sahiptir.

$$i_{Ld} = \overline{i_{Ld}} + \widetilde{i_{Ld}} \quad (4.14)$$

$$i_{Lq} = \overline{i_{Lq}} + \widetilde{i_{Lq}} \quad (4.15)$$

İdeal sinüs kaynak gerilimi için, ortalama bileşen sadece pozitif dizinin birinci harmonik akımından oluşur ve negatif dizinin ilk harmonik bileşeni de dahil olmak üzere, diğer tüm yüksek dereceli harmonikler salınımlı bileşen grubunda yer alır ve bu bileşenler aktif filtre tarafından bastırılmalıdır. Aşağıda verilen ters Park dönüşümlerini kullanarak kompanzasyon referans akımları elde edilir (Patel ve Panda, 2014).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{c0}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \\ i_{c0}^* \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

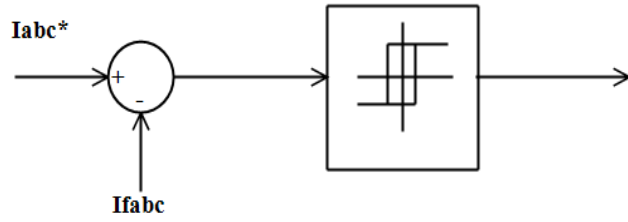
$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \left( \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{c0}^* \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

#### 4.2.1.2. Kapı sinyallerinin üretilmesi

Harmonik belirleme bloğunda belirlenmiş referans filtre akım sinyalleri ve filtrenin çıkış akım sinyalleri kontrol devresine girer ve işlenir. Ardından çıkış olarak dönüştürücüyü tetikleme sinyalleri üretilir. Bir akım kontrol devresi hızlı akım kontrolü yaparak anahtarlama sırasında oluşan harmonikleri bastırabilmelidir. Akım kontrolü histerezis ve üçgen dalga metotlarıyla gerçekleştirilir (Sucu, 2003).

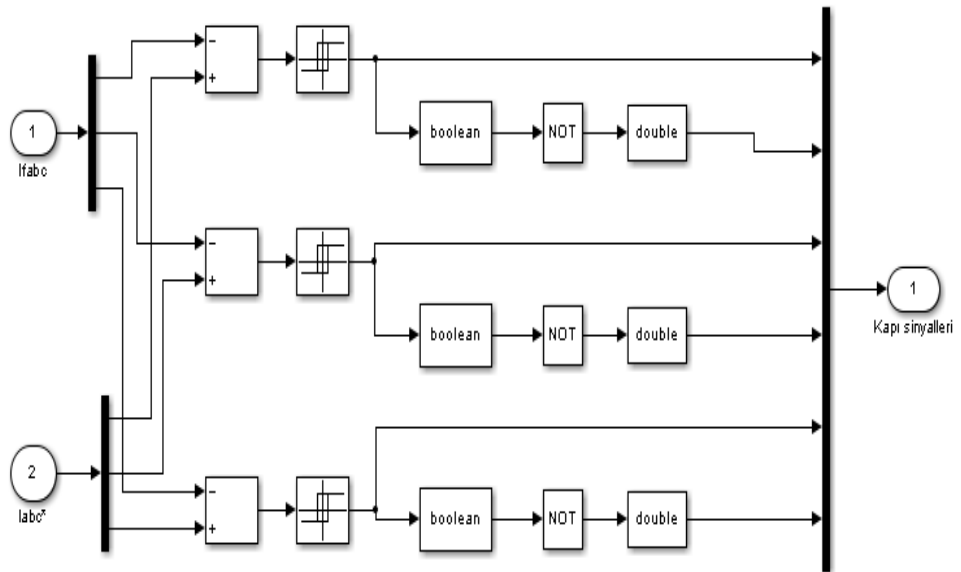
### a) Histerezis metodu

Bu teknik, akım kontrollü gerilim kaynaklı inverterlerde darbe üretmek için kullanılır. Bu kontrol metodu iyi bir kararlılık ve çok hızlı sistem cevabı sunar, doğruluk oranı yüksektir ve basit işlemler içerir. Aktif güç filtrelerinde hat akımlarının kontrolü için kullanılan bu metot, oluşan hata akımını çevreleyen bir histerezis banttan oluşur. Hata akımı, referans akımından gerçek filtre akımını çıkararak elde edilir. Hata sinyali istenilen histerezis bantta röleye verilir. Şekil 4.3'te histerezis akım kontrol metodu gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Histerezis akım kontrolü

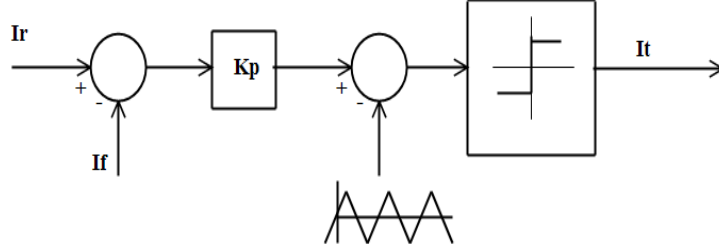
Şekil 4.4'te bu kontrolörün simülasyon diyagramı gösterilmiştir. Oluşan hata sinyalinin altında ve üstünde bir bant kurulmuştur. Bu sinyal üst bandı aştığı zaman, giriş akımını azaltmak için çıkış gerilimi değiştirilir ve alt bandı aştığı zaman giriş akımını artırmak için çıkış gerilimi değiştirilerek uyumlu anahtarlama sinyalleri elde edilir (Rejil ve ark., 2013).



Şekil 4.4. Histerezis akım kontrol simülasyon diyagramı

## b) Üçgen dalga metodu

Bu yöntemin gerçekleştirilmesi diğer metotlara göre kolaydır. Şekil 4.5'te üçgen dalga metodu gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Üçgen dalga metodu

$I_r$ , harmonik belirleme bloğu tarafından üretilen referans akımı;  $I_f$ , filtre akımı ve  $I_t$ , PWM üreticini tetikleme akımıdır.  $K_p$  ile yükseltilmiş hata sinyali taşıyıcı bir üçgen dalga ile karşılaştırılarak PWM anahtarlama sırasını belirler. Çıkış sinyali PWM üreticine uygulanarak her bir taşıyıcı sinyal fazı sıralı olarak kaydırılır. Uygulanması basit iken yüksek anahtarlama kayıplarına ve yüksek frekanslı bozulmalara yol açabilir (Sucu, 2003).

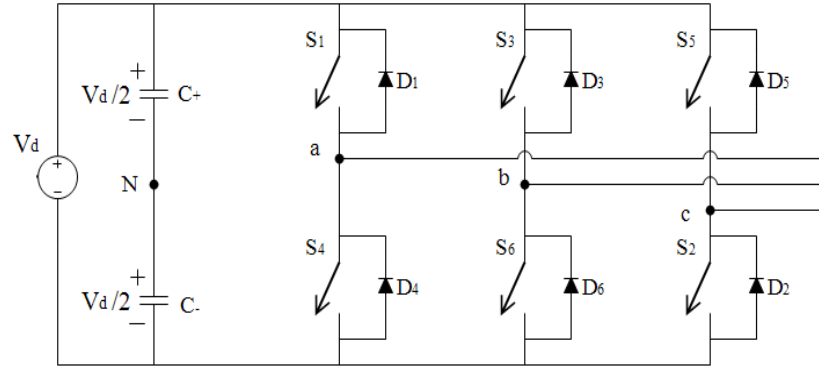
### 4.2.1.3. İnverterler

İnverter devreler, akım beslemeli veya gerilim beslemeli olmak üzere iki çeşittir. İnverterin DA tarafında güç kaynağı olarak bir DA güç kaynağı kullanılabilir, kondansatörler veya bobinler kullanılabilir ya da AA güç DA güce doğrultularak güç kaynağı olarak kullanılabilir. Yarı iletken anahtarlama elamanları olarak IGBT, MOSFET, GTO veya BJT kullanılabilir.

#### a) Gerilim beslemeli inverterler

Bağımsız olarak kontrol edilen çıkış formunun gerilim olduğu inverter devrelerdir. Bu devreler yüksek  $dv/dt$  bileşenlerinden oluşan bir AA çıkış gerilimi üretir, dolayısıyla pürüzsüz bir akım dalga şekli üretmek için harmonik frekanslarda yük indüktif olmalıdır. Bu devrelerde kapasitif yük, yüksek ani akımlar oluşturur. Bu durumlarda, gerilim beslemeli inverterlerin AA tarafıyla yük arasında bir indüktif filtre kullanılmalıdır.

Gerilim beslemeli devreler tek fazlı yarım köprü, tek fazlı tam köprü, üç fazlı tam köprü topolojilerinde kullanılabilir. Şekil 4.6'da üç fazlı tam köprü gerilim beslemeli bir inverter verilmiştir (Rashid, 2011).

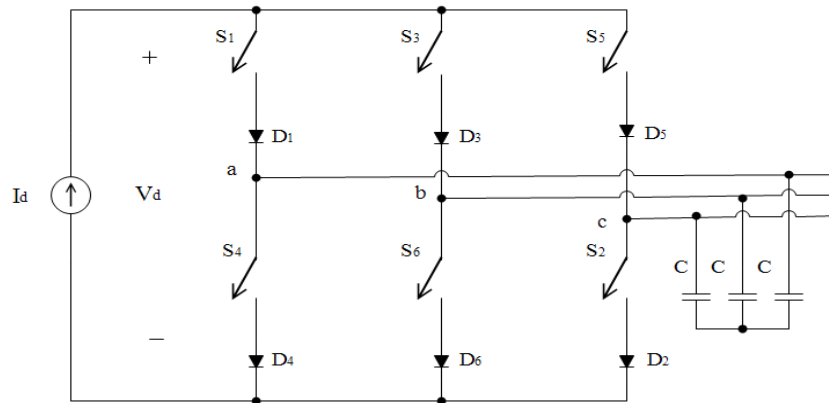


Şekil 4.6. Üç fazlı tam köprü gerilim beslemeli inverter

#### b) Akım beslemeli inverterler

Bu inverter devrelerde bağımsız olarak kontrol edilen, çıkış akımıdır. Yüksek kalitede gerilim şeklinin gerektiği orta gerilimli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bu devreler yüksek  $di/dt$  bileşenlerinden oluşan bir AA çıkış gerilimi üretir, dolayısıyla pürüzsüz bir gerilim dalga şekli üretmek için harmonik frekanslarda yük kapasitif olmalıdır. Bu devrelerde indüktif yük yüksek ani gerilimler oluşturur. Bu durumlarda akım beslemeli inverterlerin AA tarafıyla yük arasında bir kapasitif filtre kullanılmalıdır.

Akım beslemeli devreler tek fazlı yarım köprü, tek fazlı tam köprü, üç fazlı tam köprü topolojilerinde kullanılabilirler. Şekil 4.7'de üç fazlı tam köprü akım beslemeli bir inverter devresi verilmiştir (Rashid, 2011).



Şekil 4.7. Üç fazlı tam köprü akım beslemeli inverter



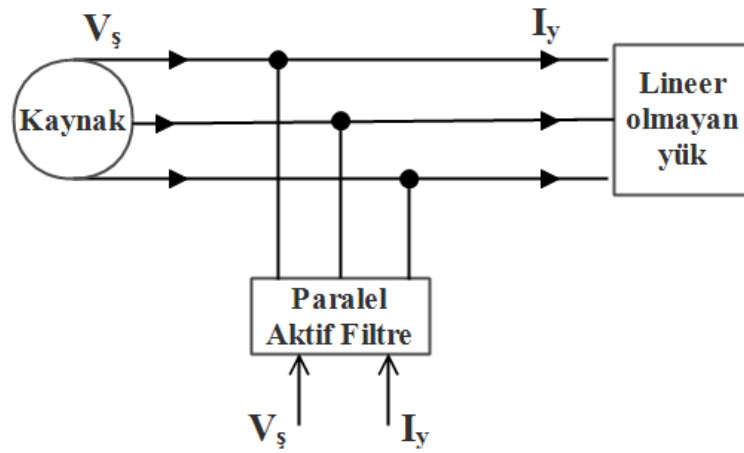
### c) Çok seviyeli inverter devreler

Genel olarak düşük gerilim adımlarıyla güç dönüşümü yapmak için çok sayıda aktif yarı iletken anahtarları kullanmayı içerir. Geleneksel iki seviyeli güç dönüşüm devrelerine nazaran çok sayıda avantajları vardır. Düşük gerilim adımları ile daha kaliteli güç üretirler. Diğer bir önemli özelliği, yarı iletken elemanların seri bir şekilde bağlanması ve bu bağlantının yüksek gerilimlerde çalışmalarına imkan sağlamasıdır. Bu devrelerin dezavantajı, çok sayıda yarı iletken anahtar içermeleridir ve bu da ek kapı sürücü devreleri gerektirir (Skvarenina, 2002).

Aktif filtreler, paralel ve seri olmak üzere iki şekilde devreye bağlanırlar.

#### 4.2.2. Paralel aktif filtre

Bu filtreler sisteme paralel olarak bağlanırlar. Paralel aktif filtreler seri aktif filtrelerin aksine tek bir temel frekansa bağlı değildirler, dolayısıyla tasarımcının belirlediği limitler arasında herhangi bir kaynak frekansında kompanzasyon işlemi verimli bir şekilde gerçekleştirilir (Arrillaga ve Watson, 2003). Paralel aktif filtreler akım kompanzasyonunda kullanılırlar. Şekil 4.8’de paralel bağlı bir aktif filtre verilmiştir.

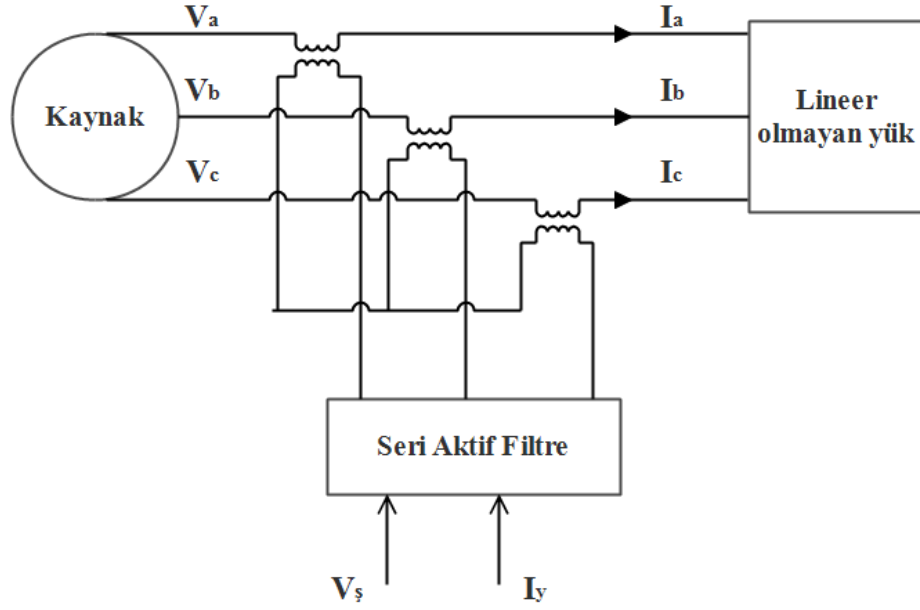


Şekil 4.8. Paralel aktif filtre

#### 4.2.3. Seri aktif filtre

Şekil 4.9’da seri bağlı bir aktif filtre gösterilmiştir. Sisteme genellikle transformatör üzerinden bağlanırlar. Gerilim harmoniklerinin bastırılmasında kullanılırlar.

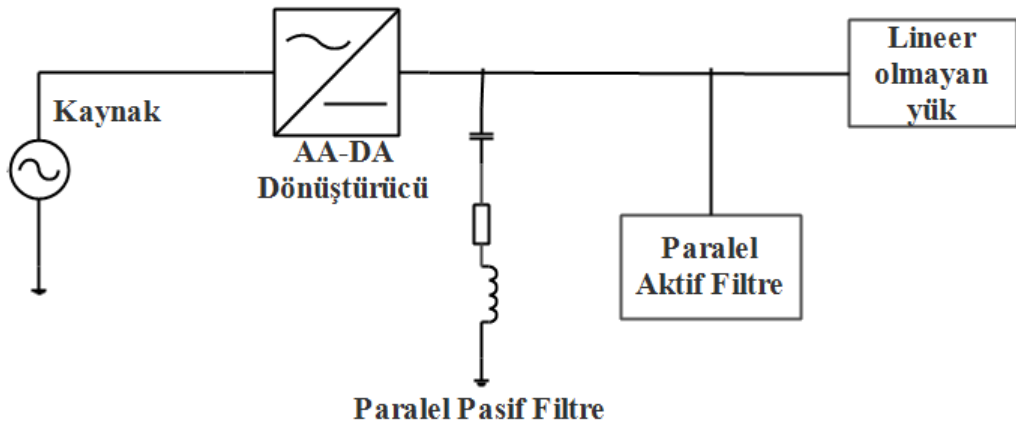
Temel kısıtlaması sabit bir temel frekansa sınırlandırılmasıdır (Arrillaga ve Watson, 2003).



Şekil 4.9. Seri aktif filtre

### 4.3. Hibrit Filtreler

Şekil 4.10'da hibrit aktif filtre bağlı bir sistem verilmiştir. Hibrit aktif filtreler, aktif ve pasif filtrelerin birlikte kullanılarak oluşturdukları filtrelerdir. Sistemin ihtiyacına göre değişik konfigürasyonlarla bağlanabilirler. Bu filtreler harmonik kompanzasyonu ile beraber gerilim regülasyonu, dengesizlik kompanzasyonu, kaynak ve lineer olmayan yük arasındaki izolasyon içinde kullanılırlar (Akmaz, 2012).



Şekil 4.10. Hibrit filtre

## 5. AKTİF DOĞRU AKIM FİLTRESİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Doğru akım ile iletimde, üretilen alternatif akım elektrik enerjisi doğrultucu devreler vasıtasıyla doğru akıma dönüştürülür, daha sonra inverterler kullanılarak alternatif akıma dönüştürülür ve dağıtılır. Bu dönüştürücülerden ve sistemdeki lineer olmayan diğer elemanlardan dolayı iletim sisteminin hem AA tarafında hem de DA tarafında harmonikler oluşur. Oluşan bu harmonikler sistemdeki elemanların bozulmasına ve enerji kayıplarına yol açarlar.

Sistemdeki harmonikler tasarım aşamasında yapılan çalışmalarla, pasif filtrelerle ve aktif filtrelerle bastırılmaktadır. Yüksek gerilimli doğru akım iletim sistemlerinde harmoniklerin azaltılması için tasarım aşamasında yapılabilecek çalışmalardan biri, dönüştürücülerin darbe sayısını artırmaktır. Darbe sayısı arttıkça harmonik sayısı azalmaktadır, fakat kullanılan yarı iletken eleman sayısı ve maliyet de artmaktadır.

Yüksek güçlerde IGBT yarı iletkenlerin anahtarlama frekans kapasitesi sınırlı olduğundan dolayı dönüştürücü bant aralıkları da sınırlıdır. Bu yüzden YGDA dönüştürücülerde yarı iletken güç anahtarlama elemanları olarak tristörler kullanılır (Mirzaee ve Bala, 2013).

Harmoniklerin bastırılması için kullanılan başka bir yöntem ise pasif filtrelerin kullanılmasıdır. Pasif filtreler sadece belirli harmonik frekanslarına ayarlanması ve diğer dezavantajlarından dolayı tek başına sistemde kullanılmazlar. Harmonik kompanzasyonda en verimli yöntem aktif filtrelerin kullanılmasıdır. Aktif filtreler harmonik kompanzasyonun yanı sıra reaktif güç de sağlayarak güç faktörünün iyileştirilmesinde de rol alırlar.

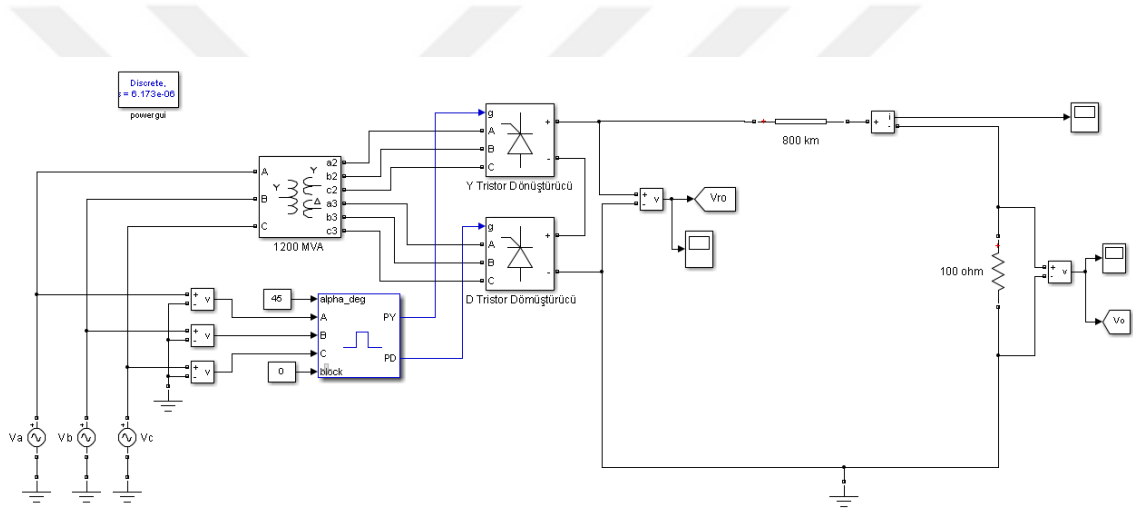
Aktif filtrelerde önce yük ve kaynak akımları veya gerilimleri sensörler aracılığıyla elde edilir. Ardından harmonik bileşenler elde edilir ve referans akımlar veya gerilimler üretilir. AA filtrelerde bu işlemler daha önce belirttiğimiz yöntemlerle yapılır. Özellikle son zamanlarda YSA, bulanık mantık gibi akıllı kontrol sistemleri kullanılarak referans bileşenler elde edilir. DA filtrelerinde ise bu işlemler yüksek geçiren filtreler ve bant geçiren filtreler aracılığıyla yapılır. Elde edilen referans bileşenler akım veya gerilim kontrol devrelerine uygulanır ve çıkış sinyali inverter devresine uygulanarak kompanzasyon akım veya gerilimleri elde edilir. AA filtrelerde daha düşük gerilim adımları elde etmek için artık çok seviyeli inverter devreler

kullanılmaktadır. Bu inverter devrelerin tetiklenmesinde de geleneksel PWM yerine yapıları daha uygun olduğu için akıllı sistemler kullanılır.

Bu çalışmamızda; bir YGDA iletim sisteminde oluşan harmoniklerin giderilmesi için, MATLAB-Simulink'te oluşturulan Şekil 5.1'deki güç sistemi modelinde aktif doğru akım filtresi uygulamaları yapılmıştır.

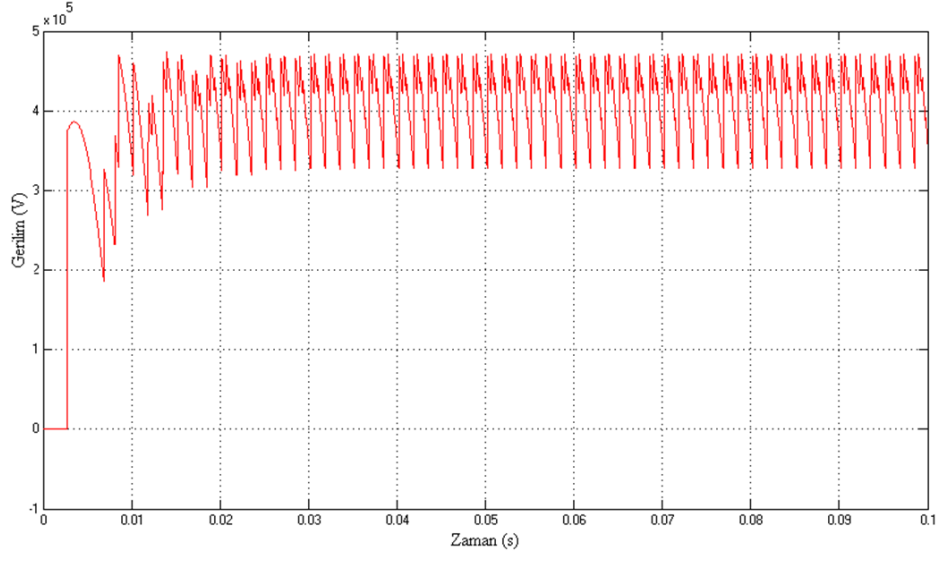
Çalışmamızda 12 darbelik bir dönüştürücü kullanılmıştır. Güç sistemimizin AA tarafında üç adet 50 Hz, 500 kV gerilim kaynağı kullanılmıştır ve üç fazlı üç sargılı transformatör yardımı ile 2 adet seri bağlı altı darbelik doğrultucunun birleşiminden elde edilen on iki darbelik doğrultucuya bağlanmıştır. Devrenin inverter tarafı, inverter yerine bağlanan 100 ohm'luk bir direnç yükü ile kısaltılmıştır.

Filtresiz durumda YGDA iletim sistemi modeli Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

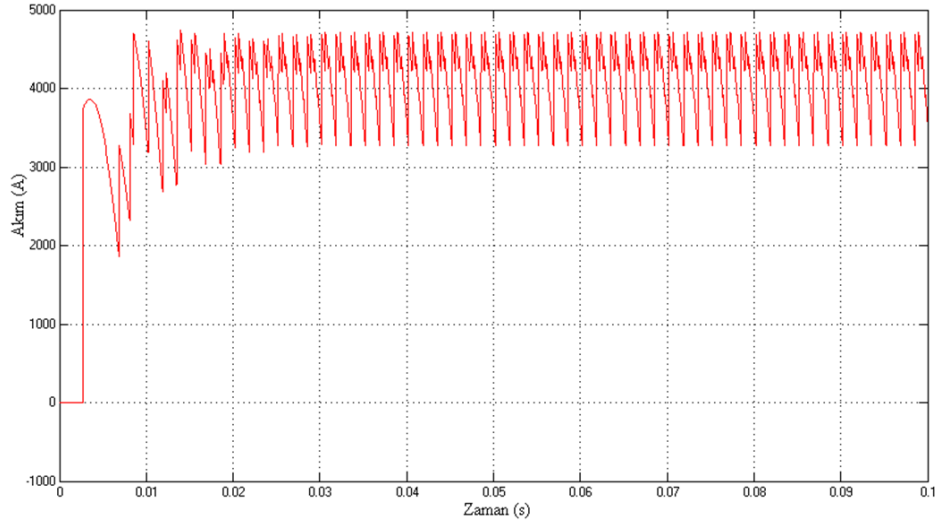


Şekil 5.1. Filtresiz YGDA iletim sistemi modeli

Şekil 5.1'de verilen YGDA iletim sistemi için filtre kullanılmadan elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri sırasıyla Şekil 5.2'de ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

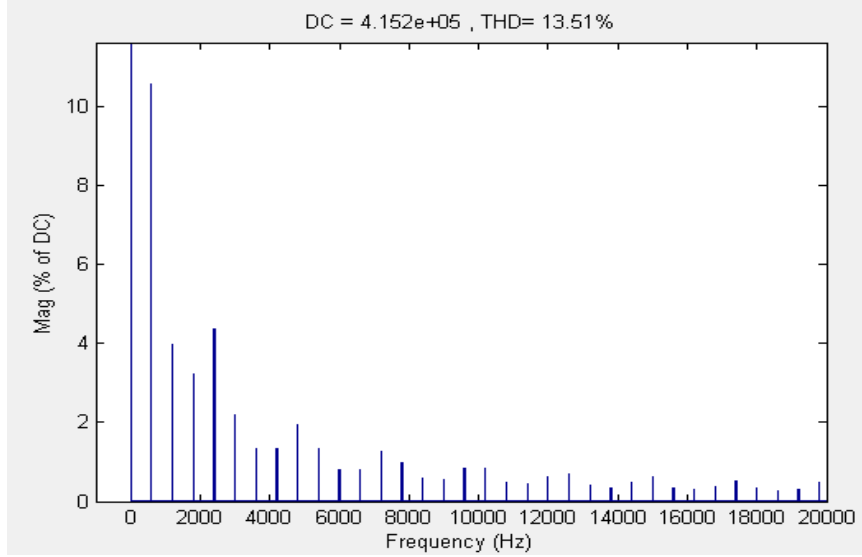


**Şekil 5.2.** Filtresiz yük gerilimi

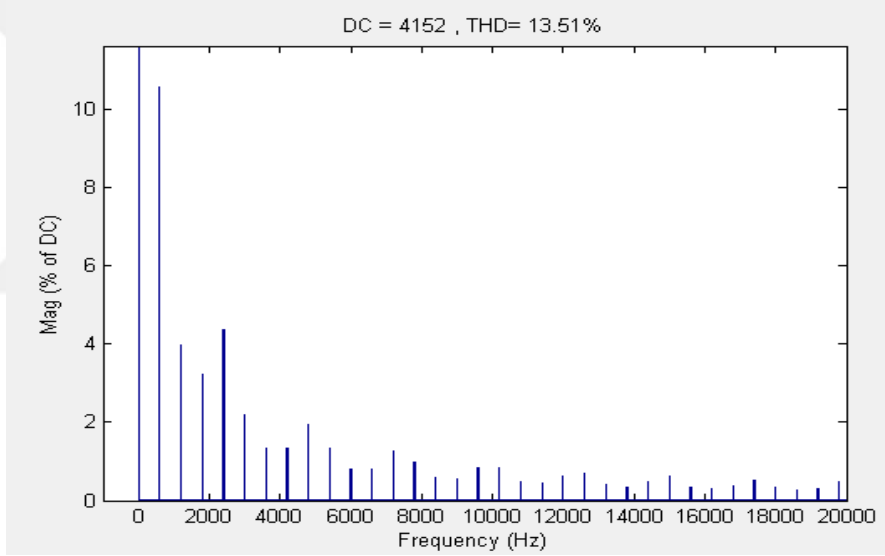


**Şekil 5.3.** Filtresiz yük akımı

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te, kompanzasyon öncesi yük gerilimi ve yük akımı için THD grafikleri verilmiştir.



**Şekil 5.4.** Filtresiz yük gerilimi harmonikleri



**Şekil 5.5.** Filtresiz yük akımı harmonikleri

Bu çalışmada üç adet aktif doğru akım filtresi tasarlanmıştır. Birincisi seri filtre, ikincisi paralel hibrit filtre ve son olarak da bu iki filtrenin birleştirilmesiyle oluşturulan karma filtre tasarımı yapılmıştır. Tasarımlar Matlab-Simulink'te simüle edilmiştir ve güç elemanları SimPowerSystem araç kütüphanesi kullanılarak modellenmiştir.

Aktif doğru akım filtresi tasarımında kullanılan SimPowerSystem araç kütüphanesindeki güç elemanları ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

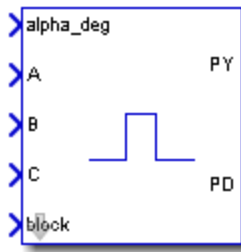
## 5.1. Güç Sistemi Modelini Oluşturan Elemanlar

### 5.1.1. Senkronize 12-darbeleri üreteç

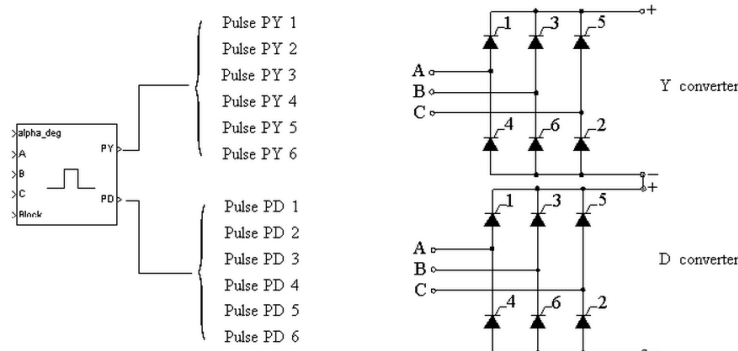
Senkronize 12-darbeleri üreteç bloğu, 12 tristörlük komütasyon gerilimleri üzerine senkronize olan ve her biri 6 darbeden oluşan iki sinyal vektörü üretir. İlk darbe grubu, PY çıkışı, Y/Y/ $\Delta$  dönüştürücü transformatörün Y sekonder kanadına bağlı 6 darbeleri köprüye gönderilir. İkinci darbe grubu ise, PD çıkışı, dönüştürücü transformatörün üçgen sekonder sargısına bağlı gruba gönderilir.

Üretece gönderilen senkronize gerilimler Y/Y/ $\Delta$  dönüştürücü transformatörünün primer Y tarafında ölçülen  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  faz-toprak gerilimleridir. PY darbeleri senkronize gerilimlerden üretilen faz-faz gerilimlerin sıfır geçişlerinden sonra alfa derecelerinde üretilir. PD darbeleri PY darbelerinden  $30^\circ$  ileride veya geride ayarlanabilir.

Şekil 5.6’da senkronize 12 darbeleri bir üreteç bloğu verilmiştir. Üretece alfa tetikleme açısı girdi olarak verilir. Ayrıca “block” girişine 0’den farklı bir sinyal geldiğinde darbe üretimi engellenir. Çıkış darbelerinin tristörlük sıralaması 3 fazlı tristörlük köprünün tetikleme doğal sıralamasıdır. Bu sıralama Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Senkronize 12-darbeleri üreteç



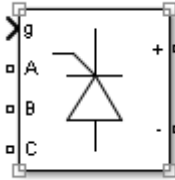
Şekil 5.7. Üreteç darbe sıralaması

### 5.1.2. PWM üretici ( 2 seviyeli)

Güç sistemi modelinde kullanılan PWM üretici bloğu iki seviye topolojisini kullanarak taşıyıcı tabanlı darbe genlik modülasyon dönüştürücüler için darbe üretir. Bu blok; JFET, GTO ve IGBT anahtarlama elemanlarını kullanarak tek faz yarım köprü, tek faz tam köprü ve üç faz köprü olmak üzere üç farklı dönüştürücü tipini kontrol eder. Giriş referans sinyali, modülasyon sinyali bilinir ve simetrik bir üçgen dalga ile karşılaştırılır. Referans sinyal, taşıyıcı sinyalden büyük ise üst kısım anahtarlama elemanları için yüksek (1) darbeyi alt kısım anahtarlama elemanları için de düşük (0) darbeyi üretir.

### 5.1.3. Güç dönüştürücü bloğu

Güç dönüştürücü bloğu; bir köprü konfigürasyonu içinde altı taneye kadar anahtarlama elemanını içerebilen bir 3 faz güç dönüştürücüsüdür. Güç anahtarı ve dönüştürücü konfigürasyon türleri seçilebilir. Bu köprü hem doğal ya da hat tetiklemeli güç elektroniği elemanlarının (diyot, tristör) hem de zorla tetiklemeli (GTO, MOSFET, IGBT) elemanların simülasyonuna izin verir. Aktif filtre olarak kullanılan köprüler IGBT yarı iletken elemanlar ile; akım dönüştürücü köprüler ise tristör yarı iletken elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8’de güç dönüştürücü bloğu gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Güç dönüştürücü bloğu

### 5.1.4. Doğru akım iletim hattı

Doğru akım iletim hattı bloğunda, istenilen sayıda faz için dağıtılmış parametrelili hat modeli uygulanır. Hat uzunluğu 800 km olarak alınmıştır. Sistemde kullanılan DA iletim hattı parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. DA iletim hattı parametreleri

Faz sayısı	1
Birim uzunluktaki direnç	0,015 ohm/km
Birim uzunluktaki indüktans	0,792 mH/km
Birim uzunluktaki kapasitans	14,4 nF/km



### 5.1.5. Birinci dereceden filtre

Şekil 5.9’da verilen filtre bloğu, alçak geçiren ya da yüksek geçiren filtre olarak kullanılır. Bu blok yardımı ile filtrenin cevabı hesaplanıp çizilebilir.  $s$  Laplas operatörü ve  $T$  zaman sabiti olmak üzere, transfer fonksiyonu aşağıda belirtilmiştir.

$$\text{Alçak geçiren filtre} : H(s) = \frac{1}{1+Ts} \quad (5.1)$$

$$\text{Yüksek geçiren filtre} : H(s) = \frac{Ts}{1+Ts} \quad (5.2)$$

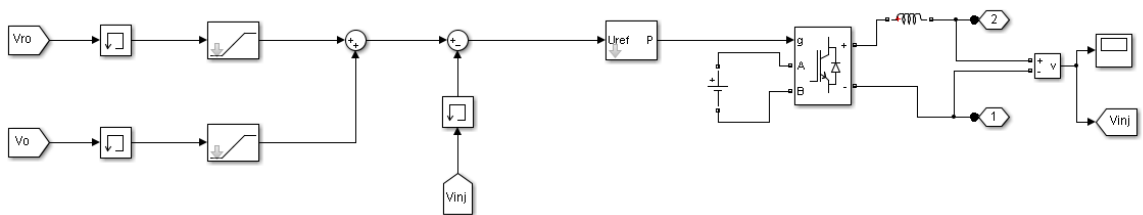


Şekil 5.9. Filtre bloğu

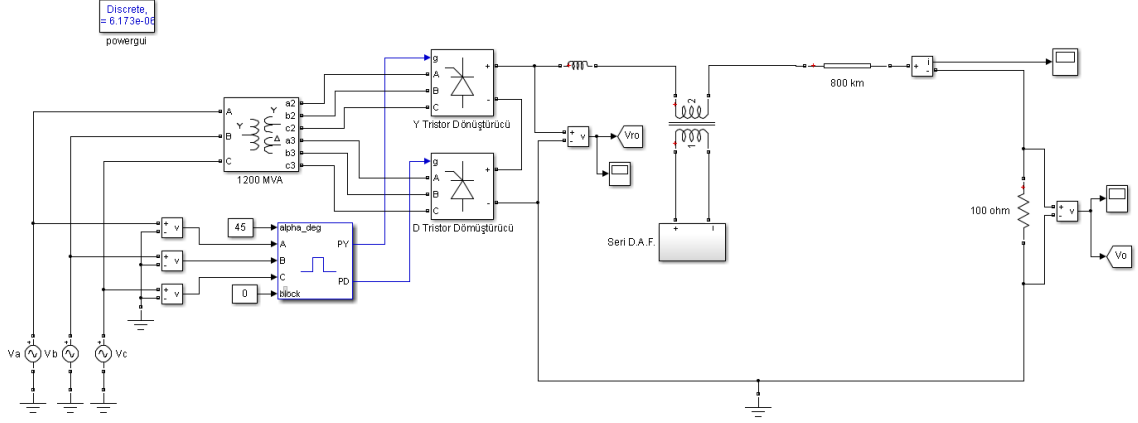
Kontrol sisteminde seri aktif filtrede kullanılan yüksek geçiren filtreler için kesim frekansı 80 Hz olarak alınmıştır. Hibrit filtrede kullanılan transfer fonksiyonu için de 30 Hz kesim frekansı kullanılmıştır.

### 5.2. Seri Aktif Filtre

Gerilim kontrollü tasarlanan seri aktif filtrede sinyal yönlendirme blokları yardımıyla yük gerilimi ve dönüştürücünün çıkış gerilimi 80 Hz’lik yüksek geçiren filtrelerden geçirilmiş ve ardından toplanarak harmonikler elde edilmiştir. Bu harmoniklerden aktif filtre çıkış gerilimi çıkarıldıktan sonra referans gerilimi elde edilerek, 20 kHz anahtarlama frekansında çalışan tek faz 4 bacaklı IGBT anahtarlama elemanlarından oluşan tam köprü PWM üreteciye uygulanmıştır. Üreteç yardımı ile tetikleme sinyalleri elde edilmiştir. İnverter tarafından üretilen ters fazdaki harmonik gerilimler bir transformatör yardımı ile sisteme uygulanmıştır. Dolayısıyla aktif filtre, gerilim harmoniklerini bastırmak için tasarlanmıştır. Filtreyi sisteme bağlayan transformatör, filtreyi istenmeyen aşırı gerilimlerden korur. Şekil 5.10’da kontrol sistemi ve Şekil 5.11’de tasarlanan iletim sistemi modeli verilmiştir.

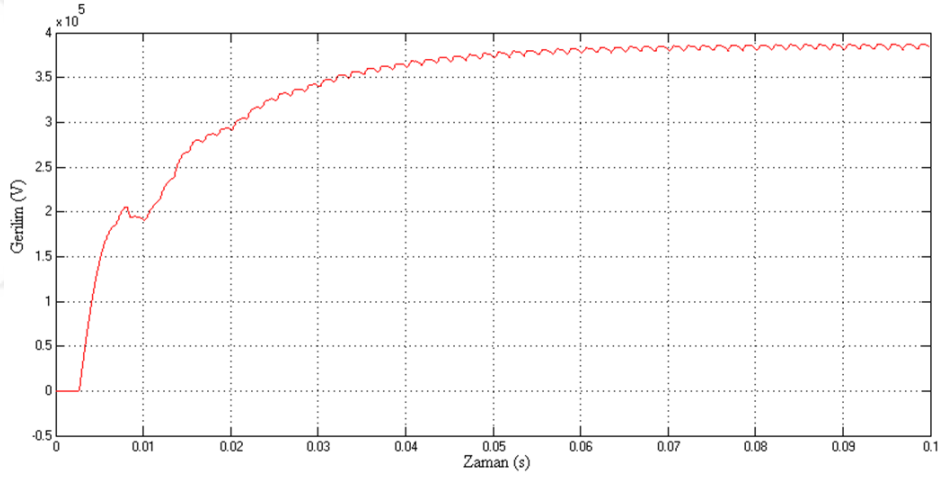


Şekil 5.10. Seri aktif filtre kontrol sistemi

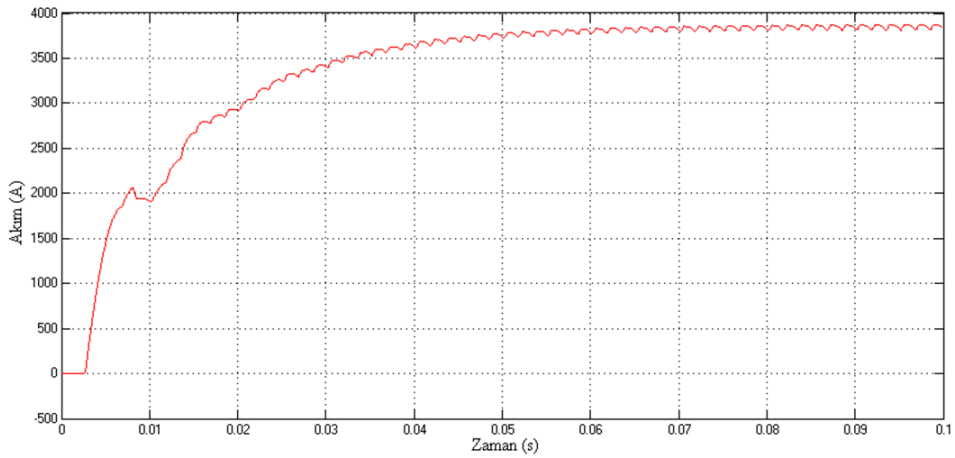


Şekil 5.11. Seri aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli

Seri aktif filtre devresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te gösterilmiştir.

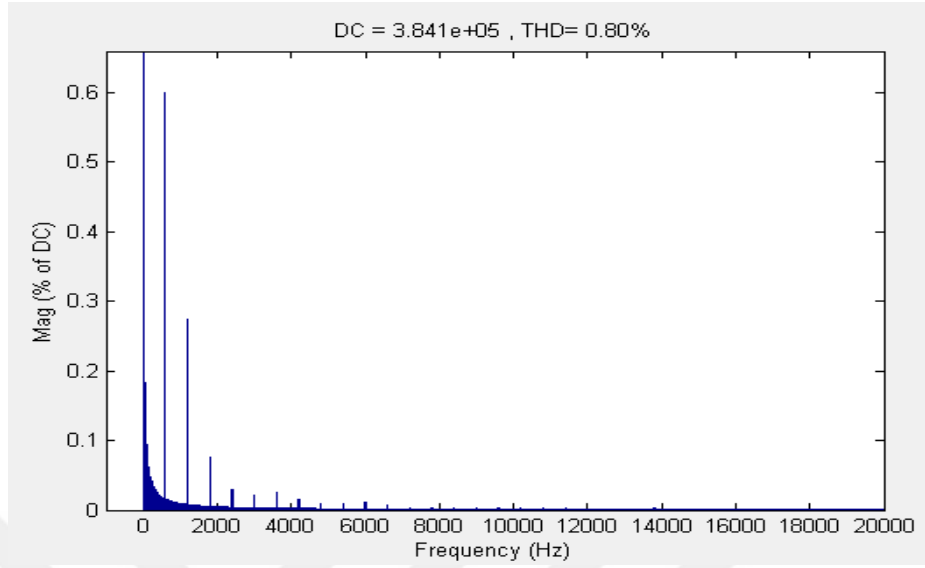


Şekil 5.12. Seri aktif filtreli durumda yük gerilimi

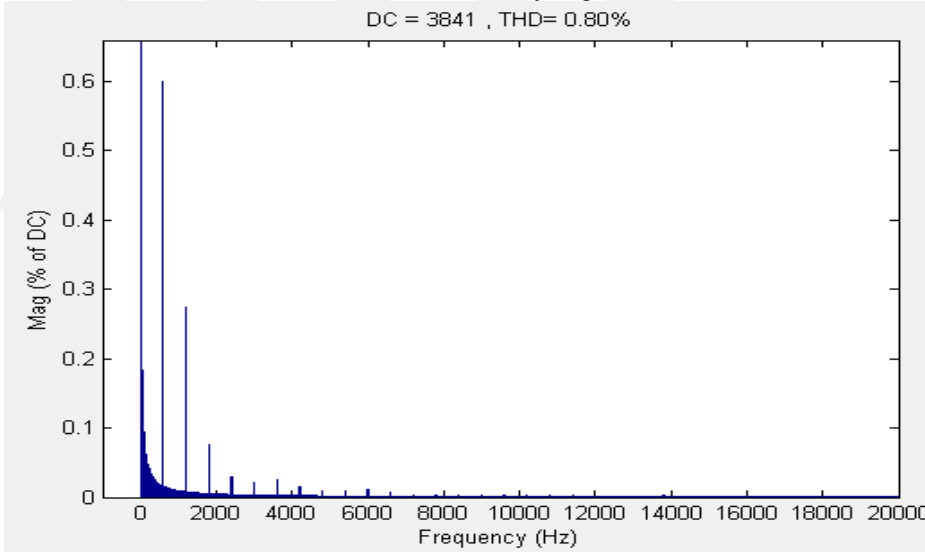


Şekil 5.13. Seri aktif filtreli durumda yük akımı

Simülasyon sonucunda yük gerilimi ve yük akımı için temel bileşen değerleri ve THD grafikleri sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Seri aktif filtrelili durumda yük gerilimi harmonikleri

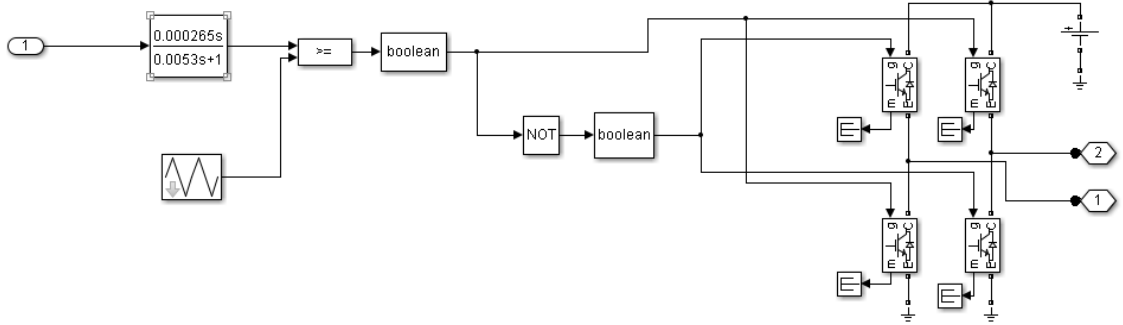


Şekil 5.15. Seri aktif filtrelili durumda yük akımı harmonikleri

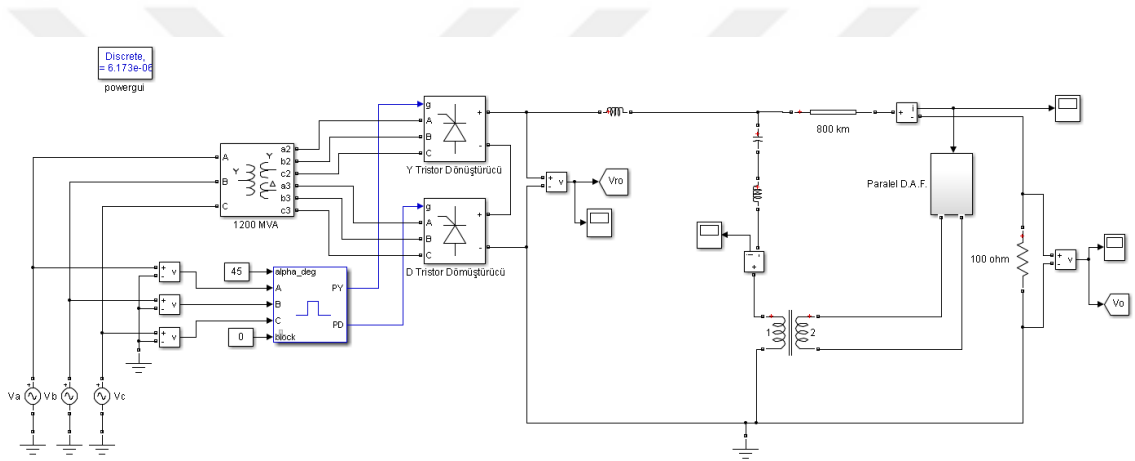
### 5.3. Paralel Hibrit Filtre

Akım kontrollü hibrit aktif filtre tasarımında, sinyal yönlendirme blokları aracılığı ile elde edilen yük akımı 30 Hz'lik transfer fonksiyonundan geçilerek harmonikler elde edilmiştir. Elde edilen harmonikler üçgen dalga ile karşılaştırılarak dört bacaklı tek faz IGBT anahtarlama elemanlarından oluşan inverter devresine uygulanarak harmonik akımlar ters fazda üretilip seri pasif filtre üzerinden sisteme enjekte edilmiştir. Dolayısıyla aktif filtre akım harmoniklerini bastırmak için

tasarlanmıştır. Ayrıca 711,76 Hz'e ayarlanmış pasif filtre yardımıyla harmonikler toprağa aktarılmıştır. Şekil 5.16'da kontrol sistemi ve Şekil 5.17'de tasarlanan iletim sistemi verilmiştir.

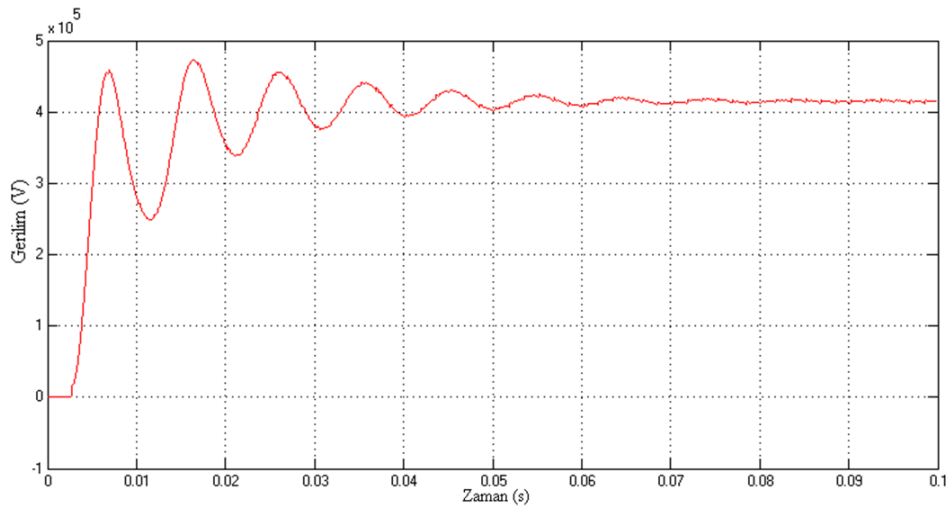


Şekil 5.16. Paralel aktif filtre kontrol sistemi

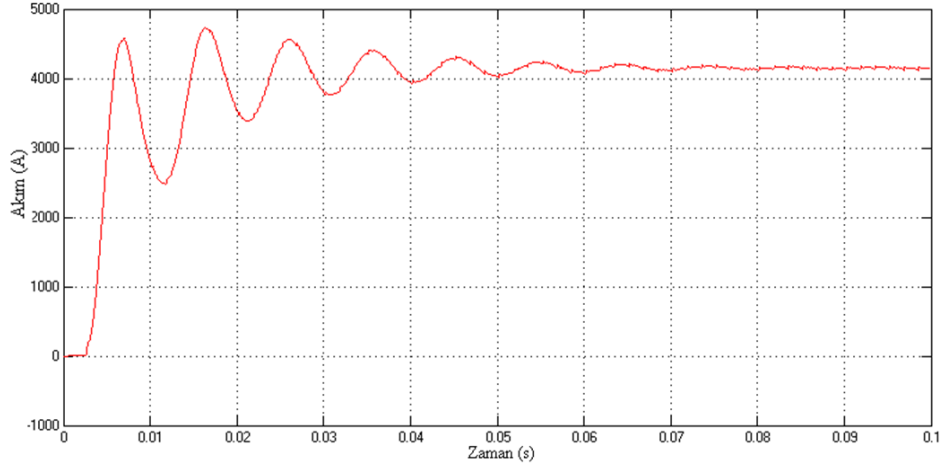


Şekil 5.17. Paralel aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da kompanzasyon sonrası elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri gösterilmiştir.

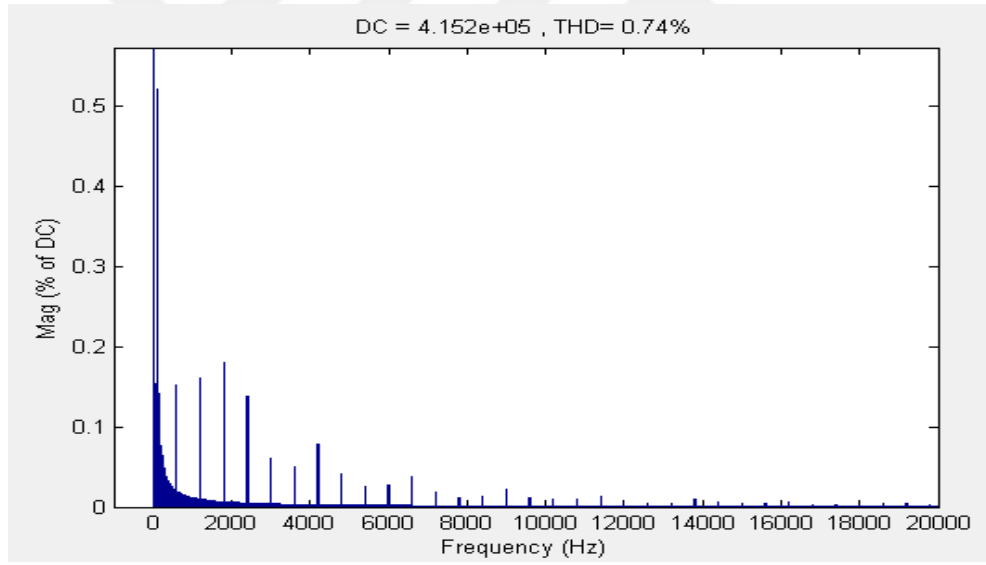


Şekil 5.18. Paralel aktif filtrelili durumda yük gerilimi

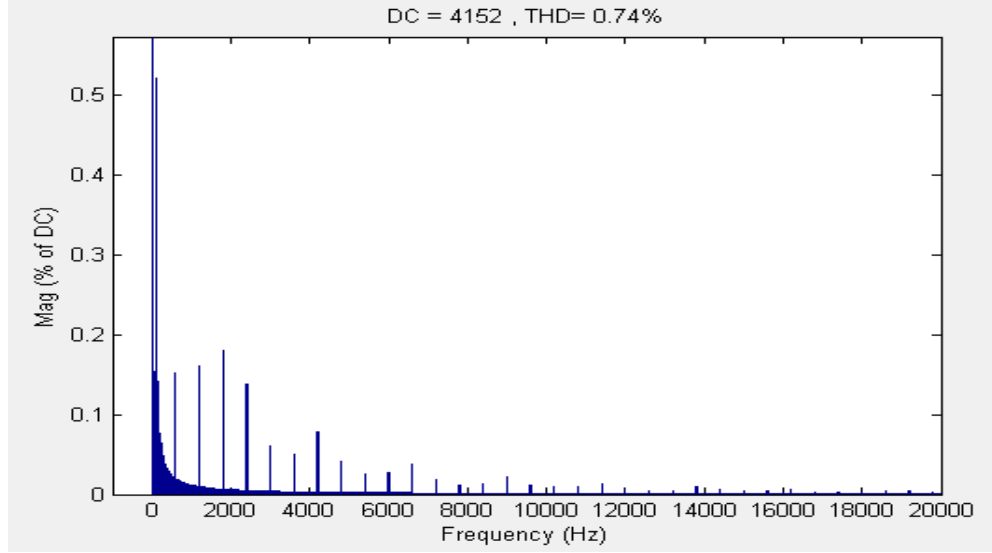


Şekil 5.19. Paralel aktif filtreli durumda yük akımı

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de simülasyon sonucunda elde edilen yük gerilimi ve yük akımı için temel bileşen değerleri ve THD grafikleri sırasıyla verilmiştir.



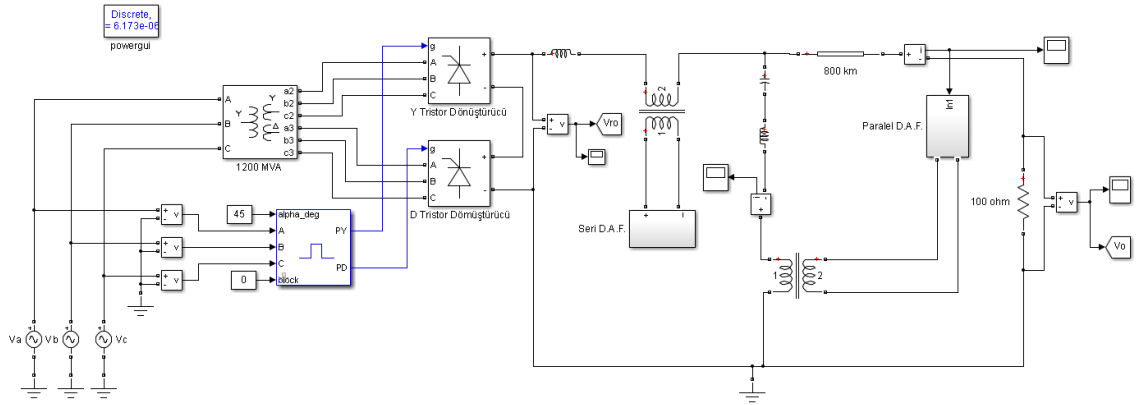
Şekil 5.20. Paralel aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri



Şekil 5.21. Paralel aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri

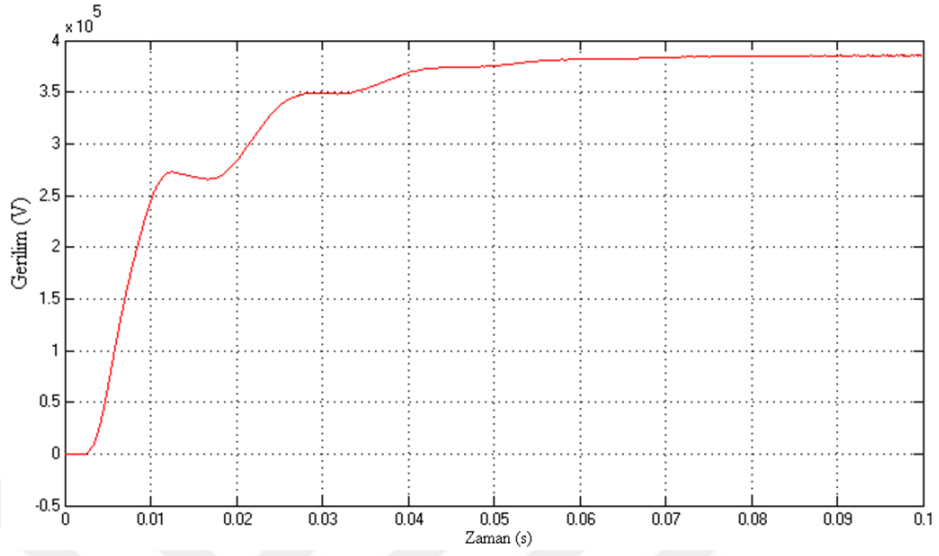
#### 5.4. Karma Aktif Filtre (Seri-Paralel Aktif Filtre)

Karma aktif filtre tasarımında seri aktif filtre ile paralel hibrit aktif filtre tasarımları birlikte kullanılmıştır. Bu tasarım sayesinde akım ve gerilim kontrolü beraber yapılmıştır. Dolayısıyla hem yük akımındaki hem de yük gerilimindeki harmonikler etkin bir şekilde bastırılmaya çalışılmıştır. Tasarlanan güç sistemi modeli Şekil 5.22’de verilmiştir.

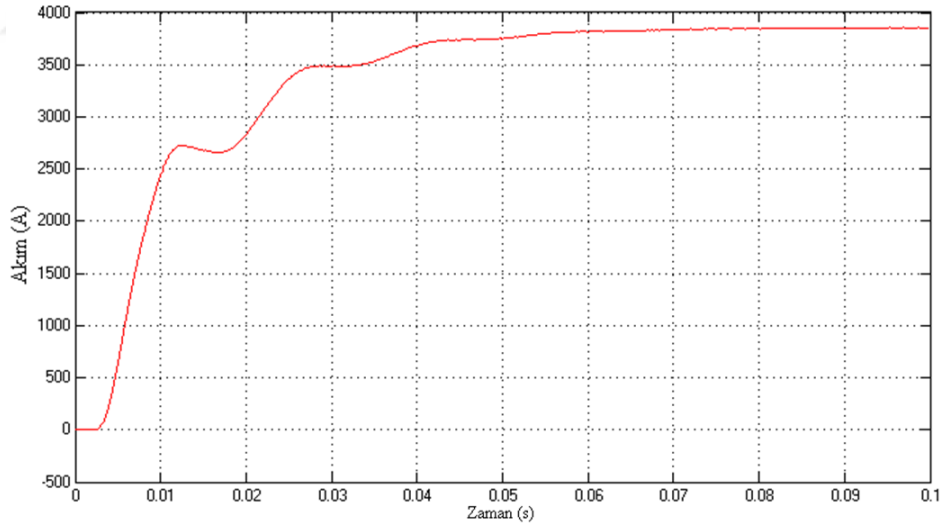


Şekil 5.22. Karma aktif filtreli YGDA iletim sistemi modeli

Kompanzasyon sonrası elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te verilmiştir.

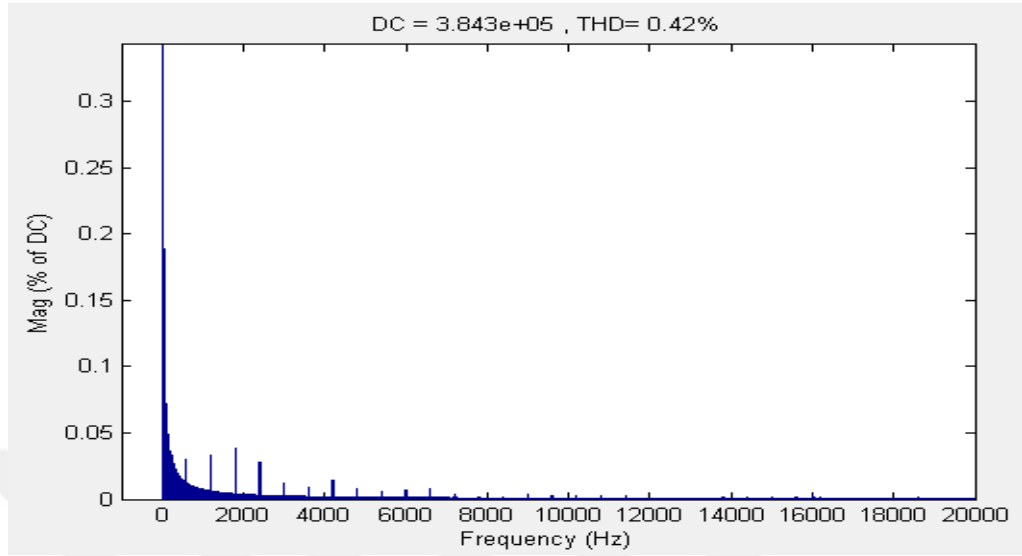


Şekil 5.23. Karma aktif filtreli durumda yük gerilimi

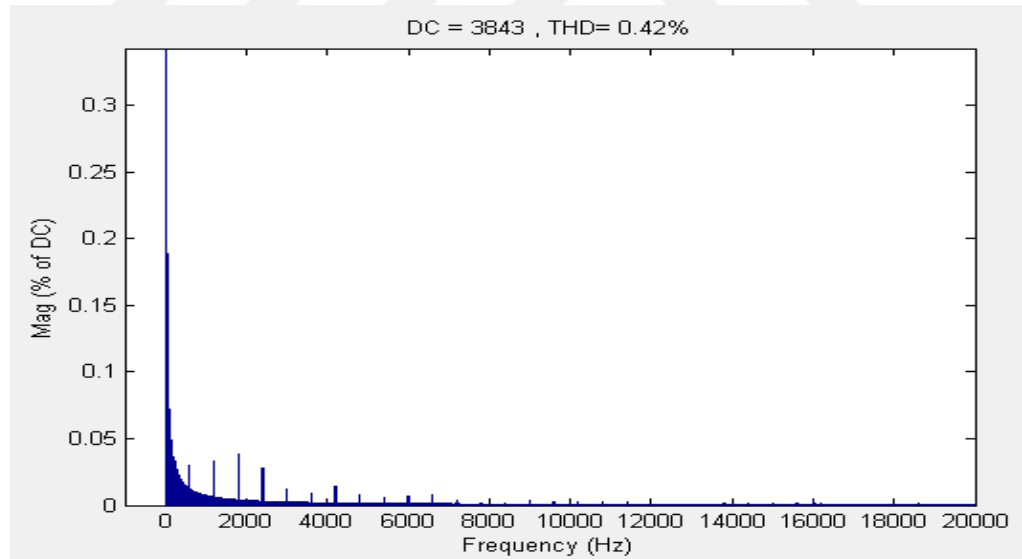


Şekil 5.24. Karma aktif filtreli durumda yük akımı

Simülasyon sonucunda elde edilen yük gerilimi ve yük akımı için temel bileşen değerleri ve THD grafikleri sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiştir.



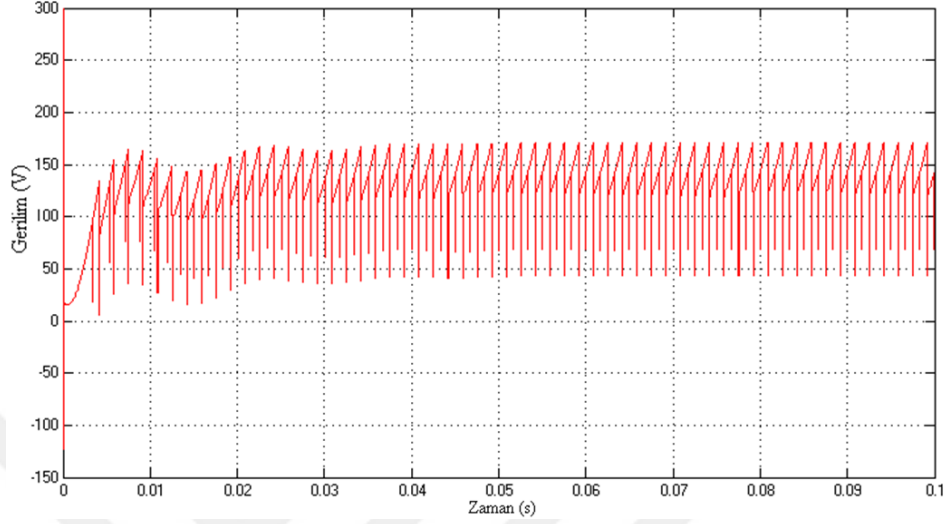
Şekil 5.25. Karma aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri



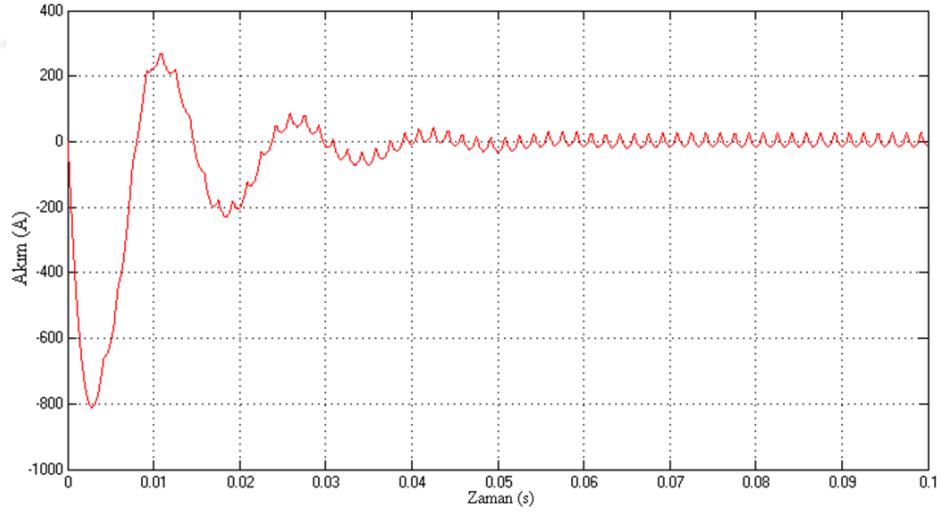
Şekil 5.26. Karma aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri



Karma aktif güç filtresi için kompanzasyon esnasında seri filtre tarafından enjekte edilen gerilim ve paralel filtre tarafından enjekte edilen akım sırasıyla Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Karma aktif filtre modelinde seri filtrenin enjekte gerilimi



Şekil 5.28. Karma aktif filtre modelinde paralel filtrenin enjekte akımı

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, önce tek kutuplu bir yüksek gerilimli doğru akım (YGDA) iletim sistemi modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu sistemde oluşan harmonikleri bastırmak için seri, paralel ve seri-paralel aktif doğru akım filtre tasarımları ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

YGDA iletim sistemi modelinde filtre kullanılmadan elde edilen Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'teki gerilim ve akım grafiklerinde, dönüştürücülerden kaynaklı harmoniklerin temel akım ve gerilim bileşenlerine sızdığı görülmektedir. Ayrıca sistemdeki transformatör ve diğer lineer olmayan elemanlardan dolayı ara harmonikler de oluşmuştur. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterildiği gibi kompanzasyon öncesi gerilim ve akım için THD değerleri % 13,51 olarak ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar IEEE tarafından belirtilen standartların ( $THD \leq 5\%$ ) oldukça üstündedir.

YGDA iletim sistemi modelinde ilk olarak Şekil 5.10'da verilen gerilim kontrollü seri aktif filtre devresi uygulanmıştır. Kompanzasyon sonrası elde edilen gerilim ve akım grafiklerinden (Şekil 5.12 ve Şekil 5.13), harmoniklerin bastırıldığı ve grafiklerin doğru akım değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Simülasyon sonucunda THD değeri % 0,80 olarak elde edilmiştir ve standartlara uygundur.

Simülasyonun ikinci aşamasında Şekil 5.16'da verilen akım kontrollü hibrit aktif doğru akım filtresi YGDA iletim sistemine uygulanmıştır. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da kompanzasyon sonrası elde edilen gerilim ve akım grafikleri gösterilmiştir. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de simülasyon sonucunda elde edilen gerilim ve akım için temel bileşen değerleri ve THD değerleri sırasıyla verilmiştir. THD değeri % 0,74 olarak ölçülmüştür ve standartlara uygun olarak elde edilmiştir. Hibrit filtre ile elde edilen THD değeri seri aktif filtre ile elde edilen değerinden daha düşük olmasına rağmen kararlılık noktasına daha geç ulaşmıştır.

Seri aktif filtrede gerilim harmonikleri başarılı bir şekilde bastırılırken, paralel hibrit aktif filtrede akım harmoniklerinin başarılı bir şekilde bastırıldığı görülmüştür.

Çalışmamızın son aşamasında, Şekil 5.22'de verilen YGDA iletim sistemine akım ve gerilim kontrollü karma aktif güç filtresi uygulanmıştır. Kompanzasyon sonrası elde edilen Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'teki gerilim ve akım grafiklerinde, harmoniklerin etkin bir şekilde bastırıldığı ve grafiklerin doğru akım değerlerine çok yaklaştığı görülmektedir. Simülasyon sonucunda THD değeri % 0,42 olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada, YGDA iletim sisteminde uygulanan aktif doğru akım filtreleri için elde edilen akım ve gerilimin temel bileşenleri ve THD değerleri Tablo 6.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 6.1.** Uygulanan filtre türleri için THD ve temel bileşenlerin karşılaştırması

<b>Filtre Durumu</b>	<b>% THD</b>	<b>Temel Bileşen (DA) Değeri</b>
Filtresiz	% 13,51	415200 V 4152 A
Sadece Seri Filtreli	% 0,80	384100 V 3841 A
Sadece Paralel Filtreli	% 0,74	415200 V 4152 A
Seri ve Paralel Filtreli	% 0,42	384300 V 3843 A

Sonuç olarak, YGDA iletim hatlarındaki harmoniklerin bastırılması amacıyla tasarlanan doğru akım aktif güç filtrelerinin uygulanması sonucunda, yük akımı ve yük gerilimi için elde edilen THD değerlerinin IEEE standartlarında belirtilen  $THD \leq \%5$  ilkesine uygun olduğu görülmüştür.

Seri aktif ve paralel hibrit filtrelerin birlikte kullanıldığı karma aktif güç filtresi uygulamasında, % 0,42’lik THD değeriyle en iyi harmonik kompanzasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda, tasarlanan filtrelerin kontrol sistemlerinde akıllı sistemler kullanılarak harmonik kompanzasyon işlemi daha hızlı gerçekleştirebilir ve dolayısıyla kararlılık noktasına daha çabuk ulaşılabilir. Ayrıca dayanma gerilimi yüksek filtre bileşenleri seçilerek, tasarlanan aktif doğru akım filtreleri Ultra YGDA iletim sistemlerinde de kullanılabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- ABB, 2015. <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages> [Ziyaret Tarihi: 21 Nisan 2015].
- Ahmed, K.H., Hamad, M.S., Finney, S.J., Williams, B.W., 2010. DC-side shunt active power filter for line commutated rectifiers to mitigate the output voltage harmonics, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, USA, 151-157.
- Akmaz, D., 2012. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması için Aktif Güç Filtre Tasarımları, Yüksek Lisans Tezi, *Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tunceli.
- Arrillaga, J., Watson, N.R., 2003. Power System Harmonics, 0-470-85129-5, *John Wiley & Sons*, Singapore.
- Barbosa, P.G., Santisteban, J.A., Watanabe, E.H., 1998. Shunt-series active power filter for rectifiers AC and DC sides, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 145, No. 6, 577-584.
- Benchouia, M.T., Ghadbane, I., Golea, A., Srairi, K., Benbouzid, M.H., 2014. Design and implementation of sliding mode and PI controllers based control for three phase shunt active power filter, *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy Environment and Sustainability*, Beirut, Lebanon, 50,504-511.
- Benchouia, M.T., Ghadbane, I., Golea, A., Srairi, K., Benbouzid, M.E.H., 2015. Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter, *Applied Soft Computing*, 28, 125–131.
- Bilge, M., 2008. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, 54.
- Bhavsar, P.R., J. Patel, P.J., 2011. Shunt active filter PSIM based simulation and analysis using p-q theory, *International Conference on Science and Engineering*, Rohtak, India, 90-93.
- Çalışkaner, H.E., 2008. Endüstriyel Tesislerdeki Harmoniklerin Eliminasyonu için Sayısal Filtre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Chaturvedi, H., Chaudhary, A.K., Veeresh, C., 2013. Simulation of three-phase bridge rectifier using Matlab/Simulink for harmonic mitigation, *International Journal of Modern Engineering Research*, 3(4), 2446-2450.

- Chunlian, J., Xinjie, Y., Jianye, C., Zanji, W., Bing, L., 2002. Harmonic detection method for HVDC DC-side active power filter, *37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington, WA, USA, 622-628.
- Dongyuan, Z., Jianye, C., Zanji, W., Yi, W., 2004. A novel composite control based active dc filter applied in HVDC system, *2nd Conf. on Power Elect. Mach. and Driv.*, Edinburgh, UK, 580-585.
- Dongyuan, Z., Jianye, C., Zanji, W., Yi, W., 2004. The active dc filter in HVDC resolved by the multiple PWM inverters, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 3889-3893.
- Efe, S.B., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- El-Mamlouk, W.M., Mostafa, H.E., El-Sharkawy, M.A., 2011. Active power filter controller for harmonic suppression in industrial distribution system, *Ain Shams Engineering Journal*, 2, 161-172.
- Erdoğan, N., 2001. Aktif Güç Filtrelerinin İncelenmesi ve Matlab ile bir Simülasyon Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 54-61.
- Erkan, E., 1996. Nonlinear Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Hajibeigy, M., Farsadi, M., Nazarpour, D., 2011. Harmonic suppression in HVDC system using a modified control method for hybrid active DC filter, *European Transactions on Electrical Power*, 22, 294-307.
- Hajibeigy, M., Farsadi, M., Asl, K.B., 2012. A modified structure of hybrid active DC filter in HVDC system, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, 4(1), 11-16.
- Hao, P., Zanji, W., 2008. Study on the control of shunt active DC filter for HVDC systems, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, 396-401.
- Jun, Y., Zehong, L., Yan, S., 1998. Studies on designs of DC filters of three Gorges to Changzhou  $\pm$  500 kV HVDC link, *International Conference on Power System Technology*, Beijing, Vol. 1, 460-465.
- Kim, C. K., Sood, V. K., Jang, G. S., Lim, S. J., Lee, S. J., 2009. HVDC transmission: power conversion applications in power systems. *John Wiley & Sons*, Singapore.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Mahajan, V., Agarwal, P., Gupta, H.O., 2014. An artificial intelligence based controller for multilevel harmonic filter, *Electrical Power and Energy Systems*, 58, 170-180.

- Mathiyalagan, G., Venkatesh, S., Ramkumar, K., Amirtharajan, R., 2014. Modelling and simulation of shunt active filter for nonlinear load, *Research Journal of Information Technology*, 6(3), 216-222.
- Mirzaee, H., Parkhideh, B., Bhattacharya, S., 2011. Design and control of series DC active filter (SDAF) for shipboard medium-voltage DC power system, *Electric Ship Technology Symposium Conference Proceedings*, 452-458.
- Mirzaee, H., Bala, S., 2013. A multi-loop control system for series DC active filter in a medium DC amplifier, *Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, Colorado, 5193 – 5198.
- Mulla, M.A., Rajagopalan, C., Chowdhury, A., 2015. A novel control method for series hybrid active power filter working under unbalanced supply conditions, *Electrical Power and Energy Systems*, 64, 328–339.
- Nowdeh, S.A., Hajibeigy, M., Hajibeigy, M., 2013. Proposed method to control the hybrid active DC filter in HVDC system, *Acta Electrotehnica*, 54(3-4), 214-220.
- Patel, R., Panda, A.K., 2014. Real time implementation of PI and fuzzy logic controller based 3-phase 4-wire interleaved buck active power filter for mitigation of harmonics with  $i_d$ – $i_q$  control strategy, *Electrical Power and Energy Systems*, 59, 66–78.
- Plaisant, A.L.R., 1997. Active Filtering of AC Harmonics from HVDC Converters, The degree of Doctor of Philosophy, *University of Waterloo*, Waterloo, Ontario, Canada.
- Rashid, M.H., 2011. Power Electronics Handbook, 978-0-12-382036-5, *Elsevier Inc.*, USA.
- Rejil, C., Anzari, M., Arun, K.R., 2013. Design and simulation of three phase shunt active power filter using SRF theory, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(6), 651-660.
- Saad, S., Zellouma, L., 2009. Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power, *Electric Power Systems Research*, 79, 1337–1341.
- Salim, C., Benchouia, M. T., Goléa, A., 2011. Harmonic current compensation based on three-phase three-level shunt active filter using fuzzy logic current controller, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 6(5), 595-604.
- Sangeetha, B., Geetha, K., 2014. Performance of multilevel shunt active filter for smart grid applications, *Electrical Power and Energy Systems*, 63, 927–932.
- Siemens, 2015. [http://www.siemens.com/about/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc\\_proven\\_technology.pdf](http://www.siemens.com/about/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc_proven_technology.pdf) [Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2015]

- Skvarenina, T.L., 2002. The Power Electronics Handbook, 0-8493-7336-0, *CRC Press LCC*, Indiana.
- Sucu, M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ucar, M., Sule Ozdemir, S., Ozdemir, E., 2010. A combined series-parallel active filter system implementation using generalized non-active power theory, *25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Palm Springs, California, 367-373.
- Uyar, M., 2008. Güç Kalitesindeki Bozulma Türlerinin Akıllı Örüntü Tanıma Yaklaşımları İle Belirlenmesi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 11-26.
- Wang, D., Ge, S., Li, J., Wang, B., Song, K., Liu, X., Li, Y., 2010. Hybrid active power filter DC bus control based on double fuzzy control, *Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing*, Wuhan, China, 287-290.
- Wong, C., Mohan, N., Wright, S.E., Mortensen, K.N., 1989. Feasibility study of AC- and DC-side active filters for HVDC converter terminals, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.4, 2067-2075.
- Xiao, G., Liu, J., Yang, J., Wang, Z., 2000. The experimental studies on active power filter for HVDC system, *3rd Int. Power Electronics and Motion Control Conf.*, Beijing, China, 1376-1379.
- Xiao, L.J., Zhang, L., 2000. Harmonic cancellation for HVDC systems using a notch-filter controlled active DC filter, *IEEE Proc.-Gener. Transm.Distrib.*, Vol. 147. No. 3, 176-181.
- Zhang, W., Asplund, G., Aberg, A., Jonnson, U., Löf, O., 1993. Active DC filter for HVDC system-a test installaton in the Konti-Skan DC link at Lindome converter station, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No.3, 1599-1606.
- Zhang, W., Asplund, G., 1994. Active DC filter for HVDC systems, *IEEE Computer Applications in Power*, 40-44.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Murat AKDEMİR  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Diyarbakır - 01.07.1988  
**Telefon** : 90 (484) 223 12 24 /3098  
**E-posta** : muratakdemir@siirt.edu.tr

### EĞİTİM

Derece		Bitirme Yılı
Lise	: Diyarbakır Anadolu Lisesi, DİYARBAKIR	2006
Üniversite	: Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ANKARA	2011

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-Devam Ediyor	Siirt Üniversitesi, Müh.-Mimarlık Fak., Elek.-Elektronik Müh. Bölümü	Araştırma Görevlisi

**UZMANLIK ALANI** : Elektrik Tesisleri

**YABANCI DİLLER** : İngilizce (YDS: 75, 2015)