

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALÇAK GERİLİM ŞEBEKELERİ İÇİN ÜÇ FAZLI AKTİF  
FİLTRE TASARIM VE BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NASEER MOHAMMAD RUSTAMI**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ALÇAK GERİLİM ŞEBEKELERİ İÇİN ÜÇ FAZLI AKTİF  
FİLTRE TASARIM VE BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NASEER MOHAMMAD RUSTAMI**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

Naseer Mohammad RUSTAMİ

## ÖZET

### ALÇAK GERİLİM ŞEBEKELERİ İÇİN ÜÇ FAZLI AKTİF FİLTRE TASARIM VE BENZİTİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
NASEER MOHAMMAD RUSTAMİ  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. SELİM KÖROĞLU)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

Elektrik tesislerinde doğrusal olmayan yükler artışı beraberinde harmonik bozulmaları meydana getirmektedir. Önemli güç kalitesi problemi olan harmoniklerin giderilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada alçak gerilim şebekeleri için üç fazlı aktif filtre tasarım ve benzetim çalışması yapılmıştır.

Tez çalışmasında, ilk olarak aktif güç filtreleri üzerine literatür taraması yapılmıştır. Harmonik tanımlamaları, harmoniklerin elektrik şebekelerinde etkileri ve toplam harmonik bozulma limitleri gibi hususlar değerlendirilmiştir. Tez çalışmasında alçak gerilim şebekeleri için şönt aktif filtre tasarım ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aktif filtre tasarımında anlık reaktif güç ve güç denge teorisi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin filtreleme performansı nonlinear yük davranışı sergileyen üç fazlı tam dalga doğrultuculu sistem üzerinden incelenmiştir. Harmoniklerin giderilmesi için önerilen iki yöntemin performans karşılaştırılması yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Aktif filtre, Dağıtım şebekesi, Güç faktörü, Harmonikler, Pq teori.

## **ABSTRACT**

### **THREE PHASE ACTIVE FILTER DESIGN AND SIMULATION FOR LOW VOLTAGE NETWORKS**

**MSC THESIS**

**NASEER MOHAMMAD RUSTAMI**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. SELİM KÖROĞLU)**

**DENİZLİ, JULY 2022**

Current harmonics occur due to increase of non-linear loads in electrical grids. In recent years, elimination of current harmonics has gained great importance for energy quality in power grids. In this study was investigated Three Phase Active Power Filter Design and Simulation for Low Voltage Networks.

In this thesis literature review has made on active power filters, issues such as harmonic definitions, effects of harmonics on electrical networks and Total Harmonic Distortion (THD) limits have been evaluated. In addition, shunt active filter design and simulation studies were carried out for low voltage networks. In this approach instantaneous reactive power and power balance theory applied and filtering performance of the two-method investigated on a three-phase full-wave rectifier system that exhibits behavior of nonlinear loads. The performance of the two proposed methods for the elimination of harmonics has been evaluated.

**KEYWORDS:** Active filter, Distribution network, Power factor, Harmonics, Pq theory.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SYMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>KISITMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Özeti .....	2
1.3 Tezin Kapsamı.....	5
<b>2. HARMONİK TANIMLAMALARI</b> .....	<b>6</b>
2.1 Giriş .....	6
2.2 Fourier Serisi .....	8
2.2.1 Fourier Serililerin Tanımları .....	9
2.3 Harmonikler ile İlgili Kavramsal Tanımlamalar .....	10
2.3.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu .....	11
2.3.2 Toplam Talep Distorsiyonu .....	12
2.3.3 Harmonik Distorsiyonu.....	12
2.4 Harmonik Distorsiyonu Seviyeleri .....	13
2.4.1 Gerilim Harmonikleri için Sınır Değerler.....	13
2.4.2 Akım Harmonikler için Sınır Değerler .....	13
<b>3. DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE HARMONİKLERİN ETKİSİ</b> .....	<b>15</b>
3.1 Transformatörler Üzerindeki Termal Etkiler.....	16
3.2 Generatör Dalga Şeklinin Bozulması .....	16
3.3 Kondansatör Bankaları Üzerindeki Çeşitli Etkiler .....	17
3.4 Şebeke Üzerindeki Etkileri.....	18
3.5 Harmoniklerin Aydınlatma Cihazları Üzerindeki Etkileri .....	18
3.6 Harmoniklerin Güç Faktör Üzerindeki Etkileri.....	19
<b>4. DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ</b> .....	<b>20</b>
4.1 Giriş .....	20
4.2 Harmoniklerin Giderilmesi için Akım Filtrelerinin Kullanılması.....	20
4.2.1 Pasif Güç Filtreleri.....	21
4.2.1.1 Seri Pasif Güç Filtreleri.....	21
4.2.1.2 Paralel (Şönt) Pasif Güç Filtreleri .....	22
4.2.2 Aktif Güç Filtreleri .....	23

4.2.3	Topoloji Tabanlı Sınıflandırma .....	24
4.2.3.1	Paralel Aktif Güç Filtreleri.....	24
4.2.3.2	Seri Aktif Güç Filtreleri .....	24
4.2.3.3	Üniversal Aktif Filtre .....	25
4.2.3.4	Hibrit Aktif Filtresi .....	25
4.2.4	Dönüştürücü Tabanlı Sınıflandırma.....	26
4.2.5	Besleme Sistem Tabanlı Sınıflandırma.....	27
<b>5.</b>	<b>PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ TASARIM VE BENZETİMİ.....</b>	<b>28</b>
5.1	Giriş .....	28
5.2	Parelel AGF'nin Prensip Modeli .....	29
5.3	Parelel AGF'lerinin Referans Akım Üretme Yöntemleri.....	30
5.3.1	PQ-Anlık Reaktif Güç Teorisi .....	31
5.3.2	Güç Denge Teorisi (Power Balance Theory).....	36
5.3.2.1	Güç Denge Teorisi MATLAB/SIMULINK Modeli .....	38
5.4	PAGF'nin Benzetim Modeli .....	38
5.4.1	Kaynak Bölümü .....	39
5.4.2	Yük Bölümü.....	39
5.4.3	Filtre Bölümü.....	40
5.4.3.1	PI Kontrolü.....	40
5.4.3.1.1	Akım Kontrolü.....	41
<b>6.</b>	<b>BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>42</b>
6.1	Giriş .....	42
6.2	Örnek Sistem .....	42
6.2.1	A Yüğü için Sistemin Analizleri.....	42
6.2.1.1	Filtresiz Sistemin Analizi .....	43
6.2.1.2	Anlık Reaktif Güç Yöntemiyle (pq teori) Sistemin Analizi....	44
6.2.1.3	Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi .....	46
6.2.2	B Yüğü için Sistemin Analizleri .....	48
6.2.2.1	Filtresiz Sistemin Analizi .....	49
6.2.2.2	Anlık Reaktif Güç Teori Yöntemiyle Sistemin Analizi.....	50
6.2.2.3	Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi .....	52
6.3	Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması .....	54
<b>7.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>56</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>57</b>
<b>9.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>61</b>
<b>10.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>64</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1: Lineer sistem.....	15
Şekil 3.2: Lineer olmayan sistem .....	15
Şekil 3.3: Kapasitör bankaları için çalışma limitleri.....	17
Şekil 4.1: Kaynak ve yük arası bağlayan seri pasif filtre.....	22
Şekil 4.2: Paralel pasif filtre.....	22
Şekil 4.3: Paralel aktif güç filtresi.....	24
Şekil 4.4: Seri aktif filtresi .....	25
Şekil 4.5: Üniwersal aktif filtresi .....	25
Şekil 4.6: Hibrit aktif filtresi .....	26
Şekil 4.7: Akım beslemeli paralel aktif güç filtresi .....	26
Şekil 4.8: Gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi .....	27
Şekil 5.1: Lineer ve lineer olmayan yüke sahip olan örnek bir sistem .....	28
Şekil 5.2: Lineer yük durumunda akım dalgası .....	28
Şekil 5.3: Lineer Olmayan Yük Olması Durumunda Akım Dalgası .....	29
Şekil 5.4: Paralel aktif filtrenin genel şeması.....	30
Şekil 5.5: Referans akım üretmesi .....	31
Şekil 5.6: Üç fazlı abc sistemden iki fazlı $\beta$ - $\alpha$ sisteme dönüşümü.....	32
Şekil 5.7: a-b-c koordinatında $\tilde{p}$ , $\overline{p0}$ ve $\overline{p0}$ kompanzasyon edilecek gücü .....	33
Şekil 5.8: Anlık reaktif güç teorisinin genel şeması .....	35
Şekil 5.9: MATLAB/SİMULINK ortamında pq teori kodlaması.....	35
Şekil 5.10: Güç denge teorisinin genel şeması .....	36
Şekil 5.11: MATLAB/SIMULINK ortamında güç denge teorisi kodlaması....	38
Şekil 5.12: Şebekenin genel modeli .....	39
Şekil 5.13: PI kontrolü .....	40
Şekil 5.14: Histerezis akım kontrolü.....	41
Şekil 6.1: Şebekenin filtresiz durmu .....	43
Şekil 6.2: Yük gerilimi.....	43
Şekil 6.3: Kaynak akımı.....	43
Şekil 6.4: Filtresiz sisteminde oluşan harmonikleri .....	44
Şekil 6.5: Şebeke ve Pq Teorisinin Genel Şeması .....	45
Şekil 6.6: Kompanzasyon akımı .....	45
Şekil 6.7: Kompanzasyon edildikten sonra kaynak akımı .....	45
Şekil 6.8: Pq teorisi yöntemiyle yapılan filtreleme sonrası A yüküne ait A, B, C fazlarının THD analiz sonuçları.....	46
Şekil 6.9: Güç denge teorisiyöntemli aktif filtre yöntemin genel şeması .....	47
Şekil 6.10: a) Kompanzasyon akımı, b) Düzetmiş kaynak akımı .....	47
Şekil 6.11: Güç denge teorisi yöntemiyle yapılan filtreleme sonrası A yüküne ait A, B, C fazlarının THD analiz sonuçları.....	48
Şekil 6.12: Filtresiz sistemin genel şeması.....	49
Şekil 6.13: Şebeke gerilimi .....	49
Şekil 6.14: B yükü bağlı iken çekilen harmonikli akım.....	49
Şekil 6.15: B yükü bağlı iken filtresiz durumda A, B, C fazların THD analiz sonuçları.....	50
Şekil 6.16: B yükü bağlı iken anlık güç teorisi yöntemiyle kurulan aktif filtre modelinin genel şeması .....	51



Şekil 6.17: B yükü bağlı iken anlık reaktif güç teorisi yöntemiyle elde edilen kompanzasyon akımı .....	51
Şekil 6.18: B yükü bağlı iken anlık reaktif güç teorisi yöntemiyle kompanzasyon edildikten sonraki kaynak akımı .....	51
Şekil 6.19: B yükü bağlı iken anlık güç teorisi yöntemiyle yapılan aktif filterinin THD sonuçları .....	52
Şekil 6.20: B yükü için güç denge yöntemiyle kurulan aktif filtre modeli .....	53
Şekil 6.21: B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle elde edilen kompanzasyon akımı.....	53
Şekil 6.22: B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle kompanzasyon edildikten sonraki kaynak akımı .....	53
Şekil 6.23: B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle yapılan aktif filterinin THD sonuçları.....	54

## TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1: IEEE St. 519-2014 Voltaj bozulma limitleri .....	13
Tablo 3.2: IEEE St. 519-2014, 120V ile 69 KV arası Akım bozulma limitleri.....	14
Tablo 4.1: Aktif ve pasif filtre karşılaştırılması.....	23
Tablo 5.1: $\tilde{p}$ , $q$ , $\tilde{p0}$ ve $\overline{p0}$ açıklaması.....	34
Tablo 5.2: Yük bölümü .....	40
Tablo 6.1: A yükü için THD analiz sonuçları .....	55
Tablo 6.2: B yükü için THD analiz sonuçları .....	55

## SYMBOL LİSTESİ

$F(\omega)$	: Fourier dönüşümü
$f(t)$	: Fourier ters dönüşümü
$\emptyset$	: Faz açısı
$V_{rms}$	: Gerilim etkin değeri
$I_{rms}$	: Akım etkin değeri
$I_{sc}$	: Kısa devre akımı
$I_L$	: Maksimum talep yük akımı
$Q_{VAR}$	: Reaktif gücü
$Dv_n$	: Gerilim düşümü
$Ph$	: Ek kayıplar
$I_n$	: n. Harmonik akımın bileşeni
$R_n$	: n. harmonik frekansındaki omik direnci
$G_f$	: Güç faktörü
$P$	: Gerçek gücü
$S$	: Görünür gücü
$(v_a, v_b, v_c)$	: Nötr ile faz arası gerilimi
$(i_a, i_b, i_c)$	: Yük akımı
$(v_0, v_\alpha, v_\beta)$	: $\alpha\beta 0$ koordinatında gerilim
$P_0$	: Anlık sıfır bileşen gücü
$\bar{p}_0$	: Sıfır bileşen gücü (DC)
$\tilde{p}_0$	: Alternatif Sıfır bileşen gücü (AC)

## KISITMALAR LİSTESİ

<b>PAGF</b>	:	Paralel Aktif Güç Filtreleri
<b>THD</b>	:	Toplam Harmonik Distorsiyon
<b>İEEE</b>	:	Institute of Electrical and Electronic Engineering
<b>THD<sub>v</sub></b>	:	Toplam Harmonik Distorsiyonu (Gerilim için)
<b>THD<sub>i</sub></b>	:	Toplam Harmonik Distorsiyonu (Akım için)
<b>IEC</b>	:	(İnternational Electrotechnical commission) Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
<b>ABD</b>	:	Amerika Birleşik Devletleri
<b>TTD</b>	:	Toplam Talep Distorsiyonu
<b>HD</b>	:	Harmonik Distorsiyonu
<b>PCC</b>	:	Point of Common Coupling (Ortak Bağlantı Noktası)
<b>PGF</b>	:	Pasif Güç Filtreleri
<b>AGF</b>	:	Aktif Güç Filtreleri
<b>PWM</b>	:	Pulse Width Modulation (Köprü Evirici Yapısı)
<b>IGBT</b>	:	İnsulated Gate, Bipolar, Transistor
<b>AHS</b>	:	Ayartabilir Hız Sürücüleri
<b>PI</b>	:	Proportional integral
<b>DA</b>	:	Doğru Akım
<b>HBAT</b>	:	Histerezis Bant Akım Kontrol Tekniği
<b>FFT</b>	:	Fast Fourier Transform
<b>AC</b>	:	Alternative Current
<b>DC</b>	:	Direct Current
<b>PAGF</b>	:	Paralel Aktif Güç Filtreleri

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, Alçak Gerilim Şebekeleri İçin Üç Fazlı Aktif Filtre Tasarım ve Benzetimi adlandıran tezin baştan sonuna kadar, öğrenim sırasında, derslerimin seçiminde, araştırmalarım ve tezin yürütülmesinde hep yanımda olan ve beni destekleyen sayın danışmanım Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na teşekkür ediyorum.

Akademik hayatımda beni hep destekleyen ve hiçbir zaman mâni ve manevi yardımlarını esirgemeyen, hayatımın her aşamasında yanımda olan değerli aileme teşekkür ediyorum.

**Naseer Mohammad RUSTAMİ**

Denizli, Ağustos-2022

# 1. GİRİŞ

Günümüz güç sistemlerinde lineer olmayan yüklerin artırılması beraberinde güç kalitesi sorunlarını getirmektedir. Bunların başında harmonik bozulmalar gelmektedir. Elektrik tesislerinde güç elektroniği ekipman kapasitesinin hızlı büyümektedir. Tesiste bulunan aygıtların yaklaşık %10 ile %20'si güç elektroniği tabanlı ekipman tarafından işletilmektedir (Gopal & Yarnagula, 2014), (Akagi, Nabae, & Atoh). Bu sistemler genellikle lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahiptir ve tesiste harmonik bileşenlere neden olmaktadır. Harmonikler; elektrik sistemlerinde güç faktörünün azaltılması, düşük verimlilik, güç sisteminde gerilim dalgalanmaları ve elektromanyetik girişim gibi problemleri ortaya çıkartmaktadır. Dolayısıyla harmonik problemlerin önlenmesi veya azaltılması yönünde çözümlerin sunulması güç kalitesi açısından oldukça önemlidir. Harmoniklerin azaltılması yönünde en etkin çözümlerden birisi filtreleme teknikleridir (Akagi ve diğ. 1986).

Harmonik problemleri genelde yük kaynaklı olmaktadır. Silikon kontrollü doğrultucular, güç transistörleri, mikroişlemci kontrolleri gibi güç elektroniği temelli doğrusal olmayan yükler güç sistemlerinde önemli harmonik artışlarına sebep olmaktadır. Bu açıdan bu tür kaynaklarının tasarım aşamasına dikkat edilmeli yetersiz ve aşırı tasarımlardan kaçınılmalıdır.

Bilindiği üzere harmonikler başlıca güç kalitesi problemlerinden olup elektrik tesislerinde güç faktörünün azalması, düşük verimlilik, güç sisteminde gerilim dalgalanmaları ve elektromanyetik girişim gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla güç kalitesi açısından bu problemin çözülmesi gerekmektedir. Bu amaçla harmonikleri elimine edilmesi amacıyla filtreler kullanılmaktadır. Bu filtreler aktif ve pasif olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Pasif filtreler ekonomik olmakla birlikte büyük hacimli, dağıtım şebekesini rezonansa sokması gibi dezavantajlara sahiptir. Aktif filtreler ise daha esnek bir yapıya sahiptir. Aktif filtre harmoniklin düzeltilmesine etkin bir şekilde kullanılabilir. Bunlara ilaveten dağıtım şebekelerinde akım-harmonik kompensatörü olarak kullanılır ve şebekeye dengeleyici akımlar vererek şebekenin güç faktörünün düzeltilmesine de katkı sağlar.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, güç sistemlerinde kullanılan aktif filtre yapıları ve kontrol yöntemleri hakkında araştırma yapılmıştır. Alçak gerilim şebekelerinde var olan lineer olmayan yüklerin oluşturduğu harmonikleri elimine etmek için üzere üç fazlı şönt aktif filtre tasarım ve benzetim çalışmaları hedeflenmiştir. Aktif filtre tasarımında anlık reaktif güç ve güç denge teorisi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmış ve yöntemlerin filtreleme performansı incelenmiştir. Harmoniklerin giderilmesi için önerilen iki yöntemin performans karşılaştırılmıştır.

## 1.2. Literatür Özeti

Günümüzde, doğrusal olmayan ekipmanların sayısı artmaktadır. Buna bağlı olarak şebekede akım ve gerilim bozulmaları yani harmonikler meydana gelmektedir. Güç kalitesi sorunlarından olan bu harmoniklerin giderilmesi için pasif ve/veya aktif filtreler kullanılmaktadır. Pasif filtreler düşük maliyetli olmalarına rağmen verimleri yüksek değildir. Aktif filtreler pasif filtrelerle karşılaştırıldığında kontrol edilebilir filtreleme aralığı, küçük hacim, yüksek verim, esnek yapı vb. üstünlüklere sahiptir. Ancak bu üstünlüklerin yanında daha yüksek maliyetlidir. Bunun için küçük tesislerde kullanılması çok ekonomik olmaktadır. Fakat yukarıda bahsedilen üstünlükleri nedeniyle aktif filtreler güç sistemlerinde uygulama alanı bulmakta olup literatürde konuyla ilgili birçok araştırma çalışması yapılmıştır. Aktif filtre harmonik akımlara ters yönlü akım enjekte etme prensibe göre çalışmaktadır. Bunun için uygun kompanzasyon akımının hesaplanması gerekir. Aktif filtrelerde kompanzasyon akımı hesaplamasında kullanılan yöntemlerde birisi anlık reaktif güç teorisi (p-q teorisi) yöntemidir. Bu yöntemde a-b-c koordinat sisteminde  $\alpha$ - $\beta$ -0 koordinatörüne dönüş yaparak kompanzasyon akımı hesaplayabilmek mümkündür. Bu yöntem kullanılarak yapılan bir şönt aktif filtre çalışmada, toplam harmonik bozulma oranı %15,4'ten %1,96'e düşürülmüştür (Mahajan ve diğ. 2011).

Yapılan bir çalışmada, AC şebekede AC-DC güç kaynağına doğrusal olmayan bir yük karakteristiği nedeniyle oluşturduğu harmonikleri elimine edilmesi amacıyla paralel aktif filtre tasarlanmıştır. Sistemin MATLAB/SİMULİNK benzetimi yapılarak akım harmoniklerinin etkisi farklı vakalar için hesaplanmış ve performans

karşılaştırılması yapılmıştır (Gopal ve Yarnagula 2014). Elde edilen benzetim sonuçları AC-DC güç kaynağına bağlanan lineer olmayan bir yükün performansı şebekede düzenleyici olup olmadan analiz edilmiş ve sonuç itibarıyla düzenleyicinin şebekede olmasının etkili olduğunu görülmüştür.

Paralel aktif güç filtreleri (PAGF), meydana gelen harmonikli akımlarına karşı miktar olarak eşit ve faz olarak  $180^0$  zıt bir akımı aktarır. Böylece sistemin hem güç kalitesi ve hem de güç faktörünü düzeltilmiştir (Akagi ve diğ. 1986). PI kontrolör tabanlı şönt aktif güç fitresi reaktif güç ve harmonikleri kompanzasyon elde edilmesi için MATLAB/SİMULİNK üzerinden benzetim çalışması yapılmıştır. Böylelikle harmonik akımların filtrelenmesiyle şebekenin güç kalitesinde artış sağlanmıştır (Gopal ve Yarnagula 2014).

Diğer bir çalışmada, üç fazlı dengeli ve dengesiz yüklerine sahip olan bir dağıtım şebeke üzerinde aktif filtre için sinüzoidal darbe genişliği metodu kullanılmış ve tasarlanan sistemin benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç fazlı dengeli ve dengesiz yüke sahip olan bir şebekede toplam harmonik bozulma oranı üç fazlı aktif filtreler varken ve yokken incelenmiştir. Dengeli yüklerde, filtre şebekede yokken toplam harmonik bozulma oranı (THD) 0,1725 iken filtre şebekeye dahil edildiğinde bu oranın 0,0726'ya indiği gözlenmiştir. Dengesiz yüklerde ise filtre şebekede yokken THD 0,3537 iken ve filtre şebekeye dahil edildiğinde bu oranın 0.1912'ye indiği görülmüştür (Vanajakshi ve Rao 2015). Sonuçlar akım harmoniklerinin azaltıldığını ve güç faktörünün düzeldiğini göstermektedir.

Paralel aktif filtre ile ilgili yapılan çalışmada, şebekeye bağlı üç fazlı tristör kontrollü R-L yükün şebekeden çektiği harmonik akımını filtrelenmesi incelenmiştir. Çalışmada histerezis akım kontrol yöntemi, aktif filtrenin çıkış akımı ile hesaplanan referans akımı karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamalarda kolay uygulanabildiği gösterilmiştir. Histerezis kontrolör sayesinde filtre akımları referans akımlarını doğru şekilde takip etmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında filtre olmadan toplam harmonik bozulma oranı %32,63 iken filtre şebekeye girildiğinde toplam harmonik bozulma oranı %6,04'e indirilmiştir (Gündüz ve diğ. 2020).

Yapılan bir çalışmada, üç fazlı tristör dalga (köprü) doğrultucusunun ateşleme açısını  $0^0-120^0$  arası değiştirilerek aktif fitrenin performans analizi incelenmiştir. Anlık



reaktife güç teorisi (P-q teorisi) tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Benzetim çalışması sonuçlarına göre beklenildiği gibi şönt aktif filtre sisteme girince THD düşmektedir. Ayrıca tristörün ateşleme açısı azalttıkça harmoniklerin THD oranının düşüş meydana geldiği gözlenmiştir (CUI ve diğ. 2007).

Diğer bir çalışmada ise, şönt aktif filtre için anlık reaktife güç teorisini (p-q teorisine) tabanlı bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Sistemin benzetimleri dengeli ve dengesiz olmak üzere iki yük grup için yapılmıştır. Sonuçta, akım harmonikleri dinamik olarak kompanzasyon edilmesi, güç faktörü dinamik olarak düzeltilmesi, sıfır bileşen akımın dinamik ve ani olarak telafi edilmesi sunulmuştur (Afonso ve diğ. 2003).

Diğer bir çalışmada, anlık reaktif güç teorisi tabanlı üç fazlı şebeke üzerinde MATLAB/SIMULINK ortamında harmonik eliminasyonu için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, üç fazlı diyot doğrultucuya RL paralel yük bağlantılı olarak tasarlanmıştır. Sistemin analizi filtersiz ve filtreli şeklinde iki ayrı durumda yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, paralel aktif güç fitresi şebekeye girince toplan harmonik distorsiyonu IEEE-512 standartlarına göre %5'ten aşağıya indirilmiştir (Sanam ve diğ. 2021).

Başka bir çalışmada, aktif filtreler için anlık reaktif güç teorisi (pq teorisi), senkron referans çerçevesi (dq) ve dolaylı kontrol stratejisi (ID teorisi) tabanlı yöntemlerle benzetimler gerçekleştirilmiştir. Lineer olmayan yük olarak toplam gücü 5 kW olan doğrudan şebekeye bağlı üç fazlı bir doğrultucu kullanılmıştır. Dengesiz yük ise A fazına bağlı öz direnç şeklinde bir yük olarak tanımlanmıştır. Makalede, pq, dq ve Continuous Integration (CI) kontrol kestiricisi kullanarak aktif filtrenin akım harmonikleri ve dengesizliğin filtreleme performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, yöntemlerin filtreleme performanslarının birbirinden farklı olduğunu göstermiştir. Pq teorisinde THD oranı %2,85, dq teorisinde THD oranı A fazda %1,91, B fazında %2.19 ve C fazında ise %2,60 ve son olarak CI teorisinde THD oranı A fazda %2,67, B fazında %2.97 ve C fazında ise %3.22 olduğunu göstermiştir (Munteanu ve diğ. 2012).

Harmonik kaynaklarından olan güç elektroniği çeviricilerinin meydana getirdiği harmonikler için aktif filtreme benzetim çalışması literatürde sunulmuştur.

Aktif filtre şebekeye yokken gerilim için THDv %38 iken filtre şebekeye girince gerilimin THDv %3,7 seviyelerine düşmüştür. Ayrıca akım için toplam harmonik bozulma oranı THDi değeri de %124 seviyesinden %3,7 seviyesine düşürülmüştür (Efe 2016).

Günümüzde güç elektroniği, endüstride genlik ve frekans kontrollü bir gerilime sahip yükleri beslemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler temel olarak doğrusal olmayan yükler olarak yüksek harmonik içerikli akımlar üreten doğrultucular ve eviricilerden oluşur. Gerilim harmonik bozulma ile ilgili mevzuatın yerine getirilmesi için düzeltici faaliyetlerin devreye alınması gerekmektedir. Bu düzeltici eylemler arasında aktif filtreler en etkili olanlardan biridir. Bu filtrelerin tasarımı için simülasyonun çok kullanışlı bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Harmonik bozulmanın azaltılması için aktif bir filtrenin MATLAB/SIMULINK ile benzetimleri başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Bir çelik tesisi ve bir yeraltı çekiş sistemi için iki örnek olarak sunulmuştur. Gerçekleştirilen benzetim çalışması ile bir yeraltı cer sistemi ve bir çelik fabrikasının oluşturduğu gerilim ve akım harmonik bozulmaları modellenmiştir. Ayrıca, aktif bir filtre tarafından bozulmanın azaltılması her iki sistem için de simüle edilmiştir (Zamora ve diğ. 2003).

### **1.3. Tezin Kapsamı**

Bu tez çalışmada beş ana bölümü kapsamaktadır. Birinci bölümde, tezin giriş kısmı yer almaktadır. İkinci bölümde, harmonik tanımlamaları, harmoniklerin elektrik şebekelerinde etkileri yer almaktadır. Dağıtım şebekelerinde harmoniklerin filtrelenmesi üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde, şönt aktif güç filtresi tasarımı ve benzetimi yer almaktadır. Beşinci bölümde, benzetim sonuçları verilmiş, harmoniklerin giderilmesi için öneren iki yöntemin karşılaştırılması yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

## 2. HARMONİK TANIMLAMALARI

### 2.1 Giriş

Harmonikler, elektrik sistemlerinde güç faktörünün azaltması, düşük verimlilik, güç sisteminde gerilim dalgalanmaları ve iletişim paraziti gibi problemlerine neden olmaktadır (Akagi ve diğ. 1986). Elektrik güç kalitesi ile ilgili uluslararası standartlar (IEEE-519, IEC 61000, EN 50160) harmoniklerinin sınır limitleri hakkında bilgi vermekte olup elektronik ekipmanların harmonik bozuluma oranlarını sınırlamaktadır (Mahajan ve diğ. 2011).

Tüketicilere sunulan elektrik enerjisi belli kalite standardına sahip olmalıdır. Bunlardan birisi de gerilim olup ideal olarak tam sinüzoidal olmalı ve harmonik içermemelidir. Ancak gerçek sistemlerde bir dizi nedenden dolayı, kamu hizmetleri genellikle bu tür istenen koşulları sağlamakta zorlanmaktadır. Gerilim ve akım dalga biçimlerinin sinüzoidalden sapması, genellikle harmonik bozulma olarak ifade edilen dalga biçimi bozulması cinsinden tanımlanır. Harmonik bozulma yeni değildir ve şu anda enerji endüstrisinde enerji kullanımının çeşitli aşamalarında mühendisler için ana endişelerden birini oluşturmaktadır. İlk elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulma, esas olarak transformatörlerin, endüstriyel ark ocaklarının ve büyük elektrik kaynak makineleri gibi diğer ark cihazlarının doygunluğundan kaynaklanıyordu. En büyük endişe, harmonik bozulmanın elektrikli makineler üzerindeki etkisi, telefon paraziti ve güç faktörü düzeltme kapasitörlerinde geliştirilen aşırı gerilim koşullarından kaynaklanan artan dağıtım trafolarında delta-topraklı yıldız bağlantılarının ortak kullanımına arıza riskiydi. Endüstride doğrusal olmayan yüklerin artan kullanımı, dağıtım şebekelerinde harmonik bozulmayı beraberinde getirmektedir. En çok kullanılan doğrusal olmayan cihazların başında çelik, kâğıt ve tekstil endüstriyel tesislerde çok yaygın olarak kullanılan statik güç dönüştürücüleri gelmektedir. Diğer uygulamalar arasında çok amaçlı motor hız kontrolü, elektrikli taşıma sistemleri ve elektrikli ev aletleri yer alır. 2000 yıllara gelindiğinde, elektronik yüklerin ABD elektrik talebinin yaklaşık yarısını oluşturduğu ve elektronik yükteki bu büyümenin büyük bir kısmının konut sektörünü kapsadığı tahmin ediliyordu (Francisco 2006).

Dağıtım şebekelerinde dalga biçimi bozulma seviyelerini daha da yükselten bir durum, kapasitör uygulamalarıdır. Endüstriyel tesislerde güç faktörü düzeltmesi için ve dağıtım hatları boyunca gerilim profilini düzenlenmesi amacıyla güç sistemlerinde büyük kapasite bankları kullanılmaktadır. Ortaya çıkan reaktif empedans, yükün karakteristik harmoniklerinden biriyle çakışması muhtemel belirli bir frekansta sistem endüktif reaktansı ile bir tank devresi oluşturur. Bu durum, yalıtımı zorlayabilecek büyük salınımlı akımları ve gerilimleri tetikleyecektir. Bu durum endüstri ve altyapı mühendisleri için dalga biçimleri üzerindeki aşırı harmonik dalga biçimi bozulma seviyelerini saptamak ve düzeltmek için ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Çünkü sürekli artış tam hassas elektronik ekipmanın kullanımının arttığı bir zamanda meydana gelmektedir. Hiç şüphe yok ki, şebeke ve endüstriyel kurulumların planlanmasından tasarım aşamalarına kadar olan harmonik çalışmalar, ağları ve ekipmanı kabul edilebilir çalışma koşulları altında tutmanın ve doğrusal olmayan yüklerin kurulumu veya eklenmesiyle ilgili olası sorunları tahmin etmenin etkili bir yolu olduğunu kanıtlayacaktır (Francisco 2006).

Harmonikler, iletişim şebekelerde elektromanyetik girişimi ve dağıtım şebekelerde daha büyük güç kaybı getirebilir ve bunun gibi problemler giderilmesi için aktif ve pasif filtreler kullanılır. Pasif filtreler, şebekelerde rezonans etkisi oluşturabileceği için bu filtreler yerine aktif filtreler tercih edilebilmektedir (Afonso ve diğ. 2003).

Elektrik tesislerinde var olan lineer olmayan yükler akım gerilim karakteristik özelliğinin lineer olmasından dolayı harmonikler oluşturmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde lineer olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım tesislerinde ciddi harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilemektedir. Elektrik enerji sisteminde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gereklidir. Ancak, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konverterler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları, statik VAR kompanzatorları gibi lineer olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal olmaması nedeniyle harmonik bozulmaları neden olurlar. Lineer olmayan yüklerin güçleri düşük değerde olsa bile, yine de gerilimin dalga şeklini bozarlar. Enerji sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü lineer

olmayan yük bulunduğu düşünürsek, ek kayıpların, harmonik gerilimlerin ve bozulma değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz bir gerçektir (Francisco 2006).

## 2.2 Fourier Serisi

Güç şebekelerinde akım/gerilimin dalga şeklinin sinüzoidal şeklinde olmalıdır. Bazı olaylar ve elemanlardan dolayı enerji sistemindeki sinüzoidal şekli bozulmalar meydana gelmektedir. Bozulmuş olan dalgaları sinüzoidal olmayan dalga olarak adlandırılır. Lineer olmayan dalgalar, lineer ya da lineer olmayan elemanlı bir devreye non-sinüzoidal besleme gerilimi uygulanması veya lineer olmayan elemanlı bir devreye sinüzoidal gerilim uygulanmasıyla meydana gelmektedir.

Fourier serilerinin teorisi ilk olarak, Fransız fizikçi ve matematikçisi Joseph Fourier tarafından 1882'de yayınlanmıştır. Teoride, trigonometrik serilerin belirli tiplerinde rastgele fonksiyonların açılımlarını içermektedir. Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak ifade edebilmek, bu teori ile mümkün olmaktadır. Bu seriler, zaman ve frekans domaininde fonksiyonlar arasında ilişki kurmaktadır.

Bir  $f(t)$  fonksiyonunun Fourier dönüşümünü Denklem 2.1'de görüldüğü gibi tanımlanır. Fourier ters dönüşümü  $F(\omega)$  ise Denklem 2.2'yi kullanılarak hesaplanır.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (2.2)$$

Fourier dönüşümü yardımıyla hem zaman hem de frekans domaininde fonksiyon veya dalga şekli inceleyebilir.

## 2.2.1 Fourier Serililerin Tanımları

Lineer olmayan periyodik bir fonksiyonu Fourier analizi sonrasında zaman domainindeki ifadesi Denklem 1.3-2.5'ten herhangi biri ile gösterilebilir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(nt) + B_n \cos(nt)) \quad (2.3)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (2.4)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nt + \phi_n) \quad (2.5)$$

Bu denklemlerde;

$n = 1, 2, 3$	Harmonik mertebesi (pozitif tam sayı)
$t$	Bağımsız değişken ve elektrik enerji sistemlerinde $t$ yerin $\omega t$ kullanılmaktadır
$A_0$	Sabit terim
$\phi_1$	Temel dalga'nın faz açısıdır
$A_1, A_2, \dots, A_n$	$f(t)$ fonksiyonunun " $n$ harmonik katsayıları" denir.
$B_1, B_2, \dots, B_n$	
$\phi_2, \phi_2 \dots \phi_n$	Harmoniklerin faz açısıdır
$C_1 \sin(t + \omega t)$	$f(t)$ fonksiyonunun birinci harmoniği ya da temel bileşen denir.

Bu durumda, aşağıdaki denklemleri yazılabilir.

$$C_1 = (A_1^2 + B_1^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

$$C_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{A_1} \right) \quad (2.8)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{B_n}{A_n} \right) \quad (2.9)$$

### 2.3 Harmonikler ile İlgili Kavramsal Tanımlamalar

Dünya çapında harmonik olaylarının düzenlenmesi ve sınır değerlerinin belirlenmesi amacıyla standartlar oluşturulmuştur. En yaygın standartlar, ABD'de IEEE ve Avrupa Birliği'nde IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından düzenlenmiştir. 1981'de IEEE, güç dönüştürücüleri tarafından üretilen komütasyon çentiği, gerilim bozulması, telefon etkisi ve titreşim sınırları için kılavuzlar ve önerilen uygulamalar sağlamayı amaçlayan 519-1981.1 sayılı standartı yayınladı. Akım ve gerilim sinyalleri için önerilen THD seviyeleri, IEEE-519'un 1992 revizyonunda oluşturulmuştur (Francisco 2006).

Türkiye'de güç elektroniği elemanları hızla yaygınlaşması, ark fırınlarının kullanıldığı demir-çelik tesislerindeki kapasite artırımları vb. dikkate alındığında, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi gerek akımlar ve gerekse gerilimler için toplam harmonik distorsiyonu (THD), toplam talep distorsiyonu (TTD) ve harmonik distorsiyonu (HD) değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerleri standartlaştırmak önemli yararlar sağlar. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması, sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması, sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi bakımından son derece gereklidir (Yılmaz 2006).

Harmonikler, iletişim şebekelerde elektromanyetik girişimi ve dağıtım şebekelerde daha büyük güç kaybı getirebilir ve bunun gibi problemler giderilmesi için aktif ve pasif filtreler kullanılır. Pasif filtreler, şebekelerde rezonans etkisi oluşturabileceği için bu filtreler yerine aktif filtreler tercih edilebilmektedir (Afonso ve diğ. 2003).

Elektrik tesislerde var olan lineer olmayan yükler akım gerilim karakteristik özelliğinin lineer olmasından dolayı harmonikler oluşmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde lineer olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım tesislerinde ciddi harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilemektedir. Elektrik enerji sisteminde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yükle yüklenmesi gereklidir. Ancak, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konverterler, ark fırınları, güç elektroniği

elemanları, statik VAr kompanzatörleri gibi lineer olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal olmaması nedeniyle harmonik bozulmaları neden olurlar. Lineer olmayan yüklerin güçleri düşük değerde olsa bile, yine de gerilimin dalga şeklini bozarlar. Enerji sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü lineer olmayan yük bulunduğu düşünürsek, ek kayıpların, harmonik gerilimlerin ve bozulma değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz bir gerçektir (Francisco 2006).

Harmoniklerin tanımlanmasında kullanılan en önemeli tanımlamalar;

- Toplam harmonik distorsiyonu (THD)
- Toplam talep distorsiyonu (TTD)
- Harmonik distorsiyonu (HD)

Şeklinde ifade edilebilir (Kocatepe ve diğ. 2003).

### 2.3.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu

Doğrusal olmayan yükler, gerilim ve akım dalga biçimlerini bozan harmoniklere neden olur. THD, bozuk bir dalga biçiminde harmonik gerilimin (THDv) veya akımın (THDi) etkin değerinin bir ölçüsüdür (Kalair ve diğ. 2017).

Bir gerilim dalga biçiminin etkin değeri, harmonik akımların ürettiği bozulmayı dikkate alarak Denklem 2.10 ile ifade edilir (Kocatepe ve diğ. 2003).

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.10)$$

Aynı şekilde, harmonik kaynak akımlarının yarattığı bozulmayı hesaba katan sinüzoidal bir akımın etkin değeri Denklem 2.11'de ki gibidir.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.11)$$



Toplam harmonik distorsiyonu, IEEE ve IEC standartlarında kullanılan bir parametredir. Genel olarak gerilim ve akım harmonikleri sırasıyla Denklem 2.12 ve Denklem 2.13'te verildiği gibi tanımlanmaktadır (Kalair ve diğ. 2017).

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.12)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.13)$$

### 2.3.2 Toplam Talep Distorsiyonu

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup TTD Denklem 2.14 ile tanımlanır:

$$\text{TTD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te  $I_L$  yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır.

### 2.3.3 Harmonik Distorsiyonu

Güç sistemlerinde gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları Denklem 2.15 ve 2.16 hesaplanmaktadır (Kocatepe ve diğ. 2003).

$$\text{HD}_v = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.15)$$

$$\text{HD}_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.16)$$

## 2.4 Harmonik Distorsiyonu Seviyeleri

Güç sistemlerinde harmonikli akım ve gerilimin kaldırılması daha çok önem kazandığı için akım ve gerilim harmonik distorsiyonu belirli bir seviyeden geçmemesi arzu etmektedir.

### 2.4.1 Gerilim Harmonikleri için Sınır Değerler

IEEE-519.2 uyarınca önerilen harmonik bozulma limitleri, Ortak bağlantı noktasındaki (PCC), yani elektrik şebekesi ile tüketici arasında yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanmalıdır. Tablo 2.1'de gösterildiği gibi, önerilen limitler sistem gerilim seviyesinin bir fonksiyonudur. Örnek olarak, 69 kV ve altındaki elektrik şebekeleri için toplam gerilim bozulması %5 ve her bir bireysel gerilim harmoniği için ise %3'ü geçmemelidirler (Francisco 2006).

**Tablo 3.1:** IEEE St. 519-2014 Voltaj bozulma limitleri.

PCC'de Voltaj Değeri	Bireysel Gerilim bozulması (%)	Toplam Gerilim bozulması (THD) %
69 KV alt	3	5
69-161 (KV)	1.5	2.5
161 KV üst	1	1.5

Yüksek gerilim şebekelerinde toplam harmonik distorsiyon değeri %2'ye kadar olabilirler. (Blooming ve Çarnovale 2006). Nedeni ise, şebekede yüksek gerilim DC baraya bağlanan yeni tüketicilerdir.

### 2.4.2 Akım Harmonikler için Sınır Değerler

Tablo 3.2'de akım harmonik bozulma ile ilgili, IEEE-519-2014, Ortak bağlantı noktasındaki (Point of Common Coupling-PCC') ( $I_{sc}$ ) kısa devre akımı ile 12 aylık bir süre boyunca ( $I_L$ ) maksimum talebe karşılık gelen ortalama akım arasındaki oranın bir fonksiyon olarak tanımlar (Francisco 2006).

**Tablo 3.2:** IEEE St. 519-2014, 120V ile 69 KV arası Akım bozulma limitleri.

IL yüzdesi olarak maksimum harmonik akım bozulması						
Bireysel harmonik bileşeni (tek harmonikler) <sup>a, b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20 <sup>c</sup>	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

<sup>a)</sup> Çift harmonikler yukarıdaki tek harmonik limitinin %25'i ile sınırlıdır.

<sup>b)</sup> Tüm güç üretim ekipmanı, gerçek A'dan bağımsız olarak bu akım bozulma değerleriyle sınırlıdır.

<sup>c)</sup> Tüm güç üretim ekipmanı, gerçek  $I_{sc}/I_L$ 'den bağımsız olarak bu akım bozulma değerleriyle sınırlıdır (IEEE STD 519-2104).

Tabloda;

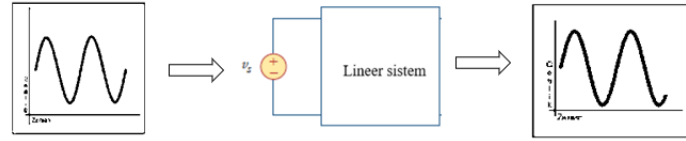
$I_{sc}$  = PCC'de Maksimum Kısa devre

$I_L$  = maksimum talep yük akımı

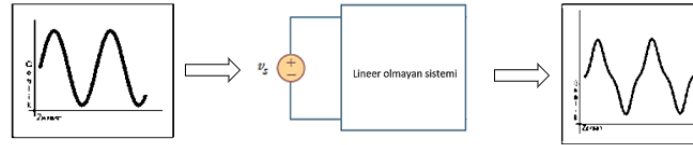
$PCC$  = Ortak bağlantı noktası

### 3. DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE HARMONİKLERİN ETKİSİ

Günümüzde, güç dönüştürücü ve lineer olmayan yüklerin artmasına bağlı olarak dağıtım şebekelerinde gerilim ve akım dalga şekillerinde bozulmalar meydana gelmektedir (Afonso ve diğ. 2003). Harmonikler lineer olmayan cihazlar ile sinüzoidal olmayan güç kaynaklarından herhangi biri ya da ikisinin sistemde bulunması sonucu oluşurlar. Harmonikler dağıtım şebekelerde ek kayıplar, gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması, gerilim düşümünün artması, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi, elektronik kart arızaları gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar (Yılmaz 2006). Şekil 3.1’de doğrusal (lineer) ve Şekil 3.2’de doğrusal olmayan (Lineer olmayan) sistemler gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Lineer sistem.



Şekil 3.2: Lineer olmayan sistem.

Güç sistemlerinde harmoniklerin en önemli etkileri;

- Transformatörler üzerindeki termal etkiler
- Jeneratör dalga şeklinin bozulması
- Kondansatör bankaları üzerindeki çeşitli etkiler
- Harmoniklerin enerji iletim sistemi üzerindeki etkisi
- Aydınlatma cihazları
- Harmoniklerin güç faktör üzerindeki etkileri

Şeklinde sıralanabilir.

### 3.1 Transformatörler Üzerindeki Termal Etkiler

Modern endüstriyel ve ticari ağlar, değişken hızlı sürücüler, elektrik ve indüksiyon fırınları ve floresan aydınlatma gibi çeşitli doğrusal olmayan yüklerin ürettiği önemli miktarlarda harmonik akımlardan giderek daha fazla etkilenmektedir. Kesintisiz güç kaynakları ve kişisel bilgisayarların akımları servis trafolar tarafından sağlanır. Transformatörlerin özel bir yönü, doyma koşulları altında bir harmonik kaynağı olmalarıdır (Francisco 2006).

Ayrıca, harmonik üreticisi olarak transformatörler gerilim ve akım harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi akım harmonikleri sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki ve ikincisi gerilim harmonikleri sonucunda, demir kayıplarındaki artış meydana gelmektedir. Bu kayıp artışları transformatörlerde ek ısınma olarak görülecektir (Yılmaz 2006).

Delta-Y veya delta-delta bağlantılı transformatörleri, sıfır bileşen akımlarını yakalar aksi takdirde nötr iletkenleri aşırı ısıtacaktır. Delta bağlantıda dolaşan akımlar akımın etkin değerini yükselterek ek ısı üretir. Bu, izlenmesi gereken önemli bir husustur. Genel olarak, sargılarda artan ısı yayılımından ve cidar etkisinden harmonik kayıpları meydana gelir; her ikisi de etkin akımının rms karesinin ve girdap akımları ve çekirdek kayıplarının bir fonksiyonudur. Bu ekstra ısı, transformatör yalıtımının çalışma ömrünü azaltmada önemli bir etkiye sahip olabilir. Transformatörler, evrim geçiren bir güç ekipmanıdır ve bundan istinaden dikkate değer harmonik bozulmalarında çalışabilmektedirler. (Francisco 2006).

### 3.2 Generatör Dalga Şeklinin Bozulması

Elektrik enerjisi endüstrisinde kullanılan generatörler temel olarak lineer yükleri beslemek için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, yük tipi ağırlıklı olarak doğrusal olmadığına, üretim sistemleri, izin verilen çalışma sınırlarını aşabilecek aşırı ısınma ve burulma torku titreşimlerine maruz kalmada, kararlı koşullarda çalışmalarına izin veren belirli gereksinimlere uymalıdır. Esasen, doğrusal olmayan bir yük, generatör terminallerinde bir gerilim dalga biçimi bozulması üretir. Bu durum generatörün çalışmasında aşağıda belirtilen olumsuz sonuçları doğurur:

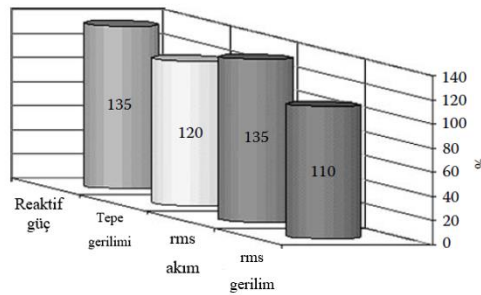
- Motor ekseninde burulma torkları ve titreşim modu şekilleri oluşturan pozitif ve negatif dizi akım katkılarının üretimi. Rotorda oluşan termodinamik kuvvetler, mil yataklarını zamanından önce aşındırabilir.
- Uyarma sistemine giden besleme devresindeki gerilim dalga biçimi bozulması ve gerilim düzenleme sorunlarına neden olabilir.
- Aşırı negatif bileşen akımları gerilim dengesizliğine neden olur (Francisco 2006).

### 3.3 Kondansatör Bankaları Üzerindeki Çeşitli Etkiler

Gerilimin arttırılması izolasyon zorlamalarına neden olabilir ve kapasitör bankalarının ömrünü kısaltabilir. Gerilim, sıcaklık ve akım stresleri, di-elektrik arızasına yol açan kapasitör bankasının sürüş koşullarıdır. Bir kapasitör bankasının reaktif güç çıkışı, gerilimin karesiyle şu şekilde değişir:

$$Q_{VAR} = \frac{V^2}{X_C} \quad (3.1)$$

Çalışma gerilimi, dağıtım şebekelerde hafif yük şartlarında ve sigorta bağlantısı arızalı bir kapasitör ünitesini izole etmek için çalıştığıında, kalan birimleri aşırı gerilim durumuna maruz bırakır. Harmonik bozulmaları, kapasitör banka üzerinde gerilim stresleri oluşmaktadır ve bu problem filtrelenmemiş endüstriyel santrallarda ciddi bir konu olarak geçer. Şekil 3.3'te, IEEE-18 şartlarına göre kapasitörün temel çalışma koşullarına ait izin verilen limit değerler sunulmuştur (Francisco 2006).



Şekil 3.3: Kapasitör bankaları için çalışma limitleri (Francisco 2006).

### 3.4 Şebeke Üzerindeki Etikleri

Dağıtım şebekelerinde harmonik akımların akışı devre elemanlar üzerinde gerilim düşümü ve ek kayıplara neden olabilmektedir. Akım harmoniklerini dağıtım şebekesinde devre elemanlar üzerinde ek gerilim düşümüne neden olur. Akımın  $n$ . harmonik bileşeninin meydana getirdiği gerilim düşümünü Denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$|Dv_n| = |I_n| \cdot |Z_n| \quad (3.2)$$

Akım harmoniklerin enerji iletim sistemi üzerinde etkisiyle oluşan ek kayıplar ise Denklem (3.3) ile hesaplanır (Efe 2016) .

$$Ph = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (3.3)$$

Burada;

$Dv_n$ : Gerilim Düşümü

$Ph$ : Ek kayıplar

$I_n$ :  $n$ . Harmonik akımın bileşeni

$R_n$ :  $n$ . harmonik frekansındaki dağıtım şebekesindeki omik direnç

olarak ifade edilmektedir.

### 3.5 Harmoniklerin Aydınlatma Cihazları Üzerindeki Etkileri

Akkor lambalar, çalışma gerilim seviyesine hassas olması nedeniyle akım harmoniklerinin sebep olduğu gerilim bozulması lambalarının ömrünü azaltır. Gerilim bozulma nedeniyle etkin gerilim seviyesi akkor lambalarının anma gerilim seviyesinden fazla ise yüksen filament sıcaklığı lamba ömrünü kısaltacaktır (Wagner

ve diğ. 1993). Deneyimlerde etkin değerini %105 yükselmesinin akkor lambanın ömrü %47 kısalttığını göstermiştir (Kaufman 1981).

### 3.6 Harmoniklerin Güç Faktör Üzerindeki Etkileri

Dağıtım şebekelerinde, şebeke üzerinde kullanılan gerçek gücün ( $P$ ), görünür güce ( $S$ ) oranına güç faktörü denilir. Güç faktörü Denklem 3.4'teki,

$$G_f = \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

ifadesi ile hesaplanır ve 0-1 arasında bir değer alır. Bu değeri mümkün olduğunca 1'e yaklaştırılması için genellikle güç faktörü düzeltilir. Güç faktörün düzeltilmesi şebekeden çekilen gerçek gücün görünür güce yaklaştırılması anlamına gelir. Sinüzoidal bir şebekeye sinüzoidal olmayan bir eleman bağlanması durumunda güç faktörü değişecektir (Efe 2016). Akım harmonikleri meydana gelen güç faktörü düzensizliği düzeltmek için şönt kapasitörler kullanılmaktadır (Wagner ve diğ. 1993) .



## 4. DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

### 4.1 Giriş

Günümüzde, doğrusal olmayan ekipmanlar/yükler yaygınlaştıkça dağıtım şebekelerinde akım ve gerilim harmonikleri gibi farklı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Harmonikler, elektrik sistemlerinde güç faktörü azalması, verim düşüklüğü, gerilim dalgalanmaları ve iletişim paraziti gibi problemleri ortaya çıkarmaktadır. Harmoniklerin etkisini azaltmak ya da yok etmek için aşağıda beyan edilen iki husus karşımıza çıkmaktadır.

- **Birinci Husus:** Tasarım sırasında akım ve gerilim harmonikleri üreten ekipmanlarının yapısında harmonikli akım/gerilimi üretmeleri engellenmeli ya da az üretecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.
- **İkinci Husus:** Harmonikli akım/gerilim meydana geldikten sonra aktif veya pasif filtreler kullanılarak harmoniklerin ortadan kaldırılması sağlanmalıdır (Sucu 2003).

Bu çalışmada, harmonikler meydana geldikten sonra şönt aktif güç filtresi kullanılarak şebeke üzerinde harmoniklerin etkisi, toplam bozulma oranı (THD) analizi yapılacaktır.

### 4.2 Harmoniklerin Giderilmesi için Akım Filtrelerinin Kullanılması

Akım ve gerilim harmoniklerinin yok edilebilmesi için tasarım sırasında dikkat edilecek tedbirler hariç harmonikleri engellemek ve harmoniklerin şebeke üzerindeki etkisini azaltmak için ek olarak filtreler kullanılmaktadır. Harmonik filtrelerinin amacı, meydana gelen harmoniklerinin seviyesini azaltmak veya yok etmektir. Harmonik filtrelerinin görevi ise harmonikli bir kaynaktan beslenen yük gerilim

dalgasını düzeltmek, şebekeye enjekte edilen akım harmoniklerini engellenmek ve radyo frekans girişimlerini elimine etmektir.

Harmonik filtreleri ise;

- Pasif güç filtreleri (PGF)
- Aktif güç filtreleri (AGF)

Olarak iki sınıfa ayrılırlar.

#### **4.2.1 Pasif Güç Filtreleri**

Endüktans ( $L$ ), kondansatör ( $C$ ) ve omik direnç ( $R$ ) gibi pasif elemanlardan oluşan filtrelere pasif filtre denir. PGF'ler, gerilim kaynağı ve yük arasında yer almaktadır. Meydana gelen temel frekanstaki harmonikler hariç diğer harmonik bileşenleri elemine edebilirler. Pasif filtrelerde, her bir harmonik bileşen için ayrı bir yapı gerekmektedir. Aktif güç filtreleri, endüstride en çok kullanılan filtrelerdir. PGF'ler, düşük maliyetli olmasına rağmen AGF'lere göre daha düşük verimliliğe sahiptirler. Bu sebeple, elektrik tesislerinde aktif güç filtreleri daha çok tercih edilmektedir (Bilge 2008). Topoloji açısından bakılacak olursa PGF'ler;

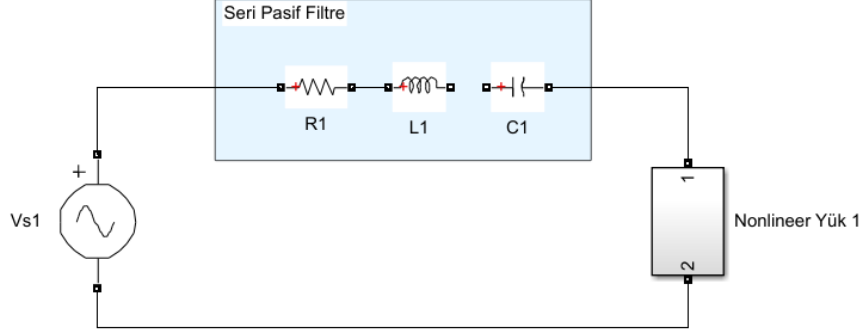
- Seri Pasif güç filtreleri
- Paralel Pasif güç filtreleri

Olarak iki sınıfa ayrılırlar.

##### **4.2.1.1 Seri Pasif Güç Filtreleri**

Seri PGF'ler Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, elektrik şebekelerinde, kaynak ve yük arasında seri olarak bağlanan filtredir. Filtre, meydana gelen akım harmoniklerini önlemeye veya akım harmoniklerinin akışına karşı büyük bir empedans göstererek harmoniklerin etkisini azaltmaya çalışır. Seri PFG'ler yapısı gereği belli bir frekansta ayarlandığı için sadece ayarlanmış frekans bileşenine karşı yüksek empedans gösterebilir. Aksi takdirde diğer bileşenler özellikle temel frekans bileşene düşük

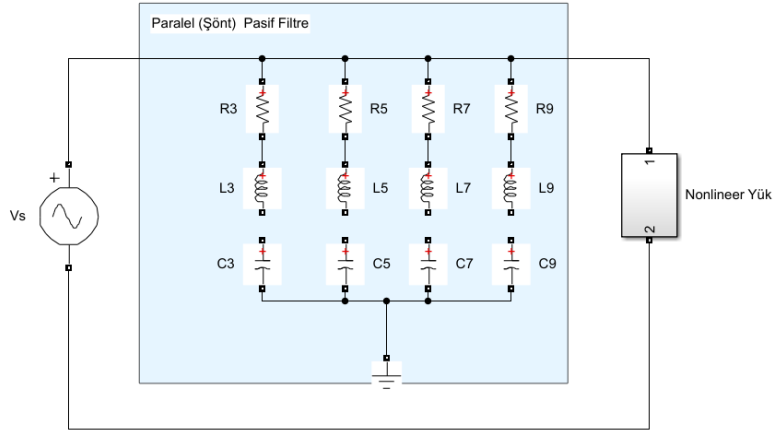
empedans göstermektedir. Seri PFG, şebekeye seri olarak bağlandığı için bütün yük akımını taşıyabilmesi gerekmektedir. Ayrıca, hat gerilimine göre izole olmaması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu tür filtrelerin en büyük avantajı şebekeyi rezonansa sokmamalarıdır (Kocatepe ve diğ. 2003).



**Şekil 4.1:** Kaynak ve yük arası bağlayan seri pasif filtre.

#### 4.2.1.2 Paralel (Şönt) Pasif Güç Filtreleri

Paralel PGF'ler Şekil 4.2'de görüldüğü gibi endüktans (L), kondansatör (C) ve omik direnç (R) gibi unsularla oluşan ve şebekeyle yük arasına paralel olarak bağlanan filtrelerdir.



**Şekil 4.2:** Paralel pasif filtre.

Paralel pasif filtreler, her bir harmonik bileşene ayrı bir rezonans kolu gerektirir (Efe 2016).

Paralel pasif filtreler, düşük bir empedansla harmonikli akımın akışına engel olmakta ve temel frekansta reaktif gücü temin ederek güç faktörü düzeltilmesini sağlamaktadır. Paralel pasif filtrelerin dezavantajı ise her bir frekans için ayrı bir kol içermesi ve şebekeyi rezonansa sokma riski bulunmasıdır (Kocatepe ve diğ. 2003).

#### 4.2.2 Aktif Güç Filtreleri

Pasif güç filtreleri sadece belirli frekanstaki akım harmoniklerini yok edebilecek özelliğe sahip olmasına karşın aktif güç filtreleri her frekanstaki harmonikleri yok edebilmesi sebebiyle elektrik şebekelerinde AGF daha çok tercih edilmektedir. AGF'leri, yapısında bulunan inverter ve inverterin çıkışına bağlanan DC kondansatör ile bobini üzerinde kompanzasyon akımı/gerilimi üretilen bir güç elektronik ekipmandır.

Aktif filtrelerin ilk yatırım maliyeti pasif filtrelere göre fazla olmasına rağmen; şebeke empedansı ile rezonans riski taşıyor olması, yüksek frekanslarda lineer olmayan yüklerin sebep olduğu harmonikleri filtrelemesi ve hacimlerinin pasif filtrelere göre küçük olması sebebiyle tercih edilmektedir. Aktif filtrelerin diğer bir avantajı ise şebekede bir değişiklik olsa bile sistemin baştan tasarlanmasına gerek yoktur. Tablo 4.1'de aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması gösterilmektedir (Bilge 2008).

**Tablo 4. 1:** Aktif ve pasif filtre karşılaştırılması.

PCC'de Gerilim Değeri	Pasif Filtre	Aktif filtre
Yüklerin artması	İlk yatırım geçersiz	İlk yatırım geçerli
Ekler gelmesi	İlk yatırım geçersiz	İlk yatırım geçerli
Filtrenin ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlıdır	Birden fazla frekansa ayarlıdır
Maliyet	Düşük	Yüksek
Birden fazla harmonikler	Uygun değildir	Uygundur
Empedansın etkisi	Rezonans meydana getirebilir	Rezonans meydana getirmezler
Boyut	Büyük	Küçük
Sisteme montajları	Oldukça zor	Nispeten kolay

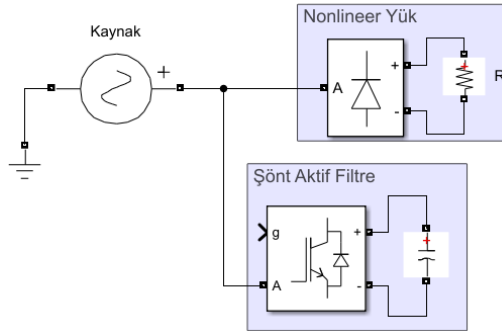
Aktif filtreler; topoloji tabanlı, dönüştürücü tabanlı ve besleme-sistem tabanlı olarak üç sınıfa ayrılmaktadır.

### 4.2.3 Topoloji Tabanlı Sınıflandırma

AGF'ler topolojik olarak; paralel AGF, seri AGF, hibrit AGF ve birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicileri olarak dört grupta toplanırlar (Kocatepe ve diğ. 2003).

#### 4.2.3.1 Paralel Aktif Güç Filtreleri

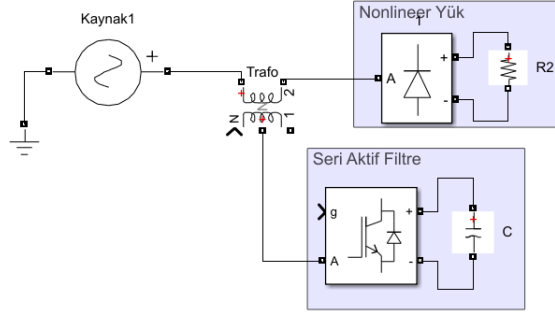
Paralel AGF'ler, Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, kaynakla yük arasında şönt olarak bağlanır ve kaynaktaki akım harmoniklerinin yok edilmesi için kompanzasyon akımı enjekte eden sistemlerdir. Paralel AGF'ler, akım kontrollü gerilim kaynak dönüştürücüsü olarak tanımlanır. Paralel AGF'ler, AC şebekede, meydana gelen harmonik akımlarına karşı miktar olarak eşit ve faz olarak zıt ( $180^0$ ) bir akım aktarmak suretiyle hem güç kalitesi ve hem de güç faktörü düzeltmesi sağlayabilirler (Motta ve Faundes 2016).



Şekil 4.3: Paralel aktif güç filtresi.

#### 4.2.3.2 Seri Aktif Güç Filtreleri

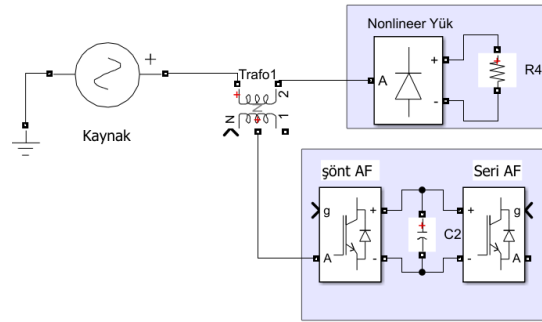
Seri AGF, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi şebekeye transformatör aracılığıyla seri olarak bağlanır ve gerilim harmoniklerini ortadan kaldırabilir. Seri AGF aynı zamanda yük veya hat gerilimini de düzeltmeyi sağlamaktadır.



**Şekil 4.4:** Seri aktif filtresi.

#### 4.2.3.3 Üniversal Aktif Filtre

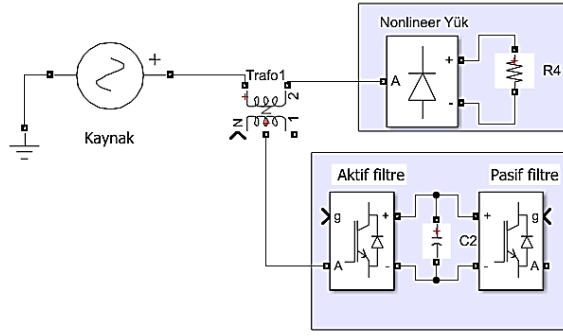
Üniversal AGF, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi şönt ve seri aktif filtrelerden oluşan bir filtredir. Gerilim ve akım harmoniklerinin kontrolü için kullanılmaktadır.



**Şekil 4.5:** Üniversal aktif filtresi.

#### 4.2.3.4 Hibrit Aktif Filtresi

Dağıtım şebekelerinde, maliyetin azaltılabilmesi ve verimliliğin artırılması için hibrit AGF'ler kullanılmaktadır. Hibrit AGF'ler, aktif ve pasif filtrelerden oluşmaktadır. Şekil 4.6'de gösterildiği gibi hibrit aktif filtrenin yapısında pasif filtre kullanıldığı için pasif elemanlar da kullanılmış olur (Vanajakshi ve Rao 2015). Yok edilecek harmoniklerin bir kısım pasif filtre tarafından yok edilir ve diğer kısmı ise aktif filtre tarafından yok edilecektir.

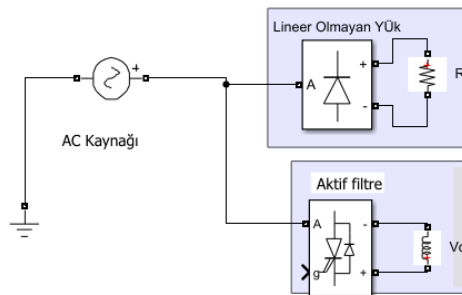


**Şekil 4.6:** Hibrit aktif filtresi.

#### 4.2.4 Dönüştürücü Tabanlı Sınıflandırma

Aktif filtrelerin daha iyi çalışması için elektrik piyasasında iki türlü dönüştürücü kullanılmaktadır.

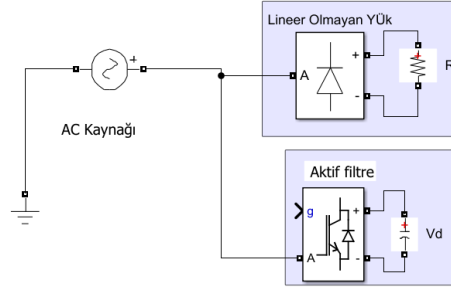
1. Akım beslemeli darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation) PWM köprü evirici yapısı Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu tür aktif filtreler lineer olmayan yükün harmonik akımını önlemek için sinüzoidal olmayan bir akım kaynağı gibi davranırlar. Akım beslemeli PAGF’lerde, güç kaybı yüksek olacak şekilde ters gerilimi tutmak için diyot ve IGBT seri olarak bağlanır.



**Şekil 4.7:** Akım beslemeli paralel aktif güç filtresi.

2. İkinci tür dönüştürücü ise gerilim beslemeli PWM köprü eviricidir ve yapısı Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Filtre yapısında büyük bir kondansatöre sahip olduğu için DC gerilim kaynağı görevi yapmaktadır. Gerilim beslemeli AGF’ler elektrik piyasasında daha ucuz ve çok seviyeli

versiyonlara genişletilebilme imkânına sahip olması sebebiyle akım beslemeli filtrelerden daha çok tercih edilmektedir (Özçıra 2018), (Singh ve diğ. 1999).



Şekil 4.8: Gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi.

#### 4.2.5 Besleme Sistem Tabanlı Sınıflandırma

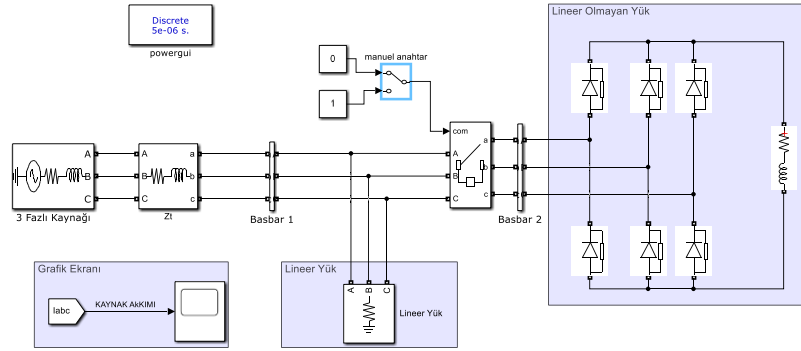
Besleme sistemi esaslı olarak AGF'ler kaynak veya yüke göre tek fazlı (iki telli) ve üç fazlı (üç telli ve dört telli) olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Elektrik şebekelerinde, ev elektrik cihazları gibi tek fazlı (iki telli) kaynaktan beslenen, ayarlanabilir hız sürücüleri (AHS) gibi üç fazlı (üç telli, nötrsüz şebeke) kaynaktan beslenen ve üç fazlı kaynaktan beslenen tek fazlı bilgisayar ve aydınlatma ekipmanları gibi bulunmaktadır (Singh ve diğ. 1999).



## 5. PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ TASARIM VE BENZETİMİ

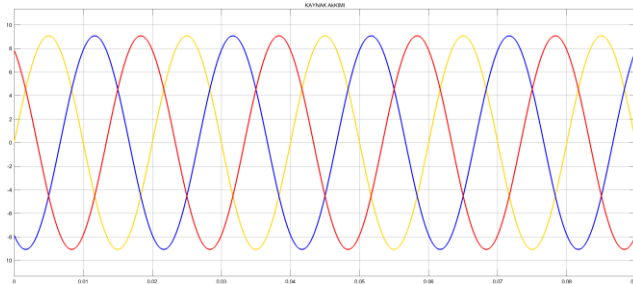
### 5.1 Giriş

Bu tez çalışmasında paralel AGF kullanıldığı için bu bölümde sadece paralel AGF'ne değinilmiştir. Paralel AGF'leri lineer olmayan yükler tarafından meydana getirilen akım bozulmalarını filtrelemek, çekilen reaktif gücü minimize etmek ve dengesiz yük sistemlerinde faz akımlarını dengelemek amacıyla kullanılmaktadırlar. Şekil 5.1'de lineer ve lineer olmayan yük bulunan örnek bir sistem gösterilmiştir. Sistemde lineer olmayan yükün dahil olup olmamasına göre akımın davranışı Şekil 5.2 ve 5.3'te gösterilmektedir.

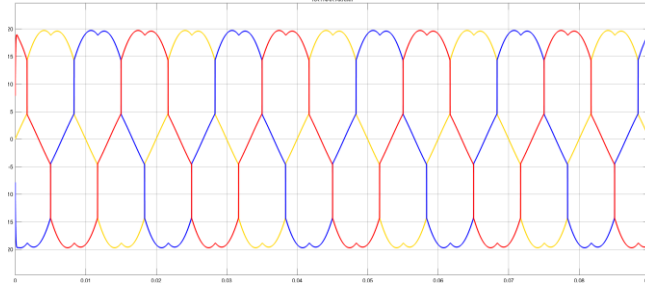


Şekil 5.1: Lineer ve lineer olmayan yüke sahip olan örnek bir sistem.

Şekil 5.2 incelendiğinde görülebileceği üzere lineer olmayan yük şebekede yokken akım dalgasında bozulmalar bulunmamaktadır. Şekil 5.3 incelendiğinde ise örnek sistemde lineer olmayan yük devredeyken şebekenin toplam harmonik bozulma oranı %17,36'e çıkmaktadır.



Şekil 5.2: Lineer yük durumunda akım dalgası.



**Şekil 5.3:** Lineer olmayan yük olması durumunda akım dalgası.

IEEE-512 şartlarına göre toplam THD %5'ten fazla olmamalıdır. Harmonikler meydana geldikten sonra şebekenin gerilimin dalgalanmaması ve frekansın sabit tutabilmesi için aktif ve pasif filtreler harici ekipman olarak kullanılmaktadır.

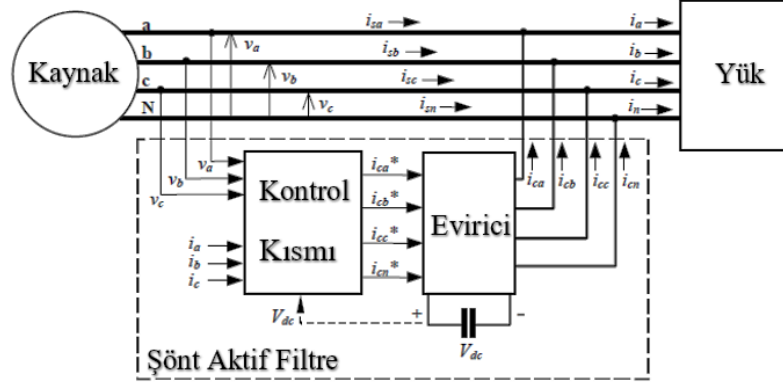
Harmonikler meydana geldikten sonra gerilim dalgalanmaması ve frekansın sabit tutabilmesi için aktif ve pasif filtreler harici ekipman olarak kullanılmaktadır. Paralel AGF'ler denetleyici bloğu, evirici bloğu (IGBT tipi), DC bara ve her faz için bir adet endüktanstan oluşmaktadır.

## 5.2 Paralel AGF'nin Prensi Modeli

Günümüzde, Paralel AGF'lerin kullanımı akım/gerilim harmoniklerini yok edebilmek, gerilim düzensizliğini gidermek ve reaktif gücü kompanzasyonunu sağlamak üzerine yoğunlaşmıştır. Paralel AGF sisteme bağlı olan yüke göre tek fazlı (İki telli), üç fazlı (üç telli ve dört telli) yapılandırma şeklinde bağlanmaktadır (Özçira 2018).

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, aktif filtreler, temel olarak DC tarafında yalnızca tek bir kapasitöre sahip olan bir gerilim kaynaklı invertördür ve dağıtım şebekelerinde akım kaynağı olarak davranırlar.

Aktif filtreler gerilim kaynağı evirici ve DC tarafta bir kondansatör ile sistemde akım kaynak dönüştürücü olarak çalışmaktadır. Şebekede ( $v_a, v_b, v_c$ ) nötr ile faz arası gerilimi, ( $i_a, i_b, i_c$ ) yük akımını, ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*, i_{cn}^*$ ) kontrolör tarafından hesaplanan referans akımı ve ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$ ) ise kompanzasyon akımını ifade etmektedir (Afonso ve diğ. 2003).



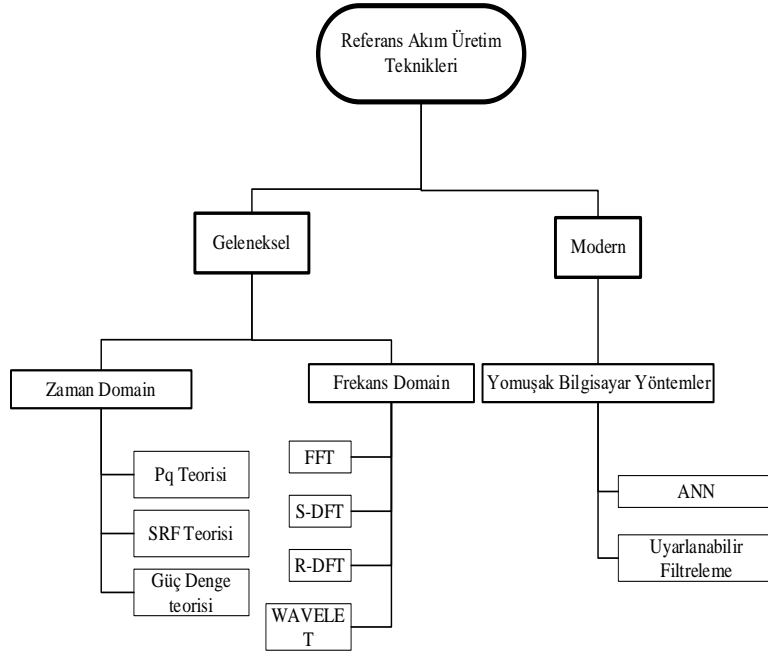
Şekil 5.4: Paralel aktif filtrenin genel şeması (Afonso ve diğ. 2003).

Paralel AGF'lerinde, meydana gelen harmoniklerin kaldırması için miktar olarak eşit ve gerilim fazlarına göre zıt bir kompanzasyon akımını enjekte edip şebekenin güç faktörü düzeltmesini sağlamaktadır (Mahajan ve diğ. 2011).

### 5.3 Paralel AGF'lerinin Referans Akım Üretme Yöntemleri

Paralel AGF'lerin ana fonksiyonları gerilim kontrolü, akım kontrolü ve kompanzasyon akımı oluşturulması olarak özetleyebiliriz. Gerilim kontrolü PI ve kayan metot kontrol teknikleriyle, akım kontrolü ise yapay sinir ağı, bulanık mantık, kayan kipli kontrolörler yardımıyla yapılmaktadır. Sistemde referans akım üretilmesi ise PQ teorisi, senkron referans çerçeve yöntemi, Fourier Dönüşümü ortalaması gibi yöntemlerle sağlanmaktadır (Singh ve diğ. 2018).

Referans akım tahmin teknikleri zaman ve frekans domeni kontrolü olarak iki kategoride incelenmektedir (Özçira 2018). Referans akım üretim yöntemleri Şekil 5.5'te gösterildiği gibi geleneksel referans akım teknikleri ve modern referans akım teknikleri olarak iki sınıfa ayrılabilir. Referans akım tahmin teknikleri zaman ve frekans domeni kontrolü olarak iki kategoride incelenmektedir (Özçira 2018). Referans akım üretim yöntemleri Şekil 5.5'te gösterildiği gibi geleneksel referans akım teknikleri ve modern referans akım teknikleri olarak iki sınıfa ayrılabilir.



**Şekil 5.5:** Referans akım üretmesi.

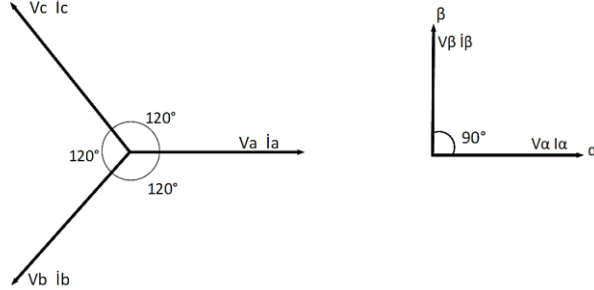
Bu tez çalışmasında, referans akımı zaman domain esaslı alınarak anlık reaktif güç teorisi- (Pq teorisi) ve güç denge teorisini uygulanarak üretilmiştir.

### 5.3.1 PQ-Anlık Reaktif Güç Teorisi

Anlık reaktif güç teorisi (Pq teorisi) üç fazlı-üç telli ve üç fazlı-dört telli şebekelerde uygulanan yöntemlerden birisidir. Pq teorisi, güç elektroniği cihazlarına dayalı güç düzenleyici için kontrolör tasarlamada çok verimli ve esnek bir teoridir. Bu yöntem, Akagi tarafından 1983 yılında öne sürülmüştür ve akabinde 1984 yılında deneysel doğrulaması gösterilmiştir (Afonso ve diğ. 2003).

Denklemlerde üç fazlı (dört telli) bir sistem için  $(v_a, v_b, v_c)$  a-b-c koordinatında anlık gerilim değeri ve  $(v_0, v_\alpha, v_\beta)$   $\alpha\beta 0$  koordinatında gerilim değerlerini ifade etmektedir. Teoride istenen reaktif güç, gerilim ve akımlar anlık olarak ölçülüp elde edilen değerlere göre hesaplamalar yapılacaktır. Anlık reaktif güç teorisi hesaplamaları için, öncelikle üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin Clarke dönüşümü yapılarak akımlar ve gerilimlerin iki fazlı durağan yapıya dönüşümü sağlanır. Şekil 5.6'da gösterildiği gibi a, b, c koordinatında üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin uzay vektörleriyle gösterimi ve bu akım ve gerilimlerin  $\alpha$ - $\beta$  durağan

yapıdaki dönüşümleri gözükmektedir. Üç fazlı sistemdeki akım ve gerilimler  $120^0$  açı farkıyla üretildikleri için düzlem üzerine birbirine  $120^0$  açılı üç vektör şeklinde gösterilmiştir.



**Şekil 5.6:** Üç fazlı abc sistemden iki fazlı  $\beta$ - $\alpha$  sisteme dönüşümü.

Pq teorisinde,  $\alpha\beta 0$  dönüşümü yapılırken denklem 5.1 ve 5.2 kullanılarak gerilim ve akım dalgaları a-b-c koordinatından  $\alpha\beta 0$  koordinatına dönüştürülür (Afonso ve diğ. 2003), (Akagi ve diğ. 2007).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5. 1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5. 2)$$

Denklemlerde  $(i_a, i_b, i_c)$  a-b-c koordinatında anlık akım değeri ve  $(i_0, i_\alpha, i_\beta)$   $\alpha\beta 0$  koordinatında akım değerlerini ifade etmektedir.

Benzer şekilde, denklem 5.3 ve 5.4de  $\alpha\beta 0$  koordinatından abc koordinatına ters dönüşümü sağlayacaktır. Anlık sıfır bileşen gücü, anlık aktif gücü ve anlık reaktif gücü sırasıyla Denklem 5.5- 5.7 yardımıyla bulabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (5. 3)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5. 4)$$

$$P_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (5. 2)$$

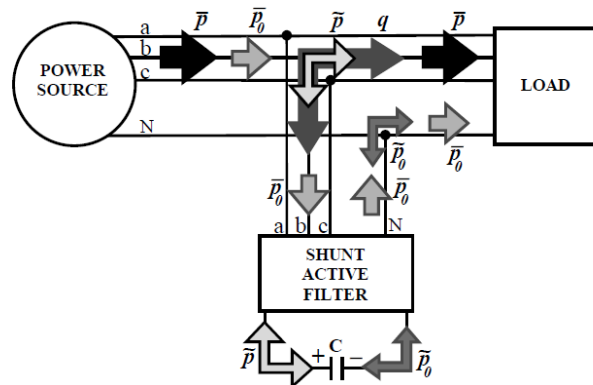
$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (5. 3)$$

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (5. 4)$$

Anlık aktif güç değeri ( $p$ ) ve anlık reaktif güç değerlerini  $\alpha\beta$  koordinatında denklem 5.8 yardımıyla hesaplayabiliriz.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5. 5)$$

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, aktif filtre kondansatörü sadece  $\tilde{p}$  ve  $\tilde{p}_0$  bileşenlerinin kompanzasyonu edecektir. Elde edilen miktarlar daha sonra yüke iletilecektir.  $\bar{p}_0$  ise anlık sıfır bileşen gücünün ortalama değeridir . Gerilim ve akımın sıfır bileşen bileşenleri aracılığıyla güç kaynağından yüke aktarılır (Afonso ve diğ. 2003).



Şekil 5.7: a-b-c koordinatında  $\tilde{p}$  ,  $\tilde{p}_0$  ve  $\bar{p}_0$  kompanzasyon edilecek gücü (Afonso ve diğ. 2003).

Denklem 5.9 ile referans akım  $\alpha\beta$  koordinatından elde edilir.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (5. 6)$$

**Tablo 5. 1:**  $\tilde{p}$  ,  $q$ ,  $\tilde{p}_0$  ve  $\bar{p}_0$  açıklaması.

Sembol	İsim	Açıklamalar	
$\bar{p}_0$	Sıfır bileşen gücü (DC)	Besleme kaynağından yüke iletilen güç	Sadece 3 faz, 4 telli sistemlerde vardır. Sistemde dengesiz gerilim ve akım, ya da 3. Harmonik olmalı
$\tilde{p}_0$	Alternatif Sıfır bileşen gücü (AC)	Besleme kaynağı ve yük arası değiştirilen gücü	
$\bar{p}$	Anlık aktif gücü (DC)	Besleme kaynağından yüke iletilen güç	a-b-c koordinatı
$\tilde{p}$	Alternatif anlık aktif gücü (AC)	Besleme kaynağı ve yük arası değiştirilen gücü	
q	Anlık hayali gücü	Yükün faz arası değiştirilen gücü	Fazların arasında dolaşan istenmeyen akımların varlığından sorumludur.

Sıfır bileşen akımı kompanse edilmek istendiğinde ise denklem 5.10 kullanılabilir.

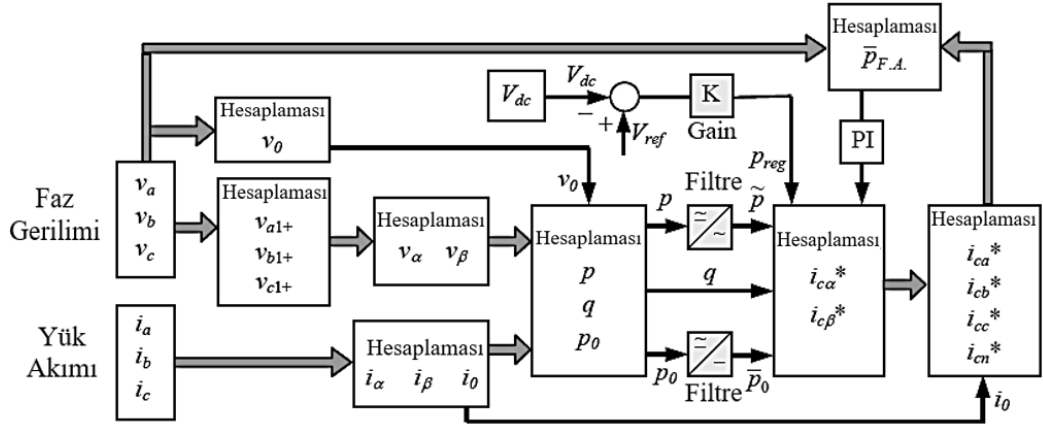
$$i_{c0}^* = i_0 \quad (5. 7)$$

a-b-c koordinatlarında kompanzasyon akımları denklem 5.11 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (5. 8)$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (5. 9)$$

Anlık reaktif güç teorisinin özeti şekil 5.8'de gösterilmiştir.



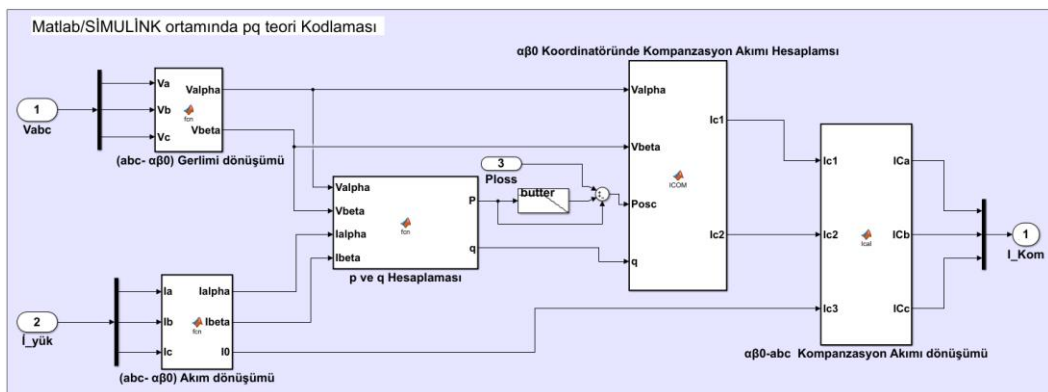
Şekil 5.8: Anlık reaktif güç teorisinin genel şeması (Afonso ve diğ. 2003).

Bu tez çalışmasında sistem üç fazlı (üç telli) olduğu için anlık reaktif güç teorisinde a b c koordinatındaki 3 fazlı şebeke gerilimi ve yük akımı kullanılmasıyla Denklem 5.13 ve 5.14'teki gibi  $\alpha$ - $\beta$  koordinatında akım ve gerilimler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Şekil 5.9'da, anlık reaktif güç teorisine göre yapılmış olan MATLAB/SIMULINK ortamındaki yapı gösterilmektedir. (MATLAB kodlaması Tezin Son Sayfalarda ekler bölümünde bulunmaktadır)



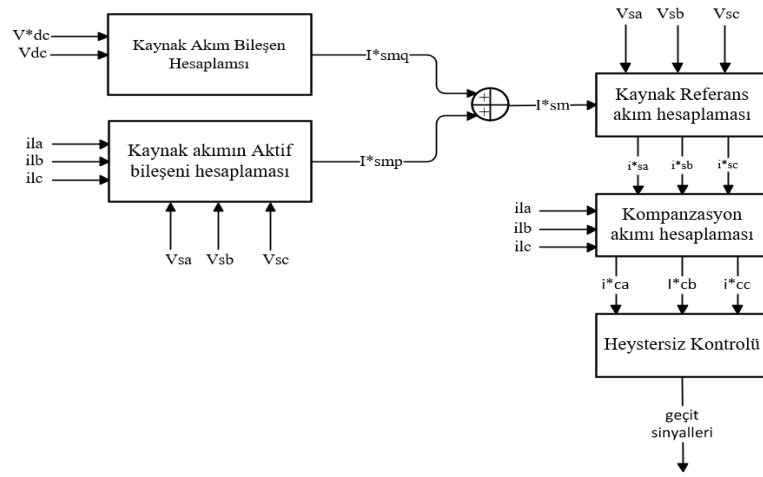
Şekil 5.9: MATLAB/SIMULINK ortamında pq teori kodlaması.



### 5.3.2 Güç Denge Teorisi (Power Balance Theory)

Bu tez çalışmada, kompanzasyon akımı üretebilmek için ikinci yöntem olarak güç denge teorisinden faydalanılmıştır. Güç denge teorisi, AC kaynaktaki yük akımlarının temel aktif güç bileşenini ve diğer akımların temel bileşenlerini belirli değerlerde besleyerek kapasitörün ortalama gerilimini istenen bir sınırdan tutmasını sağlamaktadır.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi güç denge teorisinde, kaynak gerilimi ve yük akımını kullanarak referans besleme akımının tepe değeri bulunup, kompanzasyon akımı üretilmiş olacaktır.



**Şekil 5.10:** Güç denge teorisinin genel şeması (Singh ve diğ.1998).

Şekil 5.10'da,  $(v_{sa}, v_{sb}, v_{sc})$  üç fazlı kaynak gerilimini,  $(i_{Lb}, i_{Lc}, i_{La})$  üç fazlı yük akımını ve  $(i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*)$  aktif filtre tarafından üretilen kompanzasyon akımını göstermektedir.

Aşağıdaki denklemlerden birisi kullanılarak gerilimin tepe değeri ( $v_{sm}$ ) bulunabilir.

$$V_{sa} = V_{sm} \sin \omega t \quad (5.12)$$

$$V_{sb} = V_{sm} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5.13)$$

$$V_{sc} = V_{sm} \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5.14)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2}{3}(V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2)} \quad (5. 15)$$

Güç denge teorisinde referans besleme akımının tepe değeri ( $i^*_{sm}$ )  $i^*_{smp}$  ve  $i^*_{smq}$  şeklinde iki bileşenden oluşmaktadır.  $i^*_{smp}$  kaynak akımının aktif güç bileşenini ve  $i^*_{smq}$  ise yük akımının reaktif güç bileşenini temsil etmektedir ve denklem 5.19 yardımıyla elde edilebilir.

$$i^*_{sm} = i^*_{smp} + i^*_{smq} \quad (5. 16)$$

Denklem 5.20 yardımıyla  $Pl$  değeri ve daha sonra  $Pl$ 'nin tepe değerini ( $\bar{p}_L$ ) bulunup,  $i^*_{smp}$  değeri denklem 5.21 ile bulunabilir.

$$Pl = v_{sa} + i_{La} + v_{sb} + i_{Lb} + v_{sc} + i_{Lc} \quad (5. 17)$$

$$i^*_{smp} = \frac{2}{3} \frac{\bar{p}_L}{V_t} \quad (5. 18)$$

Yük akımının reaktif güç bileşenini ( $i^*_{smq}$ ) hesaplanması aşağıdaki mantığa dayanmaktadır. Referans DC bara ortalama gerilimi ( $V^*_{dc}$ ) ve gerçek dc bara gerilim ortalaması PI kontrolüyle ilk  $\bar{q}_L$  değeri hesaplayıp ve daha sonra  $i^*_{smq}$  miktarı denklem 5.23'ü istifade ederek hesaplayabiliriz.

$$\Delta_{edc} = e^*_{dc} - e_{dc} = \frac{C_{dc}[(V^*_{dc})^2 - V^2_{dca}]}{2} \quad (5. 19)$$

$$i^*_{smq} = \frac{2}{3} \frac{\bar{q}_L}{V_t} \quad (5. 20)$$

Üç fazlı referans akım değerlerini aşağıdaki denklemleri kullanarak hesaplayabiliriz.

$$u_{sa} = \frac{v_{sa}}{v_{sm}}, \quad u_{sb} = \frac{v_{sb}}{v_{sm}}, \quad u_{sc} = \frac{v_{sc}}{v_{sm}} \quad (5. 21)$$

$$i^*_{sa} = i^*_{sm} u_{sa} = i^*_{sm} \frac{V_{sa}}{V_{sm}} \quad (5. 22)$$

$$i_{sb}^* = i_{sm}^* u_{sb} = i_{sm}^* \frac{V_{sb}}{V_{sm}} \quad (5.23)$$

$$i_{sc}^* = i_{sm}^* u_{sc} = i_{sm}^* \frac{V_{sc}}{V_{sm}} \quad (5.24)$$

Son olarak, kompanzasyon akımı da aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunabilir.

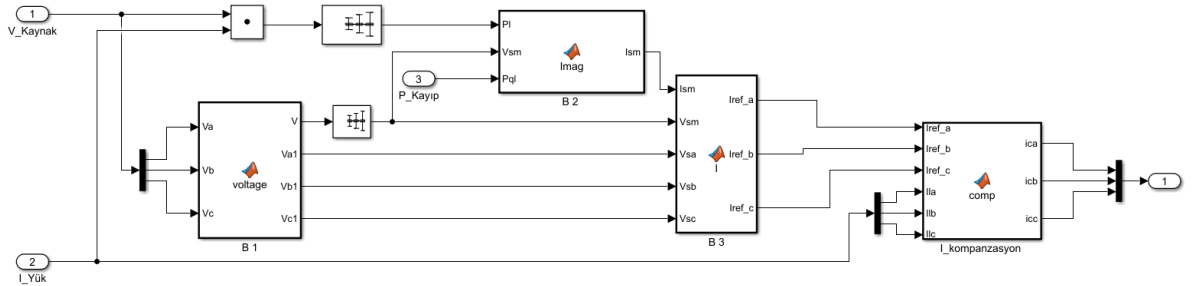
$$i_{ca}^* = i_{la} - i_{sa}^* \quad (5.25)$$

$$i_{cb}^* = i_{lb} - i_{sb}^* \quad (5.26)$$

$$i_{cc}^* = i_{lc} - i_{sc}^* \quad (5.27)$$

### 5.3.2.1 Güç Denge Teorisi MATLAB/SIMULINK Modeli

Şebekede, lineer olmayan yük olduğundan dolayı akım dalgalanmaları meydana gelmektedir. Kompanzasyon akımı oluşturmak amacıyla ikinci yöntem olarak güç denge teorisi ele alınmıştır. Şekil 5.11'de, güç denge teorisinin MATLAB/SIMULINK ortamında kodlaması gösterilmektedir (Singh ve diğ.1998), (Kumar ve Singh 2010). (MATLAB kodlaması Tezin Son Sayfalarda ekler bölümünde bulunmaktadır)



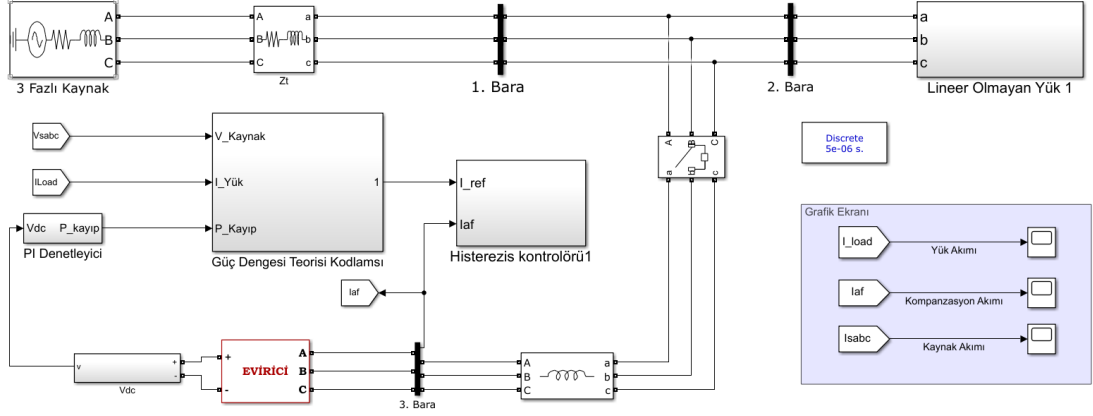
Şekil 5.11: MATLAB/SIMULINK ortamında güç denge teorisi kodlaması.

## 5.4 PAGF'nin Benzetim Modeli

Bu bölümde, şebekenin genel modellenmesi, şebekeye bağlı olan yük tanımlanması ve kompanzasyon akımının kontrol metodu yer almaktadır. Bu tez

kapsamında, MATLAB/SIMULINK benzetim programıyla şebekenin modellenmesi yapılmıştır. Şekil 5.12’de gösterildiği gibi, şebekenin genel şeması temel olarak aşağıdaki üç bölümden oluşmaktadır;

- a) Kaynak Bölümü
- b) Yük Bölümü
- c) Filtre Bölümü



Şekil 5.12: Şebekenin genel modeli.

#### 5.4.1 Kaynak Bölümü

Kaynak bölümünde, şebeke gerilim değeri 25/0.4 KV arasındır. Hattın empedansı 0.01  $\Omega$  ve 1  $\mu$  H ve şebekenin frekansı ise 50 Hz değerinde alınmıştır.

#### 5.4.2 Yük Bölümü

Bu çalışmada, iki yöntemin karşılaştırmak maksadıyla farklı karakteristiklere sahip iki yük üzerinde benzetim yapılacaktır. Bu yükler aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Tablo 5.1’de görüldüğü gibi, yük diyot doğrultucuya (Rectifer diode) RL paralel bağlantılı MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmıştır.

**Tablo 5.2:** Yük bölümü.

Yük Numarası	Yük Türü
1. Yük	Dirençli yük (R=10 ohm )
2. Yük	P= 4KW, Q= 8 KVAR

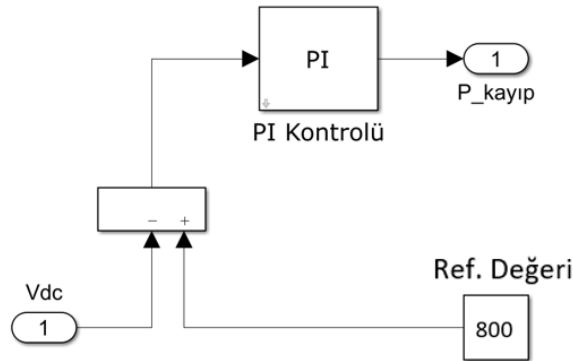
### 5.4.3 Filtre Bölümü

Filtre bölümünde, kompanzasyon akımı oluşturmak için Bölüm 4.3'te bahsedildiği gibi anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisi kullanılmıştır. Filtre kısmında aşağıdaki belirtilen kısımlar yer almaktadır.

1. PI Kontrolü
2. Evirici
3. Akımı Kontrolü

#### 5.4.3.1 PI Kontrolü

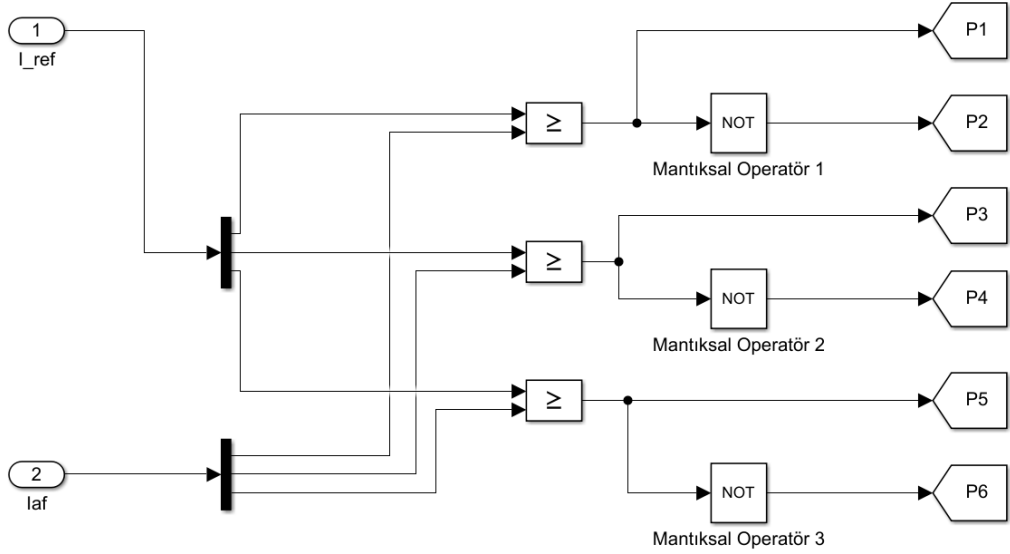
Şekil 5.13'te de gösterildiği gibi PAGF'nin simülasyonunda kullanılan yöntemler bloklar halinde ifade edilmiştir. PAGF'nin benzetiminde referans çıkartım yöntemi olarak anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisi yöntemi doğru akım (DA) bağ gerilimi kontrolü için PI kontrolör kullanılmıştır. Kullanılan DA bağ kapasitörü ise  $800 \mu F$  değerindedir.



**Şekil 5.13:** PI kontrolü.

### 5.4.3.1.1 Akım Kontrolü

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, akım kontrol yöntemi olarak Histerezis Bant Akım Kontrol Tekniği (HBAT) kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmiştir. HBAT gerilim kaynaklı aktif güç filtrelerinin çoğu uygulamalarında anahtarlama sinyallerini üretmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Anahtarlama sinyallerini üretmek için referans akımı ( $i_{ref}$ ) ile gerçek akımın ( $i_f$ ) bir histerezis bandında birleştirildiği bir kontrol tekniğidir. Simülasyonda kullanılan evirici çıkışındaki akımı kontrol etmek için çıkış akımları ve referans akımları karşılaştırılır ve elde edilen hata sinyalleri, anahtarlama sinyallerini üretmek için histerezis kontrolörlerine uygulanır. Üretilen hata sinyali belirlediğimiz histerezis bandının üst sınırına ulaştığında P2 anahtarı devreye girer ve akımı azaltır. Aynı şekilde hata sinyali histerezis bandının alt sınırına ulaştığında ise P1 anahtarı devreye girer ve akım değeri artırır. Akımların karşılaştırıldıktan sonra elde edilen sinyaller ise anahtarlama sinyalleri olmakta ve bu yöntem histerezis akım kontrolü olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 5.14: Histerezis akım kontrolü.

## **6. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA**

### **6.1 Giriş**

Bu bölümde örnek bir sistem üzerinde önceki bölümlerde bahsedilmiş gibi anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisini MATLAB/SİMULİNK ortamında harmoniklerin etkisini ve ortadan kaldırılması gösterilmiştir.

### **6.2 Örnek Sistem**

Bu çalışmada, şebekenin analizi A ve B yük grubunun üzerinde yapılacaktır. Anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisinden faydalanarak iki yük üzerinde simülasyonlar yapılmıştır. Her bir yük için şebekenin simülasyonu filtresiz ve filtreli (1. Yöntem ve 2. Yöntem) olarak yapılmıştır.

#### **6.2.1 A Yüğü için Sistemin Analizleri**

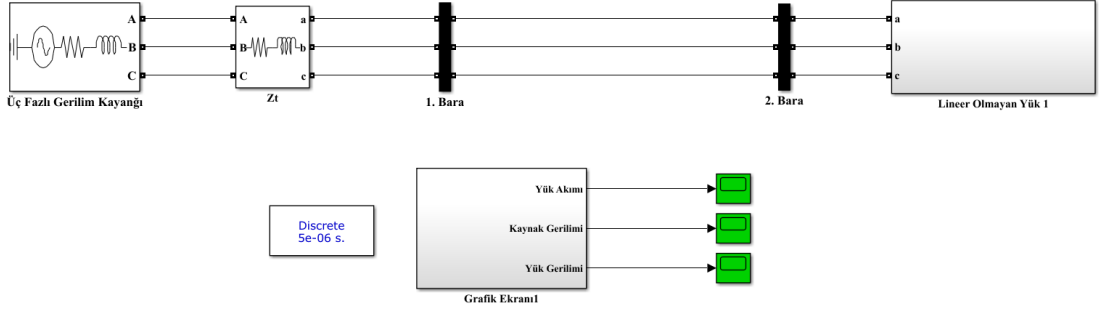
Bu bölümde, A yük için Sistemin analizi aşağıdaki üç farklı durumda beyan edilecektir.

1. Filtresiz Sistemin Analizi
2. Anlık Güç reaktif Güç yöntemiyle Sistemin Analizi
3. Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi

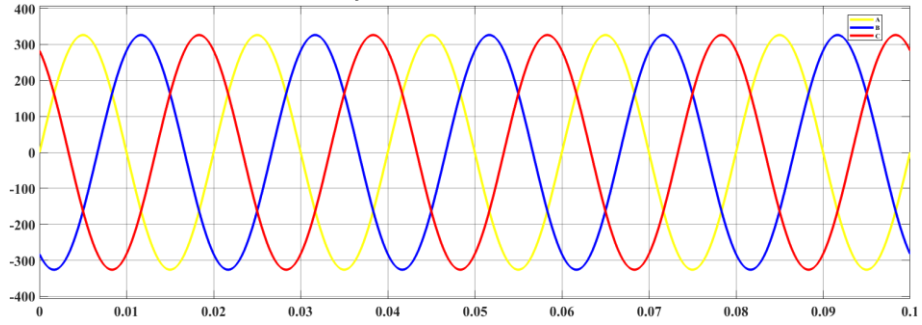
Yukarıdaki ifade edildiği gibi sistemin filtresiz ve filtreli durumunda analiz edilecektir. Şebekenin akım dalgalanması, gerilim durumu ve toplam harmonik bozulma oranı gibi faktörler göz önüne alınarak fitrenin nasıl şebekeye etkileyeceğini göstereceğiz.

### 6.2.1.1 Filtresiz Sistemin Analizi

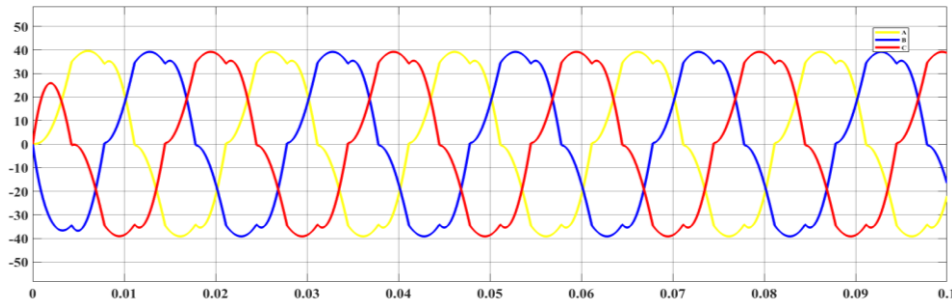
Birinci durumunda A grup yükü şebekeye bağlı olup filtre olmadan şebekenin gerilimi, akım ve toplam harmonik bozulma oranı MATLAB/SİMULİNK ortamında yapılmıştır ve sistem modeli Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Şekil 6.1’deki model şebekeye herhangi bir filtre bağlı olmadığı durumu göstermektedir. Sistemde A yükü bağlı olduğu durumda şebeke gerilimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Kaynak gerilimi herhangi bir harmonik bileşen içermektedir. Ancak 2 nolu baraya lineer olmayan bir yük bağlı olduğu için sistemden harmonikli akım çekmektedir. Filterisi durumda bu yükün çekmiş olduğu akım akımı Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.1: Şebekenin filtresiz durumu.



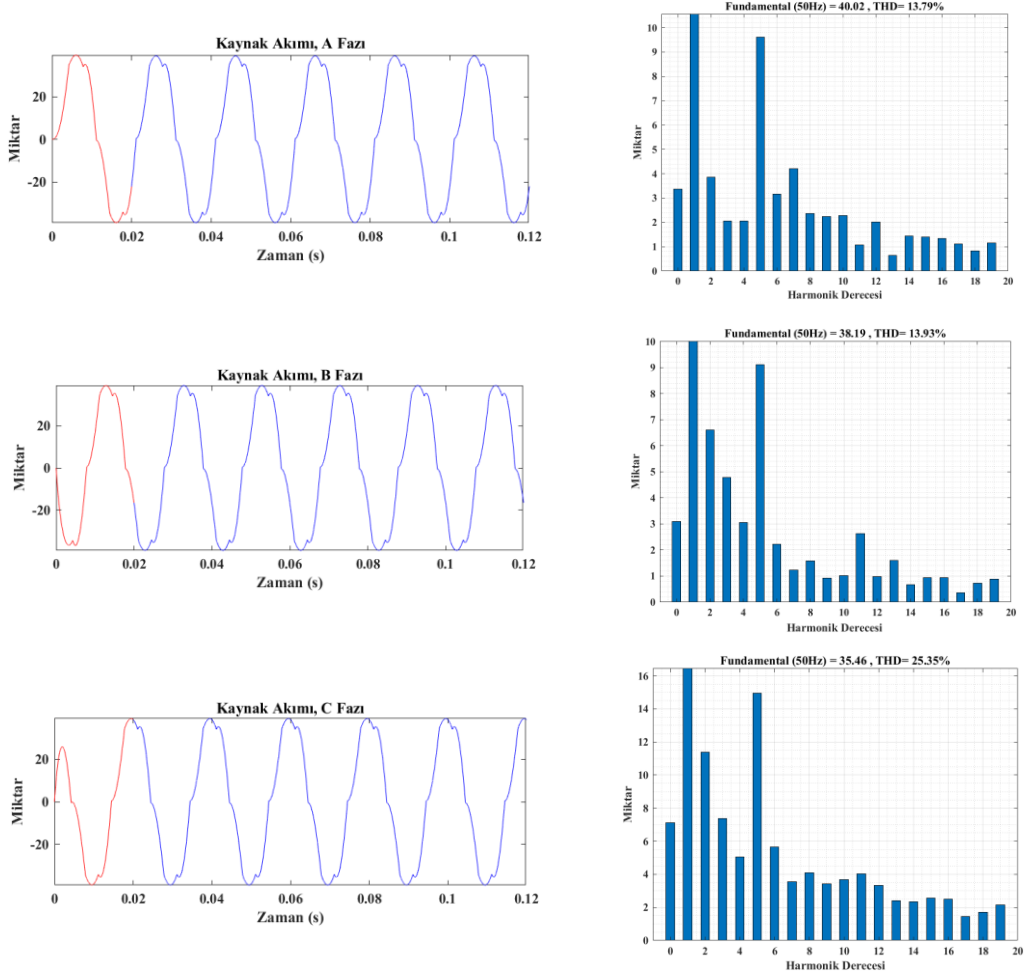
Şekil 6.2: Yük gerilimi.



Şekil 6.3: Kaynak akımı.



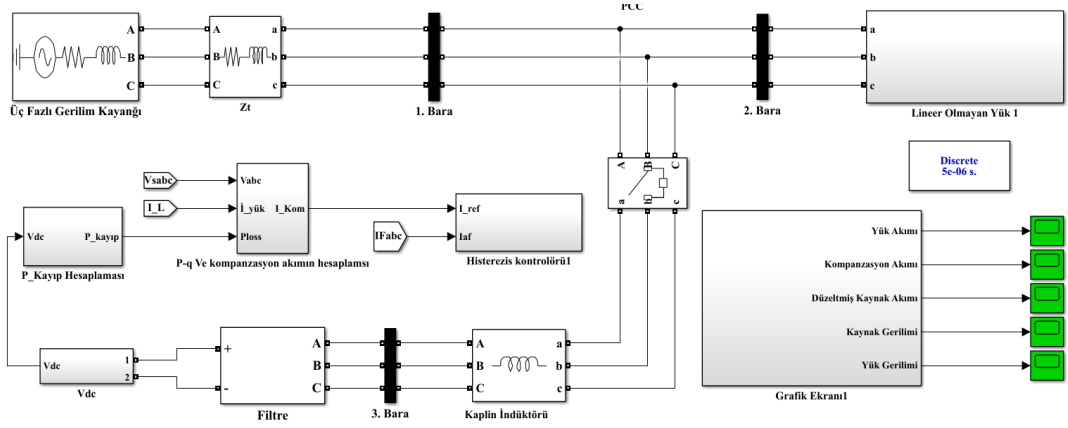
Geçen bölümlerde anlatıldığı gibi lineer olmayan yüklerin sebebiyle harmonikler meydana gelmektedir. Buna bağlı şebekede bozulmalar ve dalgalanmalar neden olabilmektedir. MATLAB ortamında Fast Fourier Transform (FFT) analizi yardımıyla faz başında harmoniklerin THD değerleri gözlenmiş ve Şekil 6.4’de gösterilmiştir. A, B ve C fazları için THD değerleri sırasıyla %13.79, %13.79, %25,35 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 6.4:** Filtresiz sisteminde oluşan harmonikleri.

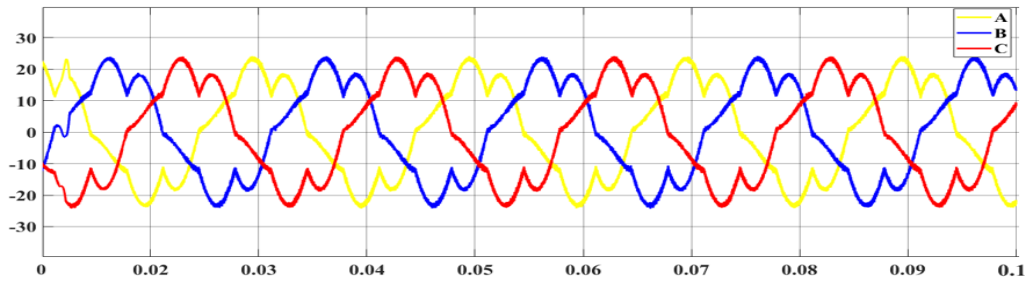
### 6.2.1.2 Anlık Reaktif Güç Yöntemiyle (pq teori) Sistemin Analizi

Şekil 6.5’te, MATLAB/SIMULINK ortamında anlık reaktif güç teorisi modeli ve genel şeması gösterilmektedir. Anlık reaktif güç teorisi kompanzasyon akımı oluşturabilmek için birinci yöntem olarak kullanılmıştır.

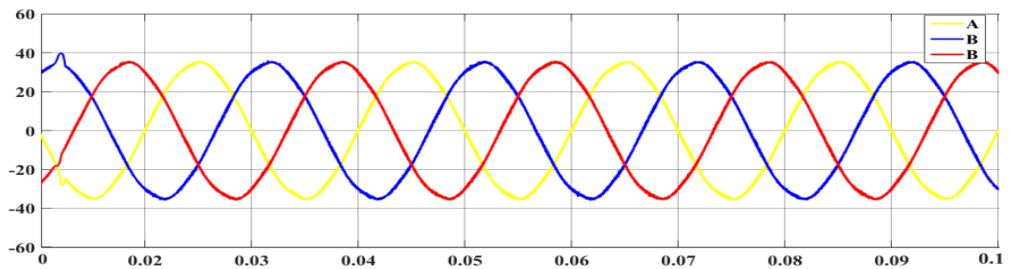


**Şekil 6.5:** Şebeke ve Pq teorisinin genel şeması.

Şekil 6.6’da gösterildiği gibi akımın dalga şeklinde bozulmalar görülmekte ve bozulmaları ortadan yok etmek için kompanseman akımı oluşturmalıdır. Kompanseman akımı kaynak gerilimi ve yük akımının yardımıyla oluşturabilir. MALAB/Simulink ortamında pq teorisini modelini/benzetimi yapıp kompanseman akımı elde edilmiştir. Şekil 6.6’da aktif filtre tarafından oluşturulan kompanseman akımının dalga şekli verilmiştir. Kompanseman akımı enjekte edildikten sonra şebekede oluşan filtrelili akımın dalga biçimi ise Şekil 6.7’de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere dalga biçimindeki harmonik bozulmalar başarılı bir şekilde giderilmiştir.

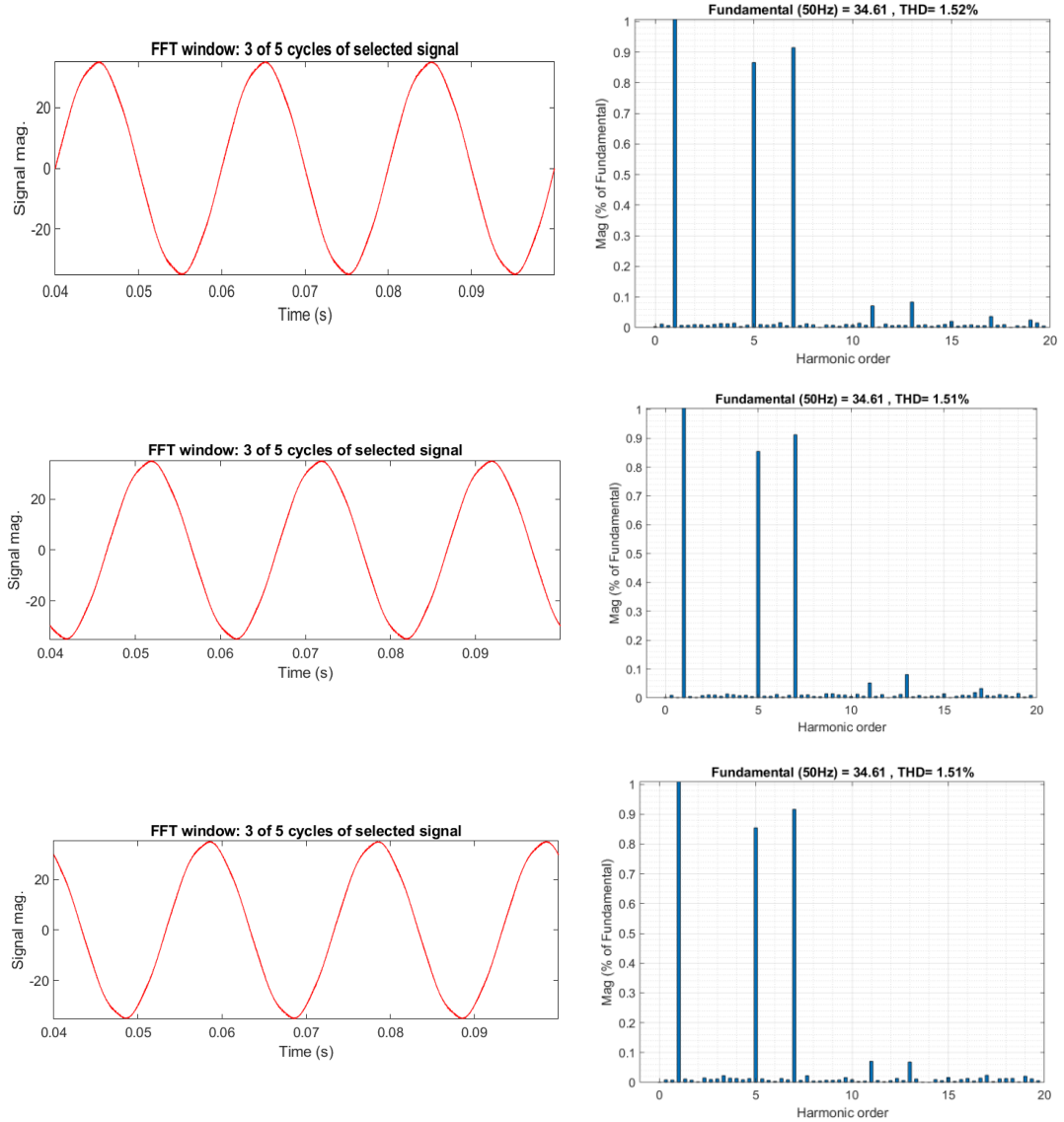


**Şekil 6.6:** Kompanseman akımı.



**Şekil 6.7:** Kompanseman edildikten sonra kaynak akımı.

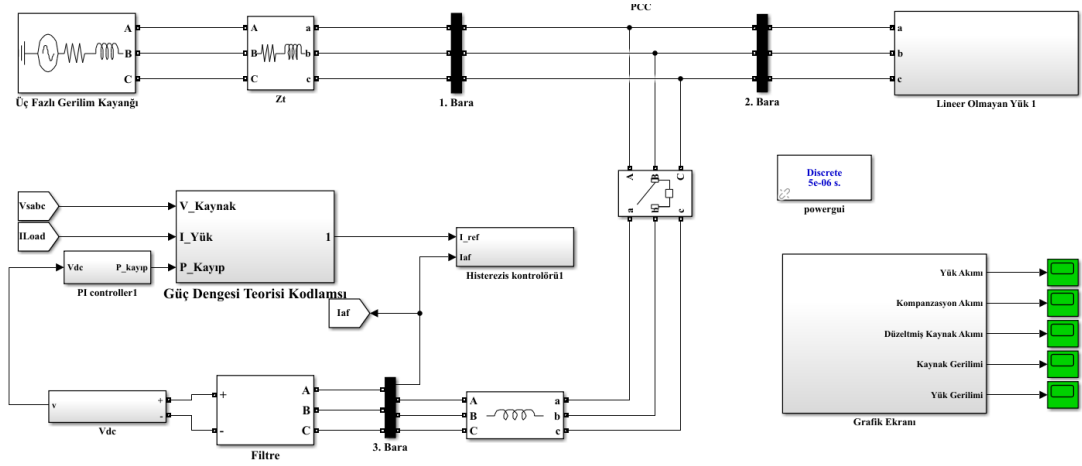
Filtre sonrası faz akımlarının dalga şekli, FFT sonuçları ve TDH değerleri Şekil 6.8’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında A, B ve C fazları için THD değerleri sırasıyla %1,52, %1,51 ve %1,51 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yöntemin filtreleme performansının gayet başarılı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 6.8:** Pq teorisi yöntemiyle yapılan filtreleme sonrası A yüküne ait A, B, C fazlarının THD analiz sonuçları.

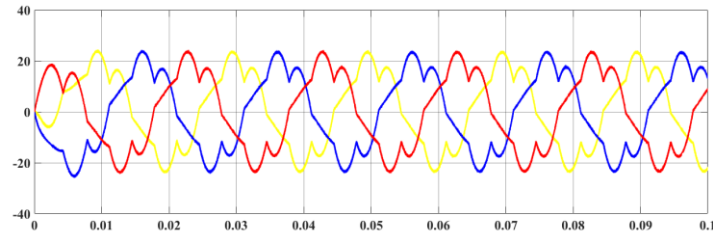
### 6.2.1.3 Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi

Tezin bu bölümünde, A yükü şebekeye bağlıken güç denge teorisini kullanarak harmoniklerin yok edilmesini sağlamaktadır. Şekil 6.9’da güç denge yöntemiyle yapılan aktif filtrenin MATLAB/SIMULINK modeli verilmiştir.

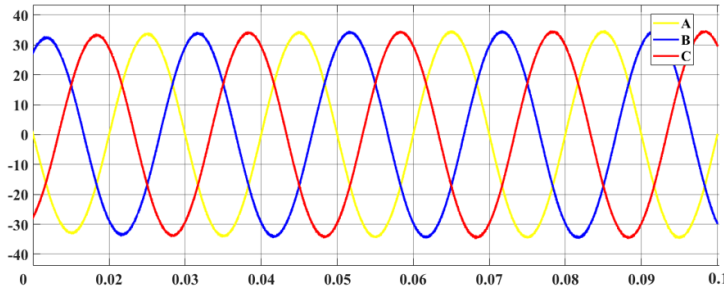


**Şekil 6.9:** Güç denge teorisiyöntemli aktif filtre yöntemin genel şeması.

Güç denge teorisini uyguladıktan sonra elde edilen kompanzasyon akımı Şekil 6.10.a'da, filtre sonrası oluşan kaynak amımı ise Şekil 6.10.b'de gösterilmektedir.



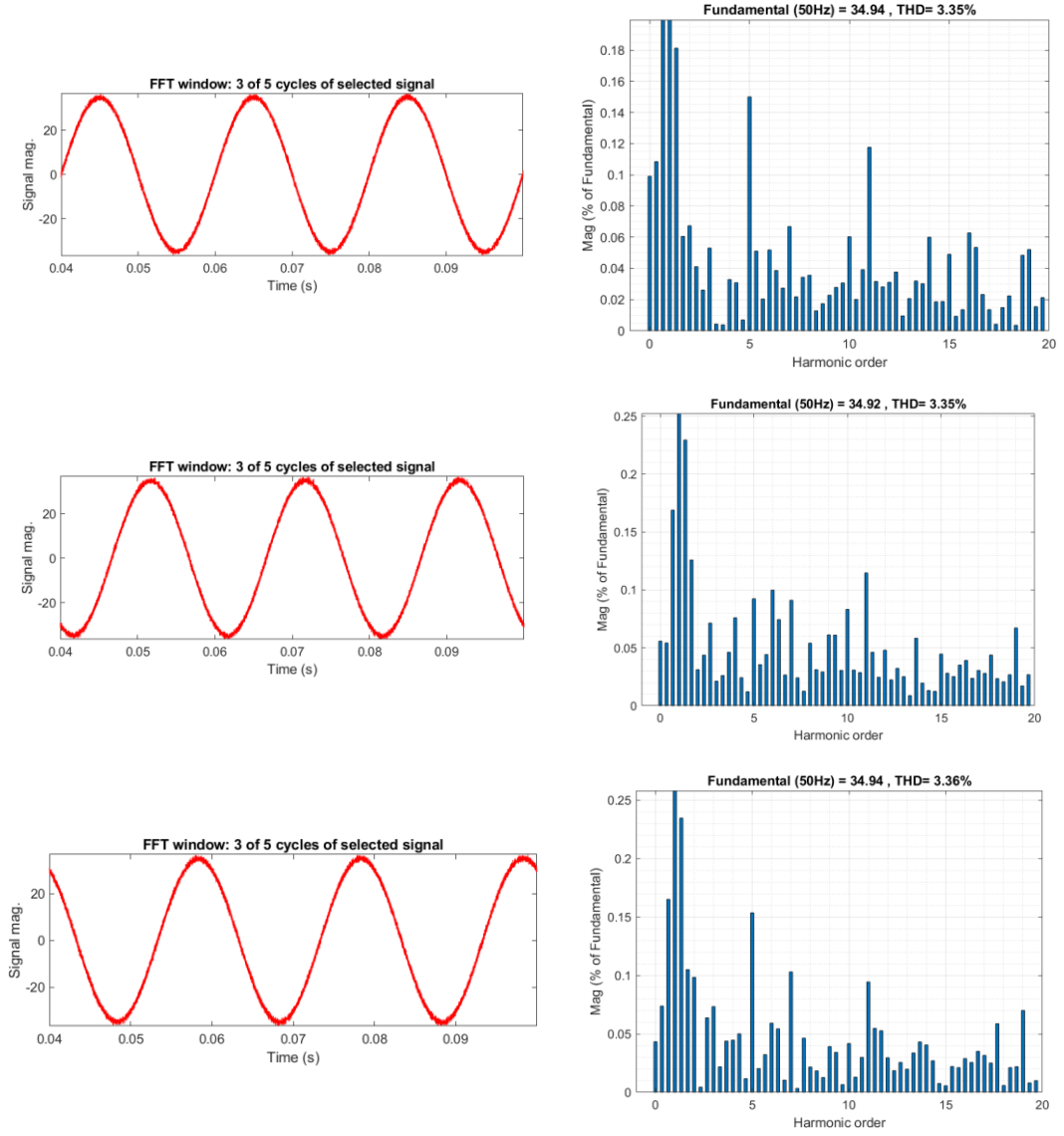
(a)



(b)

**Şekil 6.10:** a) Kompanzasyon akımı, b) Düzetmiş kaynak akımı.

Güç denge teorisii yöntemiyle elde edilen filtre sonrası faz akımlarının dalga şekli, FFT sonuçları ve TDH değerleri Şekil 6.11'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, A, B ve C fazları için THD değerleri sırasıyla %3,35, %3,35 ve %3,36 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yöntemin filtreleme performansının yeterli olduğunu göstermektedir.



**Şekil 6.11:** Güç denge teorisi yöntemiyle yapılan filtreleme sonrası A yüküne ait A, B, C fazlarının THD analiz sonuçları.

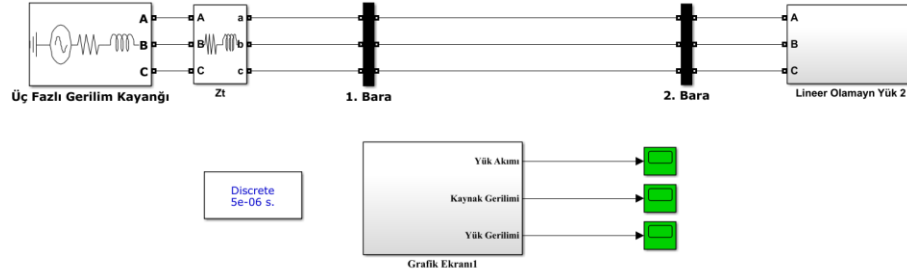
## 6.2.2 B Yüğü için Sistemin Analizleri

Kompanzasyon akımının üretebilmesinde anlık reaktif güç teorisiyle güç denge teorisinin arasında hangisi daha etkin olduğunu gösterebilmek için A yükü için yapılmış olan benzer üç ayrı analizi aynı şekilde B yükü için yapılmıştır.

1. Filtresiz Sistemin Analizi
2. Anlık Güç reaktif Güç yöntemiyle Sistemin Analizi
3. Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi

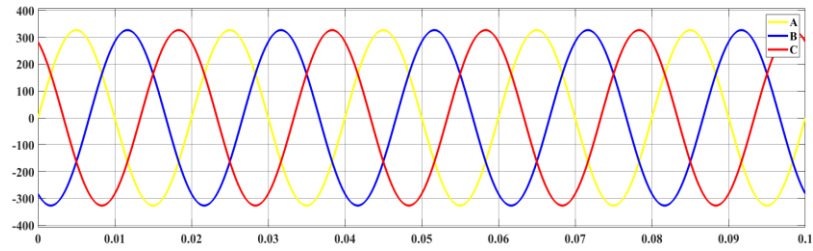
### 6.2.2.1 Filtresiz Sistemin Analizi

Şekil 6.13'te modeli verilen şebekenin filtersiz durumunda lineer olmayan karakteristiğine sahip olan B yük üzerinde analiz yapılmıştır.



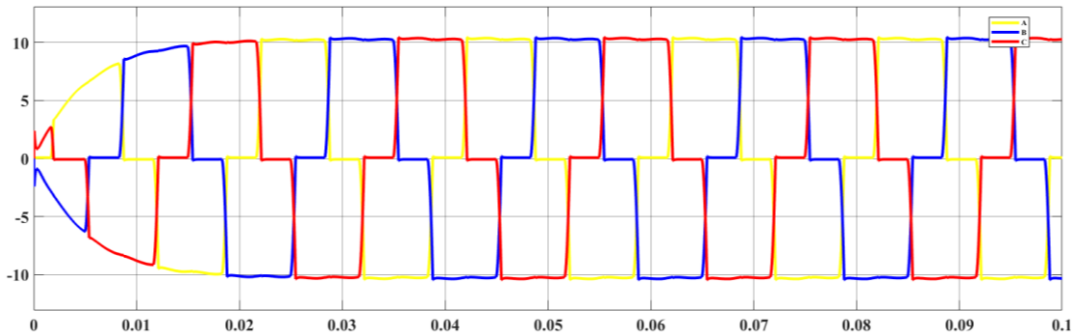
Şekil 6.12: Filtresiz sistemin genel şeması.

Şebeke filtersiz durumundayken beklenildiği gibi gerilim dalgasında değişiklik olmadığını Şekil 6.13'te görülmektedir.



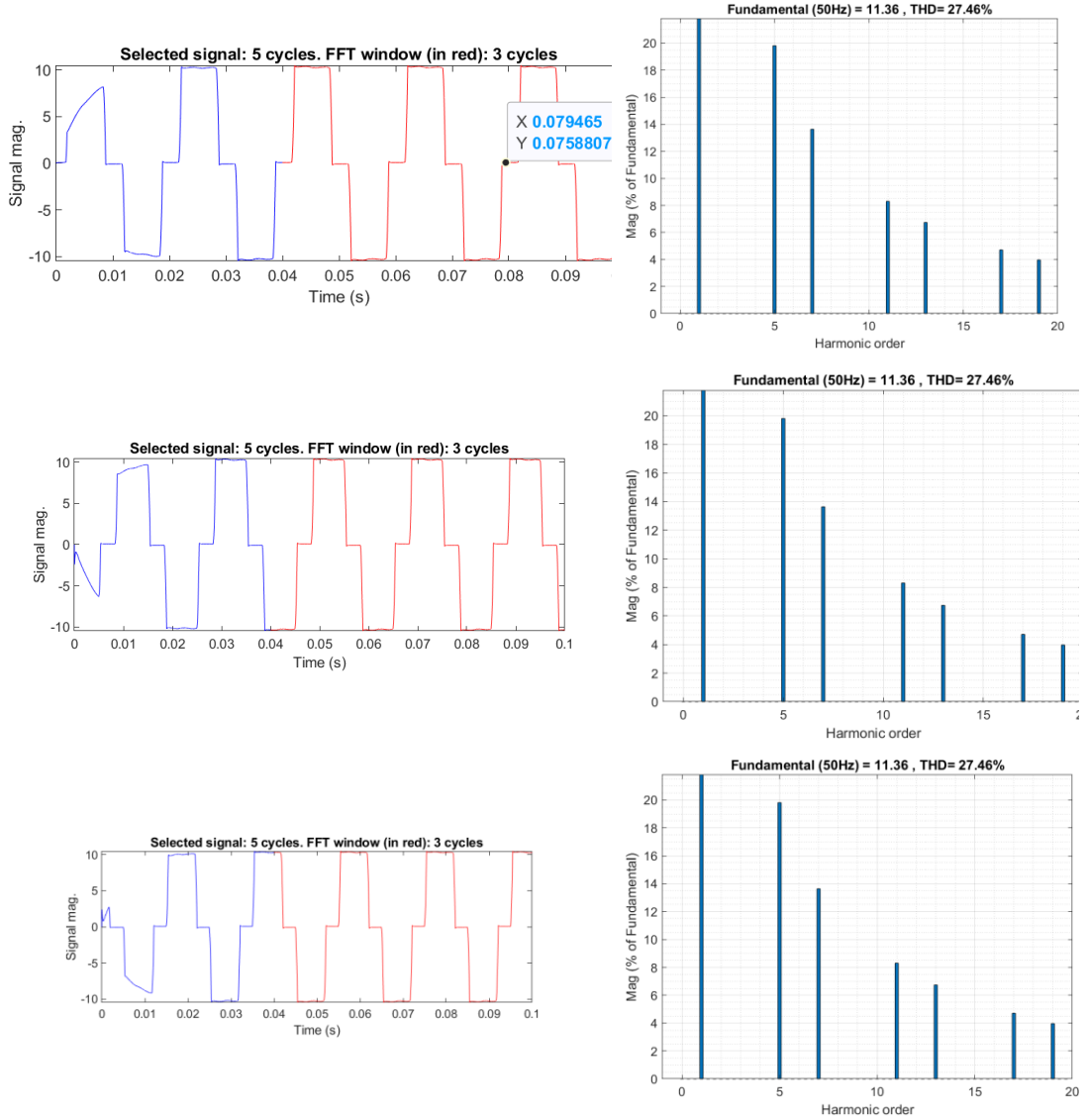
Şekil 6.13: Şebeke gerilimi.

Şebekeye B yükü bağlanması durumunda çekilen harmonikli akım dalgası Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14: B yükü bağlı ikinde çekilen harmonikli akım.

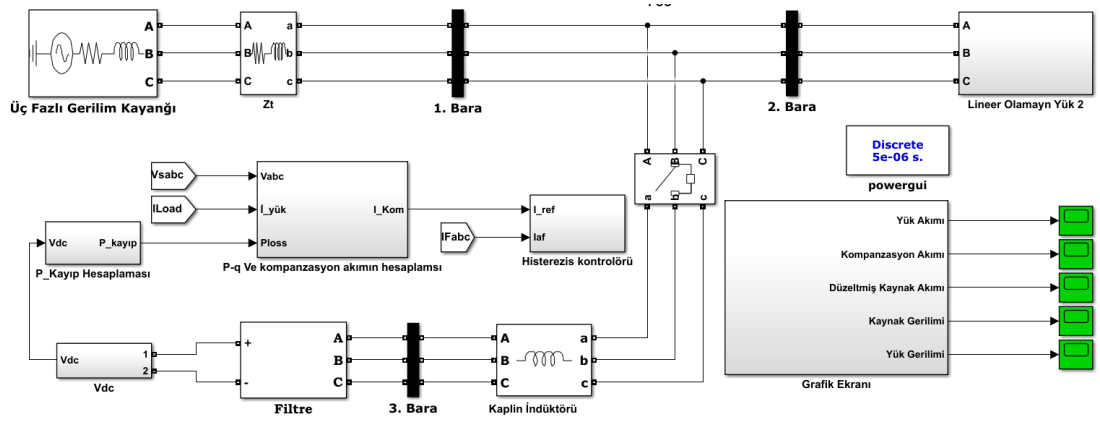
B yükü bağlı iken faz başına oluşan harmoniklerin THD değerleri Şekil 6.15’de gösterilmektedir. A, B ve C fazları için THD değerleri tüm fazlar için %27,46 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.15: B yükü bağlı iken filtresiz durumda A, B, C fazların THD analiz sonuçları.

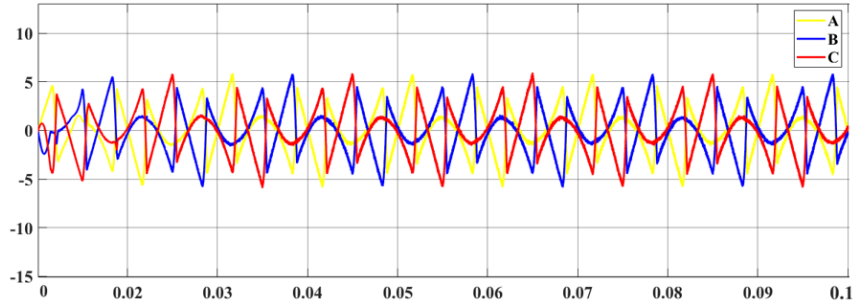
### 6.2.2.2 Anlık Reaktif Güç Teori Yöntemiyle Sistemin Analizi

B yükü bağlı iken anlık reaktif güç teorisinin yardımıyla kurulan aktif filtrenin genel şeması Şekil 6.16’da gösterilmektedir.

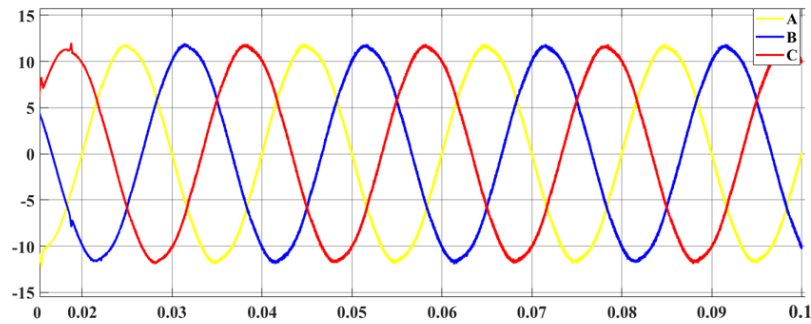


**Şekil 6.16:** B yükü bağlı iken anlık güç teorisi yöntemiyle kurulan aktif filtre modelinin genel şeması.

B yükünün bağlı olması durumunda anlık reaktif güç teorisiyle elde edilmiş kompanzasyon akımı Şekil 6.17’de ve şebekenin kaynak akımı düzelttikten sonraki hali Şekil 6.18’de gösterilmektedir.



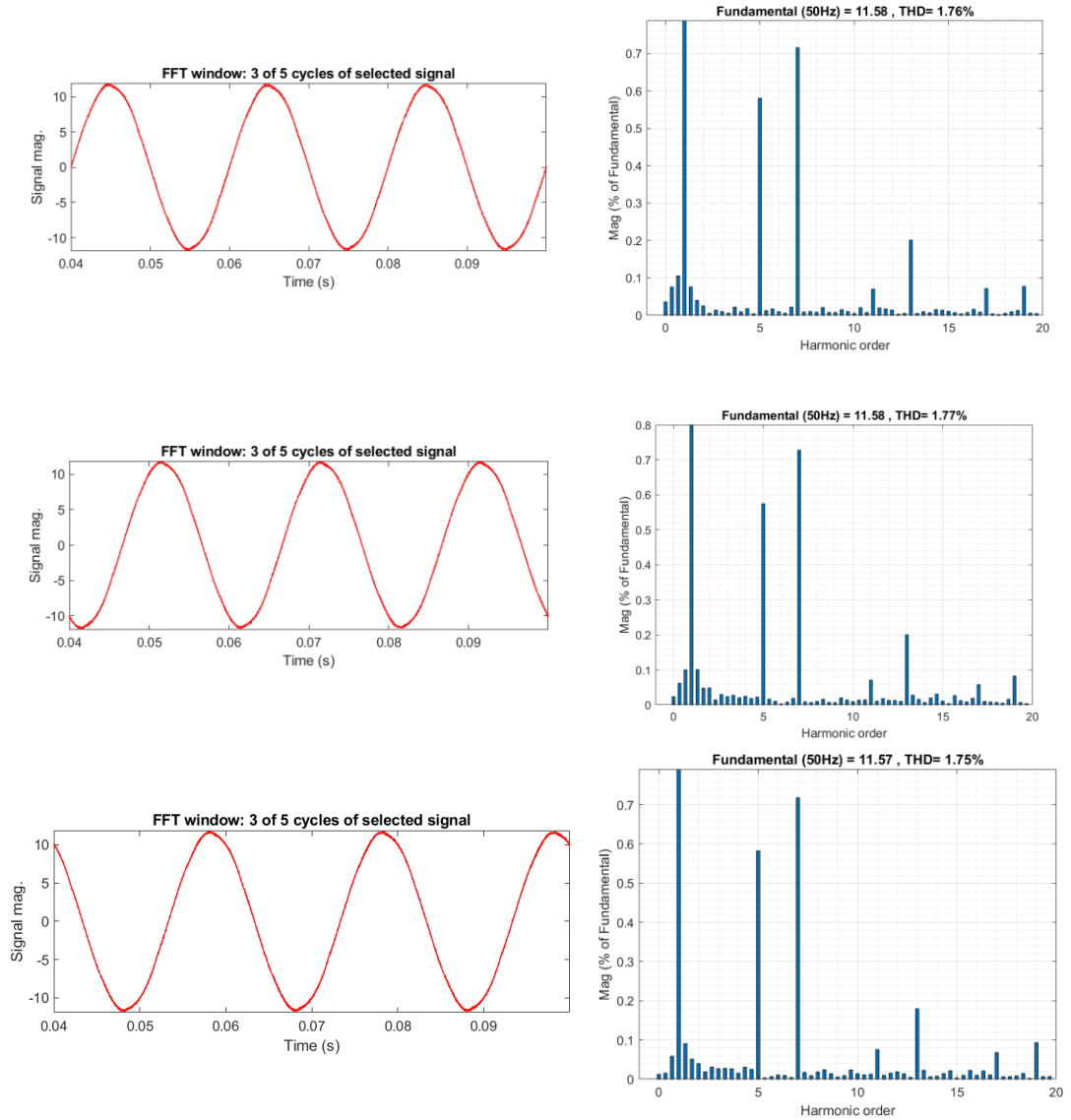
**Şekil 6.17:** B yükü bağlı iken anlık reaktif güç teorisi yöntemiyle elde edilen kompanzasyon akımı.



**Şekil 6.18:** B yükü bağlı iken anlık reaktif güç teorisi yöntemiyle kompanzasyon edildikten sonraki kaynak akımı.



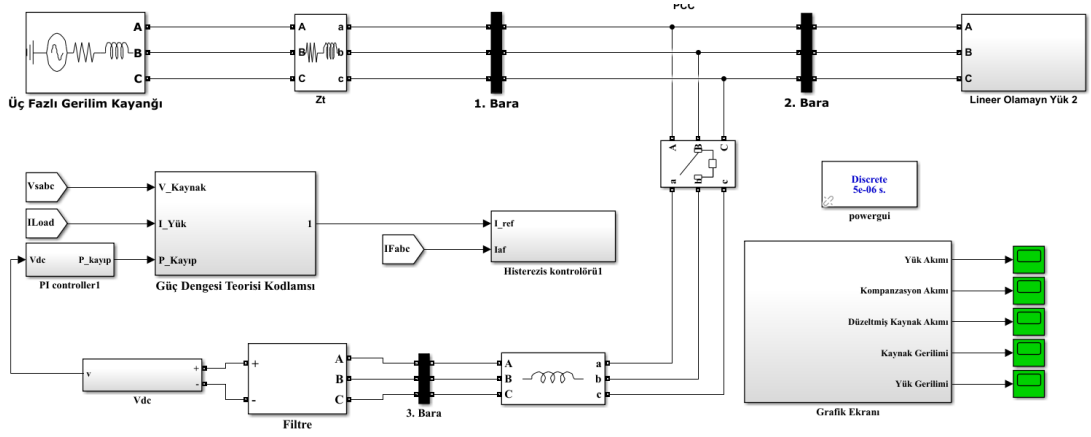
B yükü için anlık reaktif güç teorisi yardımıyla elde edilen filtre sonrası faz akımlarının dalga şekli, FFT sonuçları ve TDH değerleri Şekil 6.19'da sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında A, B ve C fazları için THD değerleri sırasıyla %1,76, %1,77 ve %1,75 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yöntemin B yükü içinde filtreleme performansının gayet başarılı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 6.19:** B yükü bağlı iken anlık güç teorisi yöntemiyle yapılan aktif filterinin THD sonuçları.

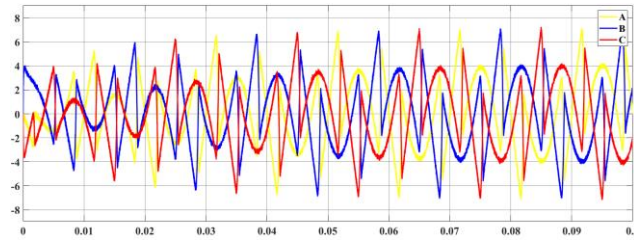
### 6.2.2.3 Güç Denge Yöntemiyle Sistemin Analizi

B yükü için güç denge yöntemiyle kurulan aktif filtre modeline ait genel şema Şekil 6.20'de verilmiştir.

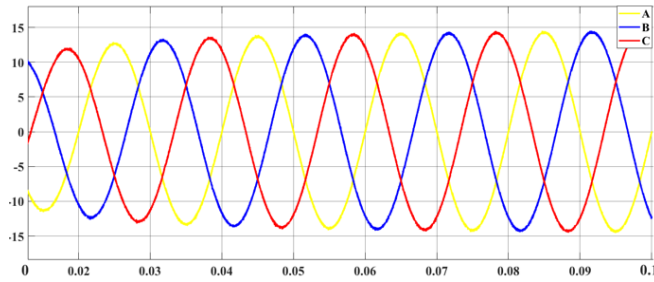


**Şekil 6.20:** B yükü için güç denge yöntemiyle kurulan aktif filtre modeli.

B yükünün bağlı olması durumunda güç denge yöntemiyle elde edilmiş kompanzasyon akımı Şekil 6.21’de ve şebekenin kaynak akımı düzelttikten sonraki hali Şekil 6.22’de gösterilmektedir.

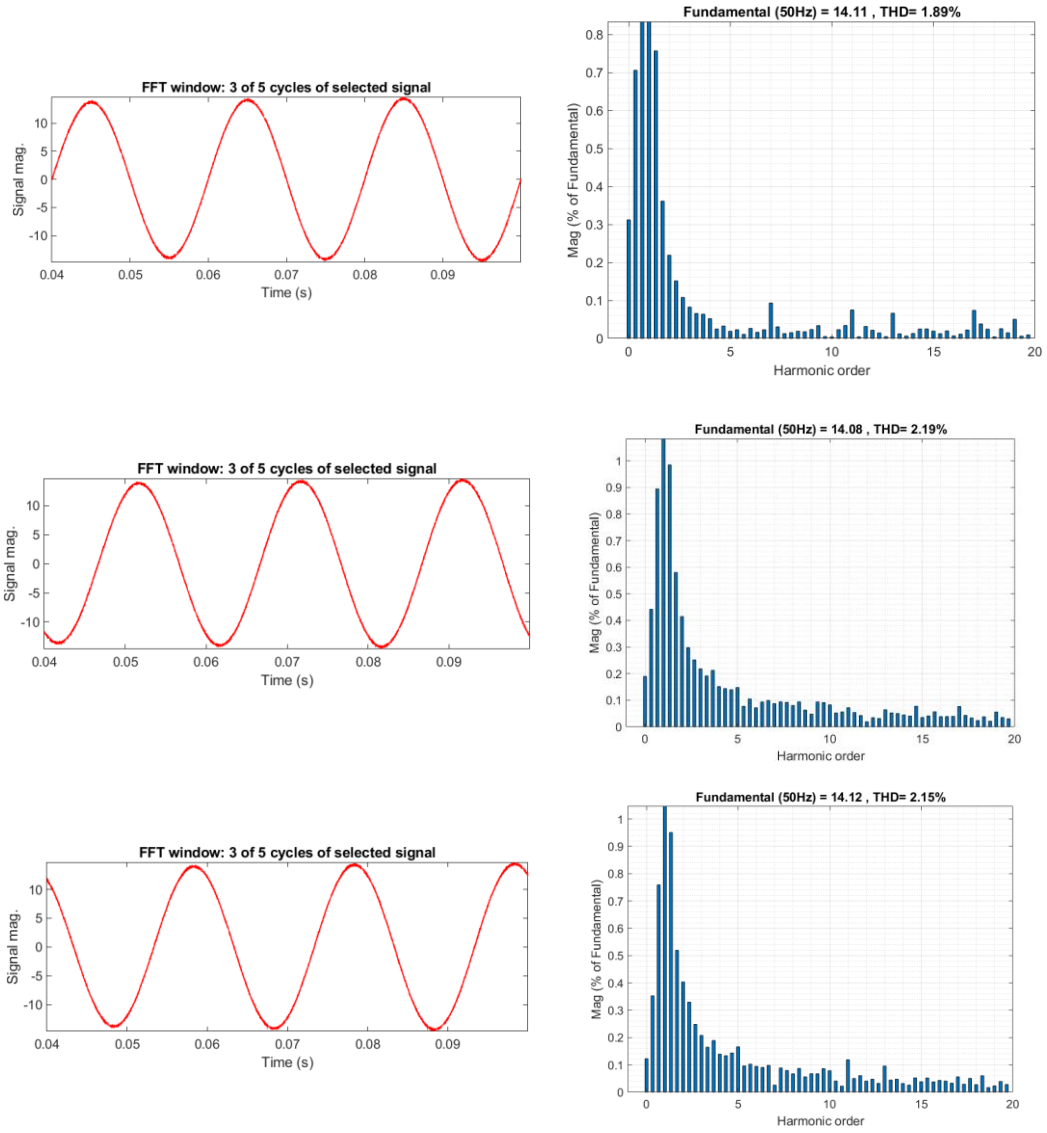


**Şekil 6.21:** B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle elde edilen kompanzasyon akımı.



**Şekil 6.22:** B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle kompanzasyon edildikten sonraki kaynak akımı.

B yükü için güç denge yöntemiyle elde edilen filtre sonrası faz akımlarının dalga şekli, FFT sonuçları ve TDH değerleri Şekil 6.23’te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında A, B ve C fazları için THD değerleri sırasıyla %1,89, %2,19 ve %2,15 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yöntemin B yükü içinde filtreleme performansının başarılı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 6.23:** B yükü bağlı iken güç denge yöntemiyle yapılan aktif filterinin THD sonuçları.

### 6.3 Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında iki yük (A ve B grubu) üzerinde anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisini kullanarak aktif filtre tasarımı gerçekleştirilmiş ve filtreleme performansları THD değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Her iki teori için sistemin analizi filtresiz ve filtrelili olarak gerçekleştirilmiştir. FFT analizleri 0-0.1 zaman aralığında yapılmıştır. Her iki yöntemin THD sonuçları filtrelili ve filtresiz olmak üzere A ve B yük grubu için sırasıyla Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** A yükü için THD analiz sonuçları.

A GRUP YÜKÜ			
Toplam Harmonik Bozulma Oranı	Filtresiz	Filtreli (anlık reaktif güç teorisi)	Filtreli (güç denge teorisi)
<b>A Fazı</b>	%9.37	%1.52	%3.35
<b>B Fazı</b>	%9.37	%1.51	%3.35
<b>C Fazı</b>	%9.37	%1.51	%3.36

**Tablo 6.2:** B yükü için THD analiz sonuçları.

B GRUP YÜKÜ			
Toplam Harmonik Bozulma Oranı	Filtresiz	Filtreli (anlık reaktif güç teorisi)	Filtreli (güç denge teorisi)
<b>A fazı</b>	%27.46	%1.76	%1.89
<b>B fazı</b>	%27.46	%1.77	%2.19
<b>C Fazı</b>	%27.46	%1.75	%2.15

Tablo 6.1’de görüldüğü gibi A yük grubu için filtresiz durumda A, B, C fazları için THD değerleri %9,37 olarak tespit edilmiştir. A yük grubu için tasarlanan aktif filtrede anlık reaktif güç teorisi ile yapılan filtrelemede THD oranı sırasıyla A, B, C fazları %1,52, %1,51 ve %1,51 olarak bulunmuştur. Aynı değerler güç denge teorisinde %3,35, %3,35 ve %3,36 olarak hesaplanmıştır.

Benzer analiz B yük grubu için gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Tablo 6.2’de verilmiştir. Filtresi durumda THD değerleri tüm fazlar için %27,46 olarak tespit edilmiştir. Anlık reaktif güç teorisi ile yapılan filtrelemede THD oranı sırasıyla A, B, C fazları %1,76, %1,77 ve %1,75 iken güç denge teorisinde bu değerler %1,89, %2,19 ve %2,15 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki her iki yöntemde akım harmoniklerini başarılı bir şekilde azaltmış olmasına rağmen anlık reaktif güç teorisi güç denge teorisine göre daha başarılı sonuç vermektedir.

## 7. SONUÇLAR

Tez tez çalışmasında en önemli güç kalitesi problemlerinden harmoniklerin eliminasyonu üzerine şönt aktif filtre tasarım ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada aktif filtre için anlık reaktif güç ve güç denge teorisi olmak üzere iki farklı yöntem modellenmiş, yöntemlerin filtreleme performansı nonlineer yük davranışı sergileyen üç fazlı tam dalga doğrultuculu sistem üzerinden incelenmiştir. Yöntemlerin THD performansı iki farklı yük grubu (A ve B) üzerinde gözlenmiştir. Her iki teori için sistemin analizi filtresiz ve filtreli olarak gerçekleştirilmiştir.

A yük grubunda tüm fazlar için THD değerleri % 9,37'den anlık reaktif güç teorisi ile ortalama %1,513 inerken güç denge teorisinde bu oran ortalama %3,353' inmektedir. Benzer şekilde B yük gurubu için tüm fazlar için THD değerleri %27,46'dan anlık reaktif güç teorisi ile faz ortalaması %1,76 inerken güç denge teorisinde bu oran %2,076'ya inmektedir.

Önerilen anlık reaktif güç teorisi ve güç denge teorisi, bozulmuş kaynak akımını orijinal sinüzoidal dalga biçimine yaklaştırmakta olup dengeli güç sistemlerinde harmonikli akımının etkisini iyi bir seviyede azaltabilmektedir. Sonuçlar anlık reaktif güç teorisinin harmoniklerin giderilmesi noktasında daha etkili olduğunu göstermektedir.

## 8. KAYNAKLAR

Afonso, J. Feritas, L. M. S. and Martins, J. S., “Pq Theory power components calculations”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1 (1), (2003)

Akagi, H. Nabae, A and Atoh, S., “Control Strategy of Active Power filters using multiple voltage source PWM converters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1A-22 (3), (1986).

Akagi, H. Watanabe, E. H. & Aredes, M., Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Hoboken-New Jersey: *John Willey and Sons*, (2007)

Bilge, M., “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, (2008)

Blooming, T.M., Carnovale, D.J. “Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits”, *Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 1-9, (2006)

Cui, Yl., Liu, H., Wang, Jq., “. Simulation and reliability analysis of shunt active power filter based on instantaneous reactive power theory”, *J. Zhejiang Univ*, 8 (3), 416-421, (2007).

Efe, S. B., “Endüstriyel Tesisler için Aktif ve Pasif Harmonik Filtre Uygulaması”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 65-76, (2016).

Francisco C. D. L. R., Harmonics and power systems, Hazelwood, Missouri, U.S.A: *CRC Press Taylor & Francis Group*, (2006).

Gopal, M.R., Yarnagula, S., “Simulation and analysis of shunt active power filter for power quality improvement”, *International Journal Of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 3 (1), 26-31, (2014).

Gündüz, H., Demitaş, M., İlten, E., Çalgan, H., “Paralel aktif güç filtresi için bulanık uyarlamalı kesirli PI denetleyici tasarımı”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (3), 1975-1994, (2020).

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 10,1-29, (2014).

Kalair, A., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z., & Khan, N., "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187, (2017).

Kaufman, J. E., IES, I. Lighting Handbook, *Illuminating Engineering Society of North, New York, America*, 7, (1981).

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., & Arıkan, O., Elektrik tesislerinde harmonikler. İstanbul: *Birsen Yayınevi*, (2003).

Mahajan, K.M., George, S., Thale, S., "Simulation of shunt active filter using DQ theory", *Proceedings of the 3rd Biennial National Conference (NCNTE'12)*, India, 21-25, (2012).

Motta, L., Faundes, N., "Active/passive harmonic filters: Applications, challenges & trends", *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Munich, Germany, 657-662, (2016).

Munteanu, T., Gurguiatu, G., Balanuta, C., "Comparison Between Different Control Strategies for Shunt Active Power Filters", *Buletinul AGIR nr, 3*, 385-390, (2012).

ÖZÇİRA, S., "Aktif Güç Filtrelerinin Temel Seçim Esaslarının Kompanze Edilmesi Gereken Büyüklüğe Göre Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (3), 691-704, (2018).

Sanam, J., Himaja, Y., Amulya, G. and Muppalla, N. K., "Reduction of Harmonics using PQ based Hysteresis Controlled Active Filter," *2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, 1-6, (2021)

Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A., "A new control approach to three-phase active filter for harmonics and reactive power compensation", *IEEE transactions on Power systems*, 13 (1), 133-138, (1998).

Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A., “A review of active filters for power quality improvement”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46 (5), 960-97, (1999).

Singh, B., Kumar, S., “Modified power balance theory for control of DSTATCOM”, *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, India, 1-8, (2010).

Singh, H., Kour, M., Thanki, D. V., & Kumar, P., “A review on Shunt active power filter control strategies”, *Int. J. Eng. Technol*, 7 (4), 121-125, (2018).

Sucu, M., “Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu”, Yüksek Lisans, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).

Vanajakshi, N., & Rao, G. N. “A three phase Shunt Active power Filter for harmonics reduction”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2 (9), 110-114, (2015).

Wagner, V. E., Balda, J. C., Griffith, D. C., Mceachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., ... & Jewell, W. T. “Effects of harmonics on equipment”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8 (2), 672-680, (1993).

Yılmaz, M., “Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, (2006).

Zamora, I., Mazon, A. J., Eguia, P., Albizu, I., Sagastabeitia, K. J., & Fernández, E. “Simulation by MATLAB/Simulink of active filters for reducing THD created by industrial systems”, *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 3, (2003).

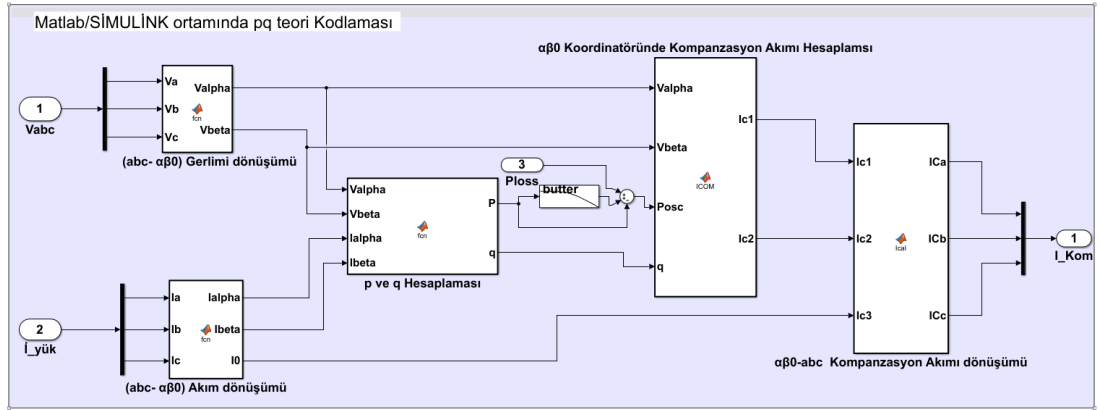


# **EKLER**

## 9. EKLER

Ekler kısmında, MATLAB/SİMULINK ortamında yapılmış kodlama yer almaktadır. İlk ekler, anlık reaktif güç teorisinin kodlaması ve ikinci ekler ise, güç denge teorisi yer almaktadır.

### 1. MATLAB/SİMULINK ortamında anlık reaktif güç teorisinin kodlaması



#### a. Pq Teorinin Geneler Şeması

##### 1. $(abc-\alpha\beta 0)$ Gerilimi dönüşümü

```
function [Valpha, Vbeta]= fcn(Va, Vb, Vc)

Valpha = sqrt(2/3)*((Va+(-0.5*Vb)+(-0.5*Vc)))
Vbeta = sqrt(2/3)*((sqrt(3)/2)*Vb - ((sqrt(3)/2)*Vc))
```

##### 2. $(abc-\alpha\beta 0)$ Akım dönüşümü

```
function [Ialpha, Ibeta, I0]= fcn(Ia, Ib, Ic)

I0 = sqrt(2/3)*(((1/sqrt(2))*Ia)+((1/sqrt(2))*Ib)+((1/sqrt(2))*Ic))
Ialpha = sqrt(2/3)*(Ia+(-0.5*Ib)+(-0.5*Ic))
Ibeta = sqrt(2/3)*((sqrt(3)/2)*Ib - ((sqrt(3)/2)*Ic))
```

##### 3. $p$ ve $q$ Hesaplaması

```
function [P, q] = fcn(Valpha, Vbeta, Ialpha, Ibeta)

P=Valpha*Ialpha+Vbeta*Ibeta;
q=(-Vbeta*Ialpha)+Valpha*Ibeta;
```

##### 4. $\alpha\beta 0$ Koordinatöründe Kompanzasyon Akımı Hesaplaması

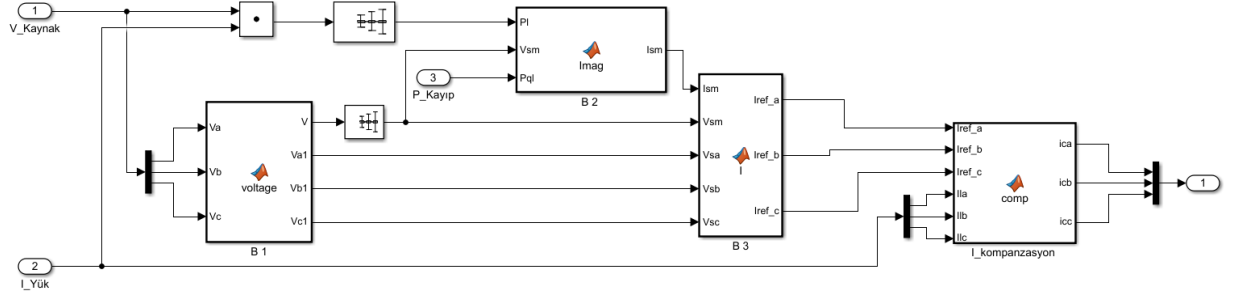
```
function [Ic1,Ic2] = ICOM(Valpha,Vbeta, Posc,q)
%#eml
Ic1 = (-1/(Valpha^2 + Vbeta^2))*((Posc*Valpha)+(q*Vbeta));
Ic2 = (-1/(Valpha^2 + Vbeta^2))*((Posc*Vbeta)-(q*Valpha))
```

## 5. $\alpha\beta 0$ -abc Kompanzasyon Akımı dönüşümü

```
function [ICa,ICb,ICc] = Ical(Ic1, Ic2,Ic3)
%#eml

ICa = sqrt(2/3)*(Ic1+(0.7072*Ic3));
ICb = sqrt(2/3)*((-0.5*Ic1)+((sqrt(3)/2)*Ic2)+(0.7072*Ic3));
ICc = sqrt(2/3)*((-0.5*Ic1)-((sqrt(3)/2)*Ic2)+(0.7072*Ic3));
```

## 2. MATLAB/SİMULNİK ortamında Güç Denge Teorinin kodlaması



### b. Güç Denge Teorinin Geneler Şeması

#### 1. B1

```
function [V, Va1,Vb1,Vc1] = voltage(Va,Vb,Vc)

V = ((Va^2 + Vb^2 + Vc^2)*(2/3))^(.5);
% V = 400/(3^.5);
Va1 = Va;
Vb1 = Vb;
Vc1 = Vc;
end
```

#### 2. B2

```
function Ism = Imag(Pl,Vsm, Pql)

IsmP = (2/3)*(Pl/Vsm);
IsmQ = (2/3)*(Pql/Vsm);
Ism = IsmP + IsmQ;
end
```

#### 3. B3

```
function [Iref_a,Iref_b,Iref_c] = I(Ism,Vsm, Vsa,Vsb,Vsc)

Iref_a = Ism*(Vsa/Vsm);
Iref_b = Ism*(Vsb/Vsm);
Iref_c = Ism*(Vsc/Vsm);
end
```

#### 4. I\_kompanzasyon

```
function [ica,icb,icc] = comp(Iref_a,Iref_b,Iref_c, Ila,Ilb,Ilc)

ica = Ila-Iref_a;
icb = Ilb-Iref_b;
icc = Ilc-Iref_c;
end
```