



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ÜRETTİĞİ
HARMONİKLERİN AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ İLE
AZALTILMASI: BİR ANALİZ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

Yusuf ERTAŞ

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ÜRETTİĞİ
HARMONİKLERİN AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ İLE
AZALTILMASI: BİR ANALİZ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

Yusuf ERTAŞ

**Danışman
Doç. Dr. Ömer Ali KARAMAN**

Diğer Jüri Yeleri

Dr. Öğr. Üyesi Şehmus FİDAN Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SAĞLAM

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf ERTAŞ tarafından hazırlanan “Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Ürettiği Harmoniklerin Aktif Güç Filtreleri İle Azaltılması: Bir Analiz ve Simülasyon Çalışması” adlı tez çalışması 22/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SAĞLAM

.....

Danışman

Doç. Dr. Ömer Ali KARAMAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şehmus FİDAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Yusuf ERTAŞ
22/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ÜRETTİĞİ HARMONİKLERİN AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ İLE AZALTILMASI: BİR ANALİZ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Yusuf ERTAŞ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer Ali KARAMAN

2025, 68 Sayfa

Artan enerji talebi nedeniyle karbon temelli yakıt rezervleri hızla tükenmekte, bu durum enerji tedarik zincirinde zorluklara yol açmaktadır. Bu nedenle, gelişmiş devletler elektrikli araç(EA) üretimini teşvik etmektedir. EA’larda kullanılan güç elektroniği devreleri doğrusal olmayan elemanlar içermekte ve bu elemanlar harmonik üretimine neden olmaktadır. Harmonikler, güç sistemi süreçlerinde bozulmaya yol açmaktadır. Harmoniklerin azaltılmasında filtreler önemli bir rol oynamaktadır. Bu hususta pasif filtrelerin çeşitli dezavantajlarından dolayı aktif filtreler ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında elektrikli araç batarya şarj sistemlerinin neden olduğu harmoniklerin azaltılması için iki farklı paralel aktif filtre modellemesi yapılmıştır. Sabit akım şarj profiline sahip bir elektrikli araç batarya şarj modeli geliştirilmiştir. Bu modelde yapılan benzetim çalışmasında toplam harmonik bozunum (THB) değeri yüzde 19 seviyelerinde çıkmıştır. Önerilen yapay sinir ağları (YSA) kontrollü paralel aktif filtresi ile bu THB değeri yüzde 4.66 seviyelerine düşürülmüştür. Ayrıca yapılan ikinci paralel aktif filtre modelinde YSA yerine senkron referans çatı yöntemi kullanılarak THB değeri yüzde 1 seviyelerine kadar indirilmiştir. Sonuç olarak her iki paralel aktif filtre modeli ile benzetim sistemindeki THB değeri uluslararası kuruluşların belirlemiş olduğu sınır değeri olan yüzde 5’in altına düşürülerek başarılı bir sonuç ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: harmonikler, aktif güç filtreleri, elektrikli araçlar, batarya şarj sistemi

ABSTRACT

MASTER THESIS

REDUCTION OF HARMONICS PRODUCED BY ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS WITH ACTIVE POWER FILTERS: AN ANALYSIS AND SIMULATION STUDY

Yusuf ERTAŞ

Batman University Graduate Education Institute

Electrical Electronic Engineering Department of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer Ali KARAMAN

2025, 68 Pages

Due to the increasing energy demand, carbon-based fuel reserves are rapidly depleting, which leads to difficulties in the energy supply chain. For this reason, developed countries encourage the production of electric vehicles (EVs). Power electronic circuits used in EVs contain nonlinear elements and these elements cause harmonic production. Harmonics cause distortion in power system processes. Filters play an important role in reducing harmonics. In this regard, active filters come to the fore due to various disadvantages of passive filters. In this thesis study, two different parallel active filter models were made to reduce harmonics caused by electric vehicle battery charging systems. An electric vehicle battery charging model with a constant current charging profile was developed. In the simulation study conducted in this model, the total harmonic distortion (THB) value was found to be at the level of 19 percent. With the proposed artificial neural network (ANN) controlled parallel active filter, this THB value was reduced to the level of 4.66 percent. In addition, in the second parallel active filter model, the synchronous reference frame method was used instead of the ANN, and the THB value was reduced to the level of 1 percent. As a result, a successful result was achieved by reducing the THB value in the simulation system with both parallel active filter models below the limit value of 5 percent determined by international organizations.

Keywords: harmonics, active power filters, electric vehicles, battery charging system

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde rehberlik eden, bilgi ve tecrübesini aktarmada kendisini eksik etmeyen, çalışma sürecinin son gününe kadar her türlü fedakârlığı gösteren ve kıymetli zamanını esirgmeden yüksek lisans tezime her yönüyle katkı sunan danışman hocam sayın Doç. Dr. Ömer Ali KARAMAN' a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca; hayatım boyunca, benim için en iyi şartları sağlayan, daima fedakâr davranan ve bugünlere gelmeme vesile olan saygıdeğer anneme ve babama şükranlarımı sunuyorum.

Yusuf ERTAŞ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Harmonik Tanımı.....	2
1.2. Harmonik Üreten Kaynaklar.....	4
1.3. Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri	5
1.3.1. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkileri.....	6
1.3.2. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkileri.....	6
1.3.3. Harmoniklerin elektrik makineleri üzerindeki etkileri	7
1.3.4. Harmoniklerin iletim sistemleri üzerindeki etkileri.....	7
1.3.5. Elektrikli araç batarya şarj istasyonları ve güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri	8
1.4. Harmonik Standartları.....	10
1.5. Harmonik Azaltma Yöntemleri	11
1.5.1. Aktif güç filtreleri	12
1.5.1.1. Seri aktif filtre	13
1.5.1.2. Paralel aktif filtre	14
1.5.1.3. Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi	15
1.5.2. Pasif filtreler	16
1.5.3. Hibrit filtreler	17
1.6. Harmonik Çözümünde Aktif Filtrelerin Önemi ve Avantajları.....	17
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	19
3. YÖNTEM	26
3.1. Elektrikli Araç Batarya Şarj Stratejileri.....	26
3.1.1. Sabit akım	26
3.1.2. Sabit gerilim.....	27
3.1.3. Darbeli şarj (Pulse Charging-PC)	28
3.1.4. Refleks şarj veya negatif darbeli şarj (NPC)	29
3.1.5. Damlama şarjı veya konik akım (Trickle Charge or Taper-Current-TC).....	30
3.1.6. Yüzdürme şarjı (Float Charge-FC)	30
3.1.7. Sabit akım ve sabit gerilim (SA-SG)	31
3.2. Aktif Güç Filtresi	32
3.3. Paralel Aktif Güç Filtresi	34
3.4. Paralel Aktif Güç Filtrelerinde Referans İşaret Çıkarım Yöntemleri	39

3.4.1. Senkron referans çatı yöntemi	39
3.4.2. Yapay sinir ağları.....	41
3.4.2.1. Yapay sinir ağlarının temel özellikleri.....	44
3.4.2.2. YSA’da öğrenme algoritmaları.....	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Batarya Şarj Sistemi.....	51
4.2. YSA Kontrollü Paralel Aktif Filtre Sistemi.....	52
4.2.1. YSA kontrollü paralel aktif filtre sisteminin benzetimi.....	53
4.3. SRÇY Kontrollü Paralel Aktif Filtre Sistemi	56
4.3.1. SRÇY kontrollü paralel aktif filtre sisteminin benzetimi	57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
5.1 Sonuçlar	60
5.2 Öneriler	61
KAYNAKLAR	62

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Harmonik tanımları	3
Tablo 1.2. Kaynak ve yüke göre oluşan harmonik bileşenler	4
Tablo 1.3. IEC 61000-2-4 Endüstriyel santraller için THB limitleri	10
Tablo 1.4. IEEE gerilim harmonik limitleri	11
Tablo 1.5. Pasif ve aktif güç filtre karşılaştırılması.	17
Tablo 3.1. Eğitim algoritmalarındaki fonksiyonel detaylar.	48
Tablo 4.1. THB sonuçlarına ait özet tablo.	57



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Harmonik bileşenleri.....	2
Şekil 1.2. Üçlü-N harmoniklerinin nötr iletkeninde birleşmesi.....	6
Şekil 1.3. Seri aktif güç filtresi blok şeması.....	13
Şekil 1.4. Paralel aktif güç filtresi blok şeması.....	14
Şekil 1.5. Birleşik güç kalitesi düzenleyici blok şeması.....	15
Şekil 1.6. Pasif filtre devre topolojileri.....	16
Şekil 3.1. Sabit akım şarjında batarya voltajı ve batarya akımı.....	26
Şekil 3.2. Sabit gerilim şarjında batarya voltajı ve batarya akımı.....	27
Şekil 3.3. Darbeli şarj yönteminde akım grafiği	28
Şekil 3.4. Darbeli şarj yönteminde batarya voltajı.....	28
Şekil 3.5. Refleks profiline ait batarya şarj ve deşarj aralıkları.....	29
Şekil 3.6. SA-SG şarj yöntemi blok şeması.....	31
Şekil 3.7. Aktif güç filtresi blok şeması	33
Şekil 3.8. PAGF genel şeması	34
Şekil 3.9. SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram	38
Şekil 3.10. Çok girişli nöron yapısı	40
Şekil 3.11. Çok katmanlı YSA	41
Şekil 3.12. İleri beslemeli YSA blok şeması	42
Şekil 3.13. Geri beslemeli YSA.....	42
Şekil 3.14. Çok katmanlı sinir ağı topolojileri.....	45
Şekil 4.1. Sabit akım şarj profil benzetim modeli	49
Şekil 4.2. YSA kontrollü PAGF'nin benzetim modeli	50
Şekil 4.3. Diyot doğrultuculu R-L yükü ve şarj istasyonu Matlab/Simulink benzetim modeli	51
Şekil 4.4. PAGF sisteme entegre edilmeden önce THB değeri.....	51
Şekil 4.5. YSA kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde THB değeri	52
Şekil 4.6. YSA kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde kaynak akımı ve gerilimi	53
Şekil 4.7. YSA kontrollü PAGF sisteminde gerçek akım ve referans akıma ait dalga formu.....	53
Şekil 4.8. SRÇY kontrollü PAGF sistemi	54
Şekil 4.9. SRÇY kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde THB değeri.....	55
Şekil 4.10. SRÇY kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde kaynak akımı ve gerilimine ait dalga formu.....	56
Şekil 4.11. SRÇY kontrollü PAGF sisteminde gerçek akım ve referasn akıma ait dalga formu.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	: Kapasite değeri
F	: Frekans
f_s	: Anahtarlama frekansı
w	: Açısal hız
w_n	: Ağırlık
I_h	: Harmonik akımı
I_s	: Kaynak akımı
I_L	: Yük akımı
$\dot{I}_{boz}$	: Bozulma akımı
$\dot{I}_f$	: Kondansatör akımı
$\dot{I}_{ppmax}$	: Maksimum akım değeri
L_f	: Endüktans değeri
R	: Nöron giriş sayısı
Q_n	: Faz açısı
$P(t)$	: Anlık güç
$P_{ak}(t)$	: Aktif güç
p	: Nöron giriş değeri
V_{DA}	: Kapasitör gerilimi
V_n	: Bara gerilimi

Kısaltmalar

A	: Akım
AA	: Alternatif Akım
AGF	: Aktif Güç Filtresi
C	: Kapasitör
DA	: Doğru Akım
EA	: Elektrikli Araç
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
YGF	: Yüksek Geçiş Filtresi
$IEEE$	: Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri
L	: Endüktans

NN : Sinir Ağı
PAGEF : Paralel Aktif Güç Filtresi
PF : Pasif Filtre
DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu
R : Direnç
RTF : Radyal Temel Fonksiyonu
SA : Sabit Akım
SG : Sabit Gerilim
SA-SG: Sabit Akım/Sabit Gerilim
SAGEF : Seri Aktif Güç Filtresi
SRÇY : Senkron Referans Çatı Yöntemi
THB : Toplam Harmonik Bozunum
UPS : Kesintisiz Güç Kaynakları
GFD : Güç Faktörü Düzeltici
YSA : Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

EA'lar ve bunlara entegre şarj sistemleri, küresel ölçekte hızla yaygınlık kazanmaktadır. Bu sistemlerin yapısında, yüksek oranda güç elektroniği devreleri ve sistemleri yer almaktadır. Güç elektroniği sistemlerinin bünyesinde doğrusal olmayan birçok bileşen bulunduğundan, hem kendi işleyişlerinde hem de entegre edildikleri sistemlerde güç kalitesi sorunları meydana gelmektedir. Bu bağlamda, güç kalitesi problemleri arasında özellikle harmonik bozulmalar ön plana çıkmaktadır (Ertaş, 2023).

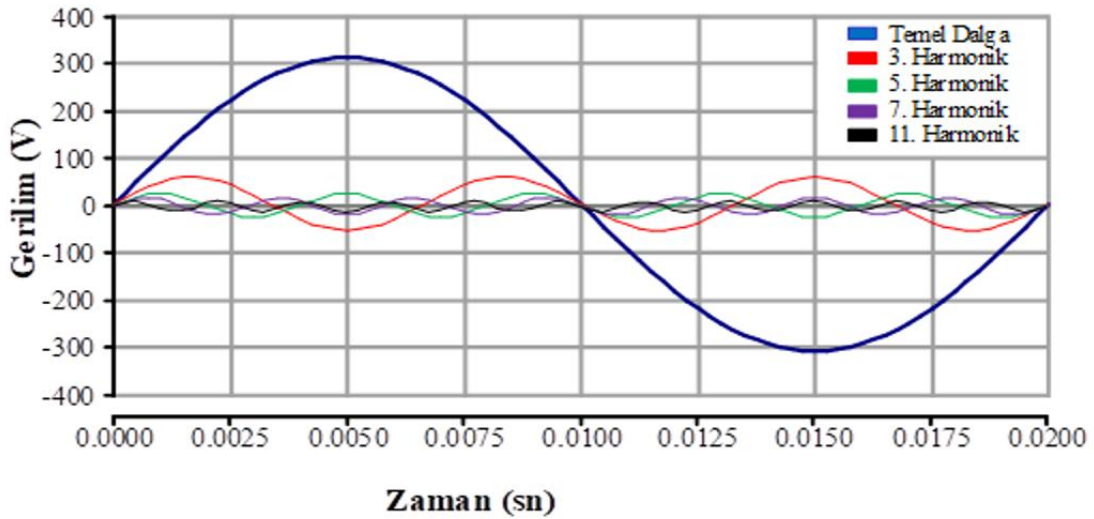
Elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulmalar, gerilimdeki ani dalgalanmalar ve geçici rejim gibi güç kalitesi problemlerinin olumsuz etkilerini önlemek veya azaltmak için farklı giderme ve yok etme teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerin en yaygın olanlarından birisi filtrelerdir (Ertaş, 2023). Pasif filtrelerin rezonansa girme ve fiziki boyutlarının büyük olması gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle bu tez çalışmasında aktif filtrelerin elektrikli araç şarj istasyonlarının ürettiği harmoniklerin giderilmesi konusu üzerinde detaylı bilgi verilecektir. Ayrıca EA'lar ve şarj sistemlerinin neden olduğu harmonik bozulmaları azaltmak için aktif güç filtreleri(AGF) yenilikçi bir çözüm önerisi olarak sunulmaktadır. Klasik kontrol yöntemleri ve yapay sinir ağları (YSA) gibi yeni nesil kontrol yaklaşımları bu çalışmada kullanılarak çalışmanın özgünlüğü ve katkısı ön plana çıkarılmaktadır.

Bu tez çalışması, güç elektroniği devrelerinin yaygın olarak kullanıldığı EA ve şarj sistemlerinin neden olduğu harmonik bozulmaların azaltılmasına yönelik önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın, ilgili alandaki mevcut literatüre bilimsel açıdan katkı sağlaması ve harmonik bozulmaların azaltılması noktasında etkin bir çözüm önerisi ortaya koyması beklenmektedir.

Tezin ilerleyen bölümlerinde, sırasıyla, tez konusu ile ilişkili daha önce gerçekleştirilmiş bilimsel araştırmaların sentezlenmiş özetleri kaynak araştırması bölümünde, tez süreci boyunca uygulanacak kontrol yöntemlerinin kapsamlı açıklamaları yöntem bölümünde, tez kapsamında elde edilen bulgular ile literatürde özetlenen çalışmalar ile karşılaştırılması, bulgular ve tartışma bölümünde sunulacaktır. Nihai olarak, tez süresince elde edilen bilgi ve bulguların önceki bölümlerde belirtilen kaynak araştırması çerçevesinde tartışılması sonucunda ulaşılan hedefler ile modelleme ile ilgili sonuçlar, tez konusu kapsamındaki durumların geliştirilmesine yönelik öneriler ise öneriler bölümünde yer alacaktır.

1.1. Harmonik Tanımı

Harmonikler, akım veya gerilim içinde sinüzoidal olmayan dalga biçimlerine benzeyen, simetrik veya asimetrik frekanslar sergileyen belirli bileşenleri ifade eder. Bu bileşenler, “harmonik bileşenler” olarak adlandırılır. Güç sistemlerinde sinüzoidal dalga biçimi tipik olarak pozitif ve negatif döngüler arasında dengelenir, bu da ağırlıklı olarak tek harmonik bileşenlerin (3., 5., 7. ve 11. harmonikler gibi) varlığına neden olur. Çift harmonikler (2., 4., 6. ve 8. harmonikler gibi) genellikle göz ardı edilir çünkü minimum değerlerle ortaya çıkma eğilimindedirler ve bu da etkilerini ihmal edilebilir kılar (Özel, 2022, s. 5). Şekil 1.1’de gerilim dalga formuna ait harmonik bileşenleri içeren bir dalga şekli sunulmuştur.



Şekil 1.1. Harmonik bileşenleri

Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, harmonik kavramını “alternatif akım veya gerilimde, temel frekansın tam sayı katları şeklinde ortaya çıkan ve doğrusal olmayan yükler ya da ideal olmayan gerilim dalga şekline sahip jeneratörler nedeniyle sinüzoidal formu bozulan bileşenler” olarak tanımlamaktadır. (Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, 2020).

Tablo 1.1. Harmonik tanımları (Şerbetçi, 2019)

Frekans	Tanım
$f = 0$	DA Bileşen
$0 < f < f_1$	Alt harmonik (Flicker)
$f = n \times f_1$ (n tam sayı ise)	Harmonik
$f = n \times f_1$ (n>1 ve n tam sayı değil ise)	Ara harmonik

Harmonikler, Tablo 1.1'de gösterildiği gibi daha ayrıntılı olarak tanımlanabilir. Frekans sıfır olduğunda, yalnızca doğru akım (DA) bileşenleri mevcuttur. Temel frekansın altındaki frekanslar veya “alt harmonikler” 0 Hz ile birincil frekans (f_1) arasında yer alır. Alt harmonikler genellikle aydınlatma armatürlerindeki hafif salınımlardan kaynaklanır.

Temel frekansın tam sayı katları olan frekanslar, ilgili düzenin harmonik bileşenlerini temsil eder. Örneğin, temel frekans 50 Hz ise, 3. harmonik 150 Hz'de meydana gelmektedir. Ara harmonikler, tam sayı çarpanlarına sahip harmonik bileşenlerle aynı özelliklere sahip olmalarına rağmen genellikle ihmal edilir (Şerbetçi, 2019).

Harmonikler tipik olarak bir sistem sinüzoidal olmayan bir kaynak veya doğrusal olmayan bir yük içerdiğinde ortaya çıkar. Tablo 1.2’de, işletme türüne bağlı olarak harmonik bileşenlerin gerilim ve akım üzerindeki etkilerini sınıflandırmaktadır. Tablo 1.2 incelendiğinde ilk olarak, sinüzoidal bir kaynağa bağlı doğrusal yüklerde, gerilim ve akım dalga formları bozulmadığı için harmonik bileşenler oluşmamaktadır. Ancak, kaynağın sinüzoidal olduğu ancak yükün doğrusal olmadığı durumda, doğrusal olmayan yüklerin etkisiyle akım dalga formunda harmonik bileşenler meydana gelirken, gerilimde herhangi bir harmonik bileşen gözlemlenmez. Öte yandan, kaynağın sinüzoidal olmaktan sapması ve harmonik bileşenler içermesi durumunda, yük doğrusal olsa bile gerilimdeki harmonikler akım dalga formunu da etkileyerek benzer harmonik bileşenlerin oluşmasına neden olmaktadır. Son olarak, hem kaynağın sinüzoidal olmadığı hem de yükün doğrusal olmayan karakteristik göstermesi halinde, gerilim ve akımda hem aynı hem de farklı harmonik bileşenler gözlemlenebilir.

Tablo 1.2. Kaynak ve yüke göre oluşan harmonik bileşenler (Kolsan, 2014)

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		Açıklama
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	
Sinüsoidal	Doğrusal	Yok	Yok	Harmonik bileşenler yok.
Sinüsoidal	Doğrusal Olmayan	Yok	Var	Yük nedeniyle akımda harmonikler oluşur.
Sinüsoidal Olmayan	Doğrusal	Var	Var	Gerilimle aynı harmonik bileşenler oluşur.
Sinüsoidal Olmayan	Doğrusal Olmayan	Var	Var	Aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir.

Doğrusal bir yük, üzerine uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak akım çeker. Bu etkileşim, yükten çekilen akımın, uygulanan gerilimle benzer şekilde saf sinüzoidal bir dalga formunda olmasına imkân sağlar. Bununla birlikte, doğrusal olmayan yükler için, uygulanan gerilime yanıt olarak çekilen akım saf sinüsoidal dalgasından sapar. Bu sapmalar analiz edilebilir ve çeşitli frekans değerleri boyunca Fourier analizi kullanılarak periyodik bileşenlere ayrıştırılabilir. Bu işlemle tanımlanan bozulmalar harmonik bozulma olarak adlandırılır. Elektrik şebekelerindeki yüklerin bağlantısından kaynaklanan harmonikler, güç kalitesi için önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Harmonik varyasyonların hesaplanması, analizi ve azaltılması tipik olarak temel frekans seviyelerine odaklanan Fourier Dönüşümü teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir(Habib vd.,2015).

1.2. Harmonik Üreten Kaynaklar

Harmoniklerin güç sistemleri üzerindeki etkilerini anlamak için, bu harmonikleri üreten kaynakları incelemek açısından önem arz etmektedir. Harmonikler, doğrusal olmayan akım-gerilim ilişkileri gösteren yüklerden kaynaklanır (Gök, 2023). Bir güç sistemindeki birincil harmonik kaynakları aşağıdaki gibi kategorilere ayrılabilir:

- Düşük güçlü doğrusal olmayan yükler
- Yüksek güçlü doğrusal olmayan yükler
- İletim sistemlerindeki yüksek güçlü elektronik bileşenler

Düşük güçlü doğrusal olmayan yüklere örnek olarak televizyonlar, bilgisayarlar ve pil, şarj cihazları gibi elektronik cihazlarda bulunan doğrultucular verilebilir. Bu cihazların her biri ayrı ayrı düşük güce sahip olsa da, sistemdeki kümülatif varlıkları önemli harmonik etkiler üretebilir (Gök, 2023).

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak karşılaşılan oldukça güçlü doğrusal olmayan yüklere, elektrikli ark fırınları örnek olarak verilebilir. Ark fırınlarının doğası nedeniyle, sergiledikleri empedanslar zaman içinde dalgalanmalara maruz kalır, bu da güç sistemi içinde düzensiz ve öngörülemeyen özellikler sergileyen harmonik bileşen akımlarının oluşmasına neden olur (Gök, 2023).

Güç sistemlerinde harmonik oluşumuna katkıda bulunan elemanlara örnekler şunlardır (Orucu, 2020):

- Yarı iletken anahtarlama bileşenlerine sahip cihazlar
- Konvertörler
- Değişken frekanslı sürücüler
- Jeneratörler
- Endüksiyon motorları
- Transformatörlerdeki doyma durumu
- Yüksek voltajlı doğru akım iletim hatları
- Elektronik balastlar ve gaz deşarj aydınlatma sistemleri
- Fotovoltaik güç sistemleri
- Kaynak makineleri
- Kesintisiz güç kaynakları (UPS)
- Doğrultucular
- Statik VAr kompanzatörleri
- Ark fırınları gibi hızlı başlatma ve durdurma yeteneğine sahip sistemler
- Elektrikli taşıma sistemleri

1.3. Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Yüksek harmonik bozulma seviyeleri, dağıtım sistemindeki herhangi bir ekipmanda sorunlara yol açabilir. Bu sorunların kapsamı, dalga formu bozulmasının seviyesine ve kullanılan ekipmanın hassasiyetine bağlıdır. Harmoniklerin neden olduğu sorunlar, kısa vadeli kesintilerden uzun süreli hasara kadar değişebilir. Önemli teknik ve

ekonomik etkileri olan harmoniklerin etkilerini anlamak ve analiz etmek, enerji kalitesini korumak ve işletmelerde operasyonel sürekliliği sağlamak için önemlidir (Akmaz, 2012).

1.3.1. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkileri

Harmonik bileşenlerin kaynağı olabilen transformatörler, aynı zamanda akım ve gerilim harmoniklerinin olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır. Akım harmonikleri bakır kayıplarının ve kaçak akı kayıplarının artmasına neden olurken, gerilim harmonikleri demir kayıplarına katkıda bulunur. Jeneratörler ve endüksiyon motorları üzerindeki etkilerine benzer şekilde, harmonikler de transformatörlerde gürültü artışına neden olur. Transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekans yükseldikçe artar ve yüksek dereceli harmonik bileşenleri düşük dereceli olanlardan potansiyel olarak daha zararlı hale getirir. Bir transformatördeki manyetik akı, demir çekirdekte her döngüde iki kez yön değiştirerek değişir ve böylece histerezis döngüsünü tamamlar. Yüksek frekanslı harmonik gerilimler frekansla doğru orantılı olan histerezis kayıplarını önemli ölçüde arttırabilir. Harmonik bileşenler ayrıca transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı alt yükler arasında rezonansa neden olabilir. Ek olarak, demir çekirdek içindeki manyetik akıdaki periyodik değişikliklerin neden olduğu girdap akımları demir kayıplarını artırır ve daha yüksek frekanslarla büyüklüğü artar (Orucu, 2020).

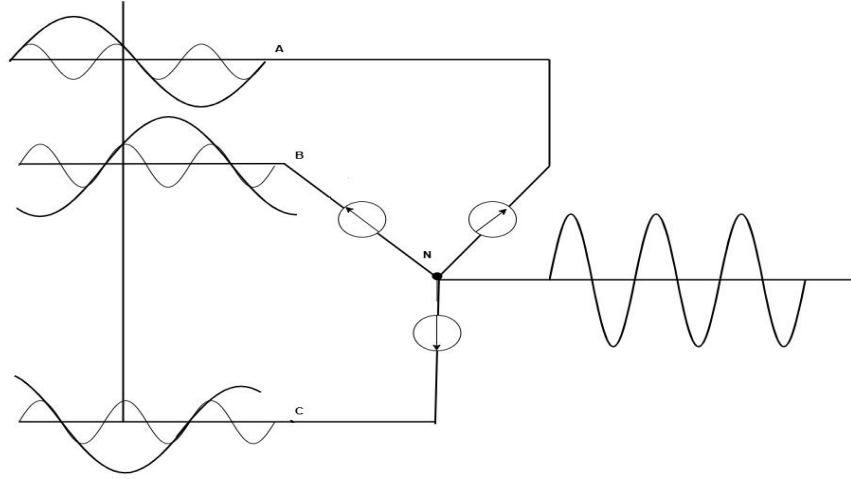
1.3.2. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkileri

Harmonik bileşenler iletkenlerin ısınmasını artırır ve bu da enerji kayıplarını yükseltir. Bu ısıtma etkisi iletkenlerde iki şekilde gerçekleşir. İlki, akımın özellikle yüksek frekanslarda iletkenin dış yüzeyinde yoğunlaşma eğiliminde olduğu deri etkisi durumudur. Harmonik seviyeler yükseldikçe, iletkenin dış yüzeyi boyunca daha fazla akım akar. İkincisi, aşırı harmonik akımlar mevcut olduğunda nötr iletkenin aşırı yüklenmesinden kaynaklanmaktadır (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Dengeli üç fazlı güç sistemlerinde nötr iletkenindeki akım tipik olarak sıfırdır. Ancak, dengesiz yüklerin bulunduğu sistemlerde nötrden yalnızca denge dışı kadar net akımı geçer. Maliyetleri düşürmek için, elektrik güç sistemlerindeki nötr iletken genellikle faz iletkenlerinin kesitinin yarısı kadar boyutlandırılır. Şebeke akımları dengelense bile harmonik akımlar dengelenmez ve bu da dengesizliğe neden olur. Temel

frekansın üç katının katları olan tek harmonikler nötr iletkende “üçlü-N” harmonikleri olarak birleşir (Şahin vd., 2014).

Şekil 1.2’de nötr iletkeninde birleşen üç fazlı bir sisteme ait harmoniklerin bir şekli verilmiştir.



Şekil 1.2. Üçlü-N harmoniklerinin nötr iletkeninde birleşmesi

1.3.3. Harmoniklerin elektrik makineleri üzerindeki etkileri

Harmonik gerilim ve akımların en önemli etkisi, harmonik frekanslarda demir ve bakır kayıplarındaki artıştır ve bu da dönen makinelerde daha yüksek sıcaklıklara yol açar. Harmonik bileşenler bu makinelerin hem verimliliğini hem de torkunu düşürür ve saf sinüzoidal akımlarla beslenen motorlara kıyasla daha gürültülü çalışmalarına neden olur. Ayrıca, harmonikler endüksiyon motorlarının hava aralığında karmaşık bir akı oluşturarak motorun düzgün bir şekilde çalışmasını veya senkronize olmasını engelleyebilir. (Gök, 2023).

Elektrik makinelerindeki kayıplar frekansa bağlıdır ve harmonikler nedeniyle artan motor sıcaklığı, motor ömrünü kısaltmasıyla birlikte verimini de azaltır. Harmonik bileşenler motor performansını yaklaşık %5 ila %10 oranında azaltabilir (Akmaz, 2012).

1.3.4. Harmoniklerin iletim sistemleri üzerindeki etkileri

Bir şebekede akan harmonik akımlar iki ana etkiye yol açar. Bunlardan ilki, dalga biçimindeki daha yüksek etkin akım değerinden kaynaklanan ısı biçimindeki omik

kayıbdır. Üç fazlı bir sistemlerde toplam omik kayıplar denklem (1.1) ile ifade edilebilir (Akmaz, 2012).

$$Pk = \sum_{h=0}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \quad (1.1)$$

Bu bağlamda, (I_h) h-ıncı harmonik akımı temsil eder ve (R_h) h-ıncı harmonik frekanstaki iletim hattı direncidir. Harmonik akımların ikincil bir etkisi de devre empedansının değiştiği noktalarda harmonik gerilim düşüşlerinin oluşmasıdır. Kablo sistemlerinde bu harmonik gerilimler, tepe gerilimlerle ilişkili olarak dielektrik stres seviyelerini yükseltir. Bu etki sadece kablonun çalışma ömrünü kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda arızaların sıklığını da artırarak onarım maliyetlerini yükseltir (Akmaz, 2012).

Harmonik akımların iletim hatlarındaki bir diğer etkisi de büyük ölçüde “deri etkisi” ve “yaklaşım etkisi” nedeniyle iletkenlerin etkin AA direncindeki artıştır. Harmonik frekans yükseldikçe, akım iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşarak akım akışı için mevcut kesit alanını etkili bir şekilde azaltır ve böylece AA direncini yükseltir. Bu durum deri etkisi olarak bilinir. Yakınlık etkisi, bitişik iletkenlerdeki akımlar tarafından üretilen manyetik alanlar bir iletken içindeki akım dağılımını etkilediğinde ortaya çıkar. Denklem (1.1)'de gösterildiği gibi bu iki etki birleştiğinde, iletim hatlarındaki yüksek harmonik akımlardan kaynaklanan daha yüksek etkin AA direnci nedeniyle kayıplarda önemli bir artışa neden olur (Akmaz, 2012).

Harmonikler ayrıca tek fazlı yüklere güç sağlayan üç fazlı, dört telli sistemlerin nötr iletkenlerinde aşırı yüksek akımlar oluşturur. Bazı güç kaynakları önemli ölçüde üçüncü harmonik üretebilir. Temel frekanstaki dengeli üç fazlı akımlar nötr akımına neden olmazken, üç fazlı sistemlerdeki üçüncü harmonikler aslında nötr iletkeninde birbirlerini güçlendirir. Bu, nötr akımını faz akımının 1,7 katına kadar artırabilir ve nötr iletkenleri faz iletkenlerine benzer şekilde boyutlandırıldığından potansiyel olarak aşırı yüke neden olabilir. Bu sorun sıklıkla önemli tek fazlı yükleri destekleyen üç fazlı sistemlere sahip ticari binalarda ortaya çıkar (Kolsan, 2014).

1.3.5. Elektrikli araç batarya şarj istasyonları ve güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri

Elektrikli araçlar (EA'lar) günümüzde önemli ölçüde popülerlik kazanmıştır. Uzun mesafeli seyahatleri mümkün kılmak için bu araçların batarya sistemlerinde önemli

miktarda enerji depolanması gerekmektedir. Batarya teknolojisi ilerledikçe, ilgili şarj üniteleri, yöntemleri ve şarj istasyonları da gelişmektedir. Şu anda üç temel şarj istasyonu türü bulunmaktadır: AA Seviye 1, AA Seviye 2 ve DA Seviye 3. Çeşitli otomotiv üreticileri, kendi markalarına özel benzersiz özelliklere sahip şarj istasyonları geliştirmektedir. AA Seviye 1 şarj istasyonları, Kuzey Amerika ve Avrupa'da farklı yapılandırmalara sahiptir. Kuzey Amerika tipi istasyonlar, 120 V gerilimde 15-20 A akım sağlayarak maksimum 1.44 kW güç üretebilmekte ve elektrikli araçları 8-14 saat arasında şarj edebilmektedir. Bu istasyonlar, düşük maliyetli olmakla birlikte uzun şarj süreleriyle verimlilik açısından sınırlıdır. Avrupa tipi ise 230 V tek fazlı besleme ile çalışmakta, 20 A akıma kadar enerji sağlayarak maksimum 4.6 kW güç üretebilmektedir. Seviye 2 ve Seviye 3 şarj istasyonlarıyla karşılaştırıldığında, şarj süreleri daha uzun olup kullanım verimliliği bakımından bazı sınırlamalar taşımaktadır (Özcan ve Oral, 2018). AA Seviye 2 şarj istasyonları, Kuzey Amerika ve Avrupa'ya özgü iki farklı yapıda tasarlanmıştır. Kuzey Amerika tipi istasyonlar, 208V-240V gerilim aralığında çalışmak üzere programlanmış olup genellikle tek fazlıdır ve 40 A akıma kadar güç aktarımı yaparak maksimum 10 kW kapasiteye ulaşabilmektedir. Bu tip istasyonlar, bir elektrikli aracı ortalama 4-6 saat içinde şarj edebilmekte ve Seviye 1 istasyonlarına kıyasla daha hızlı şarj sunmaktadır. Ancak, yüksek kurulum ve işletme maliyetleri, en büyük dezavantajlarını oluşturmaktadır. Avrupa tipi Seviye 2 şarj istasyonları ise üç fazlı besleme sistemine sahip olup, 400 V gerilim ve 63 A akıma kadar güç aktarabilmektedir. Seviye 1'e göre daha hızlı şarj imkânı sunmasına rağmen, Seviye 3 şarj istasyonları ile kıyaslandığında daha uzun şarj süreleri gerektirmektedir. DA Seviye 3 şarj istasyonları, hem Kuzey Amerika hem de Avrupa'da elektrikli araçların hızlı şarj edilmesini sağlayan sistemlerdir. Kuzey Amerika tipi istasyonlar, 480 V gerilim ve 400 A akıma kadar güç aktararak araçları dakikalar içinde şarj edebilmekte, yoğun trafik akışının bulunduğu alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu istasyonlar, dakikada 50-70 mil mesafe için gerekli gücü sağlayarak hızlı şarj imkânı sunmaktadır (20-30 dakika). Bununla birlikte, yüksek kurulum ve işletme maliyetleri ile şebekeye yüksek yük getirmeleri önemli dezavantajlarından. Avrupa tipi Seviye 3 şarj istasyonları da benzer güç özelliklerine sahip olup, 50 kW ile 150 kW arasında değişen güç kapasitesine sahiptir (Özcan ve Oral, 2018).

Yollardaki EA sayısının artmasıyla birlikte, özellikle yüksek yük aktarım kapasitelerine sahip hızlı şarj istasyonlarının kullanımının artması kaçınılmazdır. Bu nedenle şarj istasyonlarına olan talep hızla artmaktadır. Talepteki bu artış, elektrik

şebekesi üzerinde ek yük oluşturmakta ve EA'ların sadece şebekeden güç çekmesine değil, aynı zamanda şebekeye geri enerji sağlamasına da olanak tanıyan yöntemlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. EA'lardaki bataryalar kapasitif yükler gibi davranır ve şebekeye bağlandıklarında harmonikler üretebilirler. Bu harmonikler şebekede güç kalitesini olumsuz etkileyebilir ve çeşitli sorunlara yol açabilir(Özcan ve Oral, 2018). Bu sorunların başında her ne kadar harmonikler gelse de aynı zamanda gerilim düşümleri ve güç faktörü azalması gibi pek çok güç kalitesi sorunlara neden olmaktadır(Katic vd.,2019;Selvabharathi vd.,2010).

1.4. Harmonik Standartları

Güç sistemlerini ve cihazları harmoniklere karşı korumak için bazı sınırlamalar getirilmiştir. IEEE ve IEC tarafından deklare edilen bu sınırlandırmalar dünyanın pek çok ülkesinde harmonik standartları olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1.3'te Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından harmonikler ile ilgili standartlar sunulmuştur. Tablo 1.3'te, tek harmonikler için %1.5 ile % 6 arasında değişen limitler belirlenmişken, çift harmonikler için %0.2 ile %2 arasında, 3 ve 3'ün katı harmonikler için ise %0.3 ile %5 arasında değişen değerler öngörülmüştür. Ayrıca, IEC standardı, harmonik bozulmalarının izlenmesi ve yönetilmesinin, sistem performansını ve güvenilirliğini artırmaya yardımcı olduğunu vurgulamaktadır. Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri (IEEE), Tablo 1.4'te ayrıntıları verilen hem akım hem de gerilim harmoniklerini ele alan sınırlamalar gösterilmiştir (Orucu, 2020). Tablo 1.4'te, IEEE standartlarına dayanarak, farklı bara gerilim seviyeleri için belirlenen gerilim harmonik limitlerini sunmaktadır. 69 kV ve altındaki gerilim seviyelerinde, tekil harmonik büyüklüğü %3, üç ve üçün katı gerilim harmoniklerine ait THB ise %5 olarak belirlenmişken, 69 kV ile 161 kV arasında bu değerler sırasıyla %1,5 ve %2,5'e düşürülmektedir. 161 kV'nin üzerindeki gerilim seviyeleri için ise tekil harmonik büyüklüğü %1, THB ise %1,5 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1.3. IEC 61000-2-4 Endüstriyel santraller için THB limitleri (Orucu, 2020)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5

7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5	(k=0,2+12,5/n)			
25	1,5				
≥29	K				

Tablo 1.4. IEEE gerilim harmonik limitleri (Orucu, 2020)

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik Büyükülüğü (%)	THBvn (%)
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1	1,5

1.5. Harmonik Azaltma Yöntemleri

Harmonik filtreler, harmonik akımların etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için seri veya paralel yapılandırmalarda uygulanmak üzere tasarlanmış rezonans devreleridir. Harmonik filtreler, elektrik güç sisteminde bulunan harmonik akımları kaynaktan uzaklaştırarak, voltaj bozulmalarını etkili bir şekilde ortadan kaldırırlar. Harmonik filtrelerin kullanımı yalnızca ekipmana gelebilecek olası hasarları önlemeye yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda işletme maliyetlerini kontrol etmeye de yardımcı olur. Bir tesise harmonik filtre dahil edildiğinde, aşağıdaki temel özellikleri sağlaması beklenir (Şerbetçi, 2019):

- Kullanıcı dostu kurulum ve işletme kolaylığı
- Harmonik etkileri azaltırken ek komplikasyon olmaması
- Dayanıklılık ve sağlamlık
- Düşük ilk ve işletme maliyetleri
- Harmoniklerin istenen seviyeye etkili bir şekilde düşürülmesi

Harmonik filtre tasarımı, tesislerde güç kalitesini artırmaya yönelik kritik mühendislik uygulamalarından biridir. Bu tasarım sürecinde, harmonik bozulmaların

kaynağının belirlenmesi ve uygun azaltma yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir(Gök, 2023). Bu doğrultuda, dikkate alınması gereken temel unsurlar şu şekildedir:

- Harmonik etkilerinin kaynakları ayrıntılı bir şekilde analiz edilmeli ve hedeflenen harmonik azaltma seviyesi belirlenmelidir.
- Teknik ve maliyet açısından en uygun harmonik azaltma yöntemi seçilerek sistemin verimli çalışması sağlanmalıdır.
- Tesisin elektriksel yapısını anlamak için kapsamlı bir tek hat diyagramı oluşturulmalı ve bu diyagram üzerinde gerekli analizler yapılmalıdır.
- Tek hat diyagramında, farklı yüklerin harmonik bileşenlere katkı oranları incelenerek harmonik seviyelerinin kaynağına yönelik detaylı tespitler gerçekleştirilmelidir.
- Harmonik filtre, maksimum etkinlik sağlanacak şekilde, hizmet verdiği yüke en yakın noktaya konumlandırılmalıdır.
- Voltaj, akım, aktif ve reaktif güç ile güç faktörü gibi elektriksel büyüklüklere ilişkin ölçümler yapılarak filtre tasarım süreci bilimsel verilere dayandırılmalıdır.

1.5.1. Aktif güç filtreleri

AGF'ler, güç sistemlerinde meydana gelen harmonik bozulmaları gidermek amacıyla özel olarak tasarlanmış elektronik cihazlardır. Bu cihazlar, güç elektroniği prensipleri doğrultusunda çalışarak, şebeke ile invertör arasında yer alan filtreleme bileşenleri ve çift yönlü invertör sistemi kullanır. Bu yapı, aktif harmonik filtrelerin elektrik şebekesi ile filtre arasındaki harmonik bileşenleri etkin bir biçimde yönetmesine olanak tanır. Filtrenin yerleştirileceği konum, sistemin genel performansı ve etkinliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğundan, bu unsur, enerji kalitesinin optimize edilmesi için kritik bir faktör olarak değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, filtrenin doğru konumlandırılması, hem şebeke üzerindeki etkileri azaltacak hem de filtreleme sürecinin verimliliğini artıracaktır(Karaman, 2018).

AGF'nin çalışma prensibi, sistemdeki harmonik akımların tespit edilmesini ve tespit edilen harmonikli akıma eşit genlikte 180 derece zıt fazda bir harmonik akım üretilmesini içerir. Üretilen eşit genlikli ve zıt fazlı akım daha sonra sisteme enjekte edilir

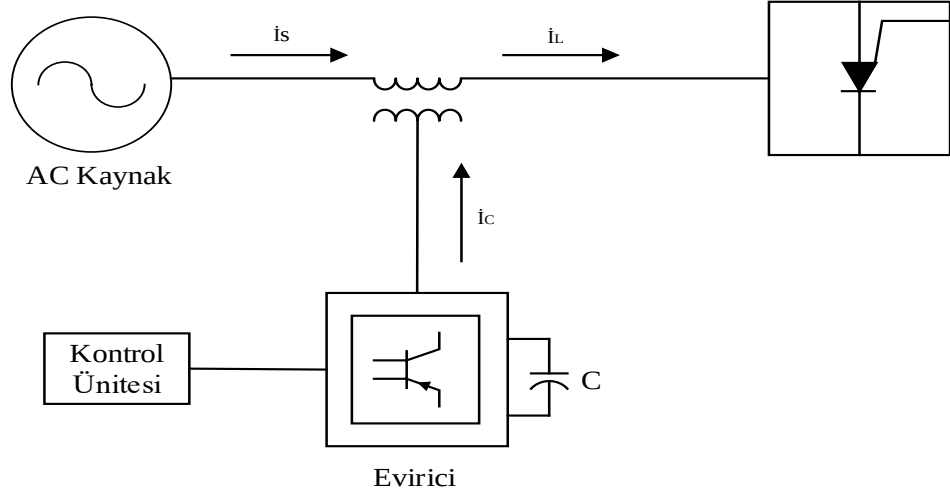
ve harmonikli akımlar etkin bir şekilde yok edilir. Harmonik bileşenleri ortadan kaldırma temel işlevlerine ek olarak, AGF'leri reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım dengesizliklerinin düzeltilmesi, nötr akım kompanzasyonu ve şebeke geriliminin düzenlenmesi gibi birçok amaca da hizmet eder(Karaman, 2018).

AGF'ler pasif filtrelerle göre daha maliyetli olmakla birlikte, pasif filtrelerin paralel rezonans gibi dezavantajları nedeniyle etkisiz kaldığı durumlarda önemli avantajlar sunarlar. Harmoniklerin azaltılmasındaki verimlilikleri, onları elektrik sistemlerinde güç kalitesini korumak için değerli bir yatırım haline getirmektedir(Kürker, 2017).

1.5.1.1. Seri aktif filtre

Bu filtre türünde, aktif filtre bir transformatör aracılığıyla yüke seri olarak bağlanır ve güç sistemine sorunsuz bir şekilde entegre olur. Bir seri aktif güç filtresinin (SAGF) çalışması öncelikle yükün terminalleri boyunca saf sinüzoidal gerilim dalga şeklinin kararlılığının korunmasına dayanır. Bu filtreler gerilim harmoniklerini azaltmada veya filtrelemede etkilidir ve gerilimle ilgili kompanzasyonları, dengesizlikleri ve dalgalanmaları önemli ölçüde azaltır (Sucu, 2003).

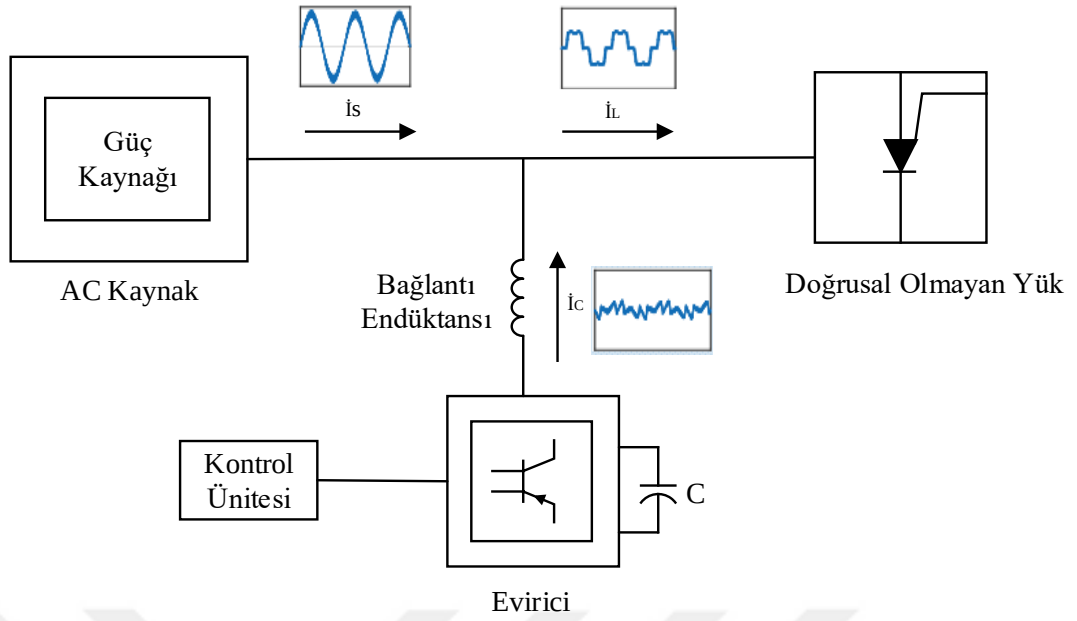
SAGF'nin paralel aktif filtrelerle göre sahip olduğu önemli avantajlardan biri, verilen gücün kalitesini ve kararlılığını sağlamak için çok önemli olan sinüzoidal çıkış voltajı dalga formunu sürdürme konusundaki yetenekleridir. Bu özellik, SAGF'nin genel etkinliğini önemli ölçüde artırır, böylece voltaj regülasyonunda yüksek düzeyde hassasiyet gerektiren çok çeşitli uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar. Dolayısıyla, SAGF'nin kullanılması, gerilim dalga formunun bütünlüğünün korunması gerektiği sistemlerde sıklıkla tercih edilir(Yin, 2024). Şekil 1.3'te SAGF'ye ait blok şeması verilmiştir.



Şekil 1.3. Seri aktif güç filtresi blok şeması

1.5.1.2. Paralel aktif filtre

Paralel aktif güç filtreleri (PAGF), diğer adıyla şönt aktif filtreler olarak bilinir ve elektrik şebekesine paralel bir yapı ile bağlanacak şekilde tasarlanır. Bu filtre türü, özellikle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir çözüm olup, şebeke üzerinde meydana gelen harmonik bozulmaları gidermenin yanı sıra, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımlarının dengelenmesi ve nötr akım yönetimi gibi kritik işlevleri de yerine getirir. PAGF'leri, enerji kalitesini iyileştirmek ve sistem verimliliğini artırmak için önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, pasif filtrelerle karşılaştırıldığında, paralel aktif filtrelerin başlıca dezavantajı, kurulum maliyetlerinin daha yüksek olmasıdır. Bu yüksek maliyet, genellikle kullanılan elektronik bileşenler ve sistemin daha karmaşık yapısı ile ilişkilidir, bu nedenle yatırım gereksinimlerini dikkate almak önemlidir(Yin, 2024). Şekil 1.4'te PAGF'ye ait blok şeması verilmiştir.

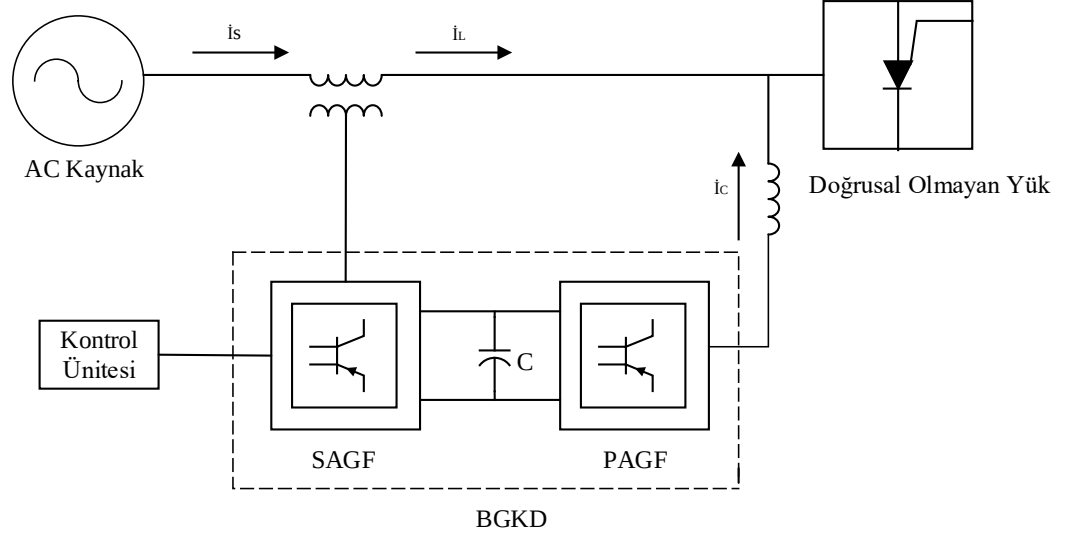


Şekil 1.4. Paralel aktif güç filtresi blok şeması

1.5.1.3. Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi

Bu filtreleme yaklaşımı hem seri hem de aktif filtrelerin işlevlerini birleştirir. Hem akım hem de gerilim dalga biçimlerini sürekli sinüzoidal bir şekilde korumak üzere tasarlanmıştır. Bu tür sistemler, bir elektrik sisteminde ortaya çıkabilecek neredeyse tüm güç kalitesi sorunlarının önlenmesinde etkilidir(Şerbetçi, 2019).

PAGF ile akım harmonikleri, dengesizlikleri ve nötr akımı kompensasyonu yapılmakta, SAGF ile gerilim harmonikleri, dengesizlikleri ve gerilim çökme-yükselme gibi güç kalitesi problemleri düzeltilmektedir. Şekil-1.5'te birleşik güç kalitesi düzenleyici sistemine ait bir blok şeması verilmiştir.



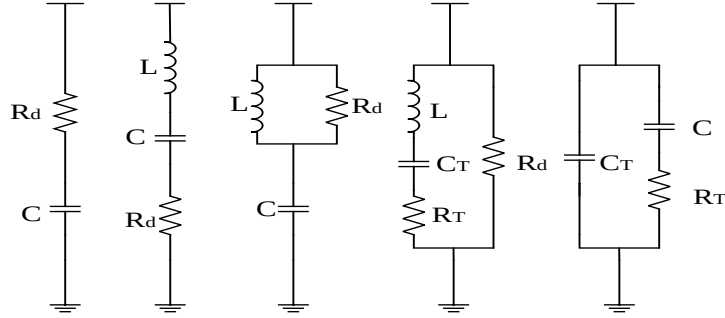
Şekil 1.5. Birleşik güç kalitesi düzenleyici blok şeması (Karaman, 2018)

1.5.2. Pasif filtreler

Pasif filtreler (PF), basit tasarımları, uygun maliyetleri ve akım harmoniklerini filtrelemedeki yüksek verimlilikleri nedeniyle dağıtım şebekelerinde, özellikle alçak ve orta gerilim seviyelerinde uzun süredir kullanılmaktadır. Güç kaynağı ile yük arasına yerleştirilen bu filtreler, harmonikleri etkili bir şekilde bastırmak için belirli frekanslara ayarlanır (Karaman, 2018).

Güç sistemlerinde PF konfigürasyonları kapasitör (C), direnç (R) ve endüktans (L) kombinasyonları kullanılarak oluşturulur. Çeşitli şekillerde düzenlenen bu pasif elemanlar, reaktif güçteki artışlara veya devredeki akım/gerilim harmoniklerinin varlığına karşı koymaya yardımcı olur (Tedeschi, 2009). PF'lerin parametreleri ve konfigürasyonları her bir özel sisteme göre dikkatlice ayarlanır; istenmeyen harmonik etkiler düşük empedanslı yollar aracılığıyla toprağa yönlendirilir. Bununla birlikte, PF'ler dinamik bir tepkiden yoksundur, yani çalışma koşulları değiştiğinde yeniden tasarlanmaları gerekir (Akçay, 2010). PF, kompanzasyonun etkinliğin büyük ölçüde sistemin empedansına bağlıdır ve güç kaynağı ile seri veya paralel rezonanstan etkilenebilir. Şekil 1.6'te farklı PF konfigürasyonları verilmiştir. Şekil 1.6'dan da görüleceği üzere PF'ler C-R-L elemanlarının seri ve paralel olarak birbirilerine entegrasyonundan oluşmaktadır. Seri bağlı PF topolojileri, genellikle belirli bir frekansta meydana gelen harmonik bileşenlerin güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girişini engellemek amacıyla kullanılır. Paralel bağlı PF topolojilerinin ise temel amacı, düşük

paralel empedans aracılığıyla istenmeyen harmonik akımların filtre üzerinden geçmesini sağlamak ve böylece sistemin harmonik bozulmasını minimize etmektir. Bu tür filtreler, temel frekansta kompanzasyon işlemi gerçekleştirilerek, güç katsayısının düzeltilmesi ve güç sisteminin verimliliğinin artırılması için de etkin bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 1.6. Pasif filtre devre topolojileri

1.5.3. Hibrit filtreler

Hibrit filtreler, her türün avantajlarından yararlanmak için hem AGF'ler hem de PF'ler entegre eden sistemlerdir. Bu kurulumlar, yalnızca aktif veya pasif filtreleme seçeneklerinden daha ekonomik ve genellikle daha kompakttır. Bu yapılandırmalarda, pasif filtreler reaktif güç taleplerini ele alır ve düşük dereceli harmonikleri (genellikle 3., 5. veya 7.) azaltır, böylece aktif filtrenin gerekli kapasitesini ve maliyetini azaltır (Karaman, 2018).

1.6. Harmonik Çözümünde Aktif Filtrelerin Önemi ve Avantajları

PF'ler, maliyet açısından uygun oldukları için doğrusal olmayan kaynakları veya yükleri sinüzoidal dalga formlarına dönüştürmek için elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Ancak PF'ler pratik uygulamalarda çeşitli sınırlamaları vardır. Bu filtrelerdeki indüktörler, dirençler ve kapasitörler zamanla ideal değerlerinden sapma eğilimindedir. Bu da filtrenin ayar frekansında değişikliklere, dolayısıyla filtreleme verimliliğinin azalmasına neden olur. Ek olarak, harmonik yükler arttıkça pasif filtreler aşırı yüklenebilir ve hasar görebilir. Bu aşırı yük, farklı harmonik frekanslarda sistem elemanları ve filtre bileşenleri arasında seri veya paralel rezonans potansiyeli ile birleştiğinde önemli riskler oluşturur (Sucu, 2003).

Bu sınırlamalar nedeniyle, yarı iletken teknolojisindeki ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler, AGF'lerin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. AGF'ler, harmoniğin genliğiyle orantılı ancak faz açısından 180 derece zıt yönde olan referans akımları üretilip, sisteme enjekte ederek, harmonik bileşenleri etkisiz hale getirir ve böylece etkili bir şekilde yok eder. AGF'ler, harmonikleri gerçek zamanlı olarak algılamak ve etkisizleştirmek için güç elektroniği anahtarlama elemanları ve gelişmiş kontrol sistemleri kullanır. Harmonik eliminasyonun yanı sıra, SAGF reaktif güç kompanzasyonu, voltaj stabilizasyonu ve şebeke düzenlemesi gibi görevler için de kullanılır (Tekev, 2021).

AGF'ler harmonikler, dengesiz yükler, güç faktörü düzeltilmesi, voltaj düşüşleri ve artışları, düşük frekanslı salınımlar ve harmoniklerin sönümlenmesi gibi sorunları etkili bir şekilde azaltırlar. Ek olarak, AGF'ler modern dağıtılmış üretim sistemleri içinde yenilenebilir enerji kaynakları için arayüzler olarak önemli bir rol oynar ve merkezi olmayan mikro şebekelerin güvenilirliğini artırır (İlgin, 2019).

Hem pasif hem de aktif güç filtreleri maliyet ve uygulama açısından benzersiz avantajlar ve sınırlamalara sahiptirler. Tablo 1.5, pasif ve aktif filtrelerin karşılaştırmalı bir görünümünü özetler ve her filtre türü için ilgili avantajları ve dezavantajları ayrıntılı olarak açıklamaktadır.

Tablo 1.5. Pasif ve aktif güç filtre karşılaştırılması (Kulu, 2020).

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Harmonik Akımların Kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister.	Aynı anda birçok harmonik akımının kontrolü mümkündür.
Harmonik Frekanslarının Değişiminin Etkisi	Filtrenin etkinliği azalır.	Etkilenmez.
Akım Yükselmesi Riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.	Aşırı yüklenme riski yoktur.
Empedans Modifikasyonu Riski	Rezonans riski vardır.	Etkilenmez.
Sisteme Yeni Yük İlave Edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.	Herhangi bir probleme yol açmaz.
Sistemdeki Temel Dalganın Frekans Değişimi	Ayarlanması mümkün değil.	Ayar ile uyum mümkün.
Boyutlar ve Ağırlık	Harmonik genliğine ve derecesine göre çok değişken.	Oldukça küçük.
Maliyet	İlk maliyet düşük, orta vadede bakım maliyetleri yüksek.	İlk maliyet yüksek, orta vadede bakım maliyetleri düşük.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sinüs dalga formunun pürüzsüz ve sürekli yapısını bozan, elektrik enerjisi sistemlerinin genel performansı üzerinde olumsuz ve zararlı etkilere yol açabilecek harmonikler, uygun yollarla ortadan kaldırılmalı veya zararsız hale getirilmelidir. Sistemin temel frekansından farklı olan bu harmonik frekansları filtrelemek veya yok etmek için özel olarak tasarlanmış devrelere filtreler denir. Harmonik bozulma ile ilgili sorunları hafifletmek amacıyla, hem aktif hem de pasif filtreleri halen kapsamlı bir şekilde bilim insanları tarafından incelenmektedir.

Bu seçenekler arasında PF'ler, nispeten düşük kurulum maliyetleri ve çeşitli uygulamalarda yüksek verimlilikle çalışabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte PF'lerin belirli koşullarda, genel etkinliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek bazı dezavantajlardan tamamen uzak olmadığı dikkate alınmalıdır. Bu dezavantajlardan bazıları aşağıda verilmiştir(Motta vd., 2016).

- Kaynağın sahip olduğu empedansın filtreme üzerindeki olumsuz etkileri
- Kaynak ve filtre arasında oluşabilecek paralel rezonans durumunda akım harmoniklerinin artması
- Seri rezonans durumunda gerilim dalga formunda bozulmalar ve bu bozulma sonucunda filtreye akan aşırı harmoniklerin oluşumu

Son yıllarda elektronik sanayisinin gelişimiyle, gerilim veya akım kaynaklı kontrollü darbe genişlik modülasyonu (DGM) yapısında çalışan konvertörlerin güç filtrelerinde kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Yukarıda belirtilen dezavantajların aşılması ve harmonik bozulmasının azaltılması için DGM kontrollü konvertörlerden oluşan AGF, kullanılmaya başlanmıştır. Bu filtre yapısı literatürde genel olarak gerilim kaynaklı evirici ve DA link kapasitörünün birleşiminden oluşmaktadır. (Benchouia vd., 2015).

Özdemir ve arkadaşlarının AGF'nin harmonikleri filtrelenmesi konusunda yürüttüğü çalışmada; yükteki değişiklikler, DA link geriliminin dalgalanmasına yol açmakta olduğunu belirtmişlerdir. Bu dalgalanmalar, yarı iletkenlerin dayanma gerilimini aşmasına neden olabilir. Dolayısıyla, DA link geriliminin sabit tutulması, sistem verimliliği ve güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu sabit gerilimi sağlamak amacıyla, DA link kapasitöründe denetimli bir kontrolör kullanımının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda araştırmacılar, gerilim ve akım harmoniklerinin

azaltılması için AGF'lerinin kullanımını tercih etmeye başlamışlardır. AGF'ler, hem gerilim hem de akım harmoniklerini etkin bir şekilde temizleyerek, filtre sistemlerinin verimliliğini artırmakta ve şebekedeki harmonik distorsiyonları ya tamamen ortadan kaldırmakta ya da önemli ölçüde azaltmaktadır (Özdemir vd.,2015).

Han ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, AGF'ler alanı hakkında kapsamlı bir araştırma yürütmüşlerdir ve bu çalışmada, referans sinyali üreticisinin AGF genel performansını etkileyen kritik unsuru temsil ettiğini öne sürerek, önemli ölçüde geliştirilmiş bir AGF modeli oluşturmuşlardır. Önerdikleri benzetim modelinde referans sinyali, bu bağlamda önemli bir rol oynayan ve özel olarak belirlenmiş bir sızıntı faktörü kullanarak ağırlık kayması durumunu ortadan kaldırmanın sonucu elde edilmektedir. Benzetim çalışmalarının sonucunda, çeşitli uygulamalarda operasyonel verimliliklerini ve etkinliklerini artırmak için AGF'lerde referans sinyal üretimi hususu, filtreleme sistemlerinde başarılı bir şekilde uygulanabildiğini göstermişlerdir (Han vd.,2005).

Chauhan ve diğerlerinin, reaktif güç ve harmonik akımların kompanzasyonuna yönelik çalışmalarında, PAGF sisteminin donanımsal uygulanabilirliğini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, adaptif doğrusal tabanlı bir akım kestiricisi kullanılarak, elektrik şebekesinde oluşan harmonik bozumların azaltılması ve akım dalga formunun ideal bir sinüs sinyaline yakınsaması hedeflenmiştir. Ayrıca, güç faktörünün iyileştirilmesi ve reaktif güç talebinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. PAGF kontrol stratejisi, gerilim kaynaklı konvertörün DA bara geriliminin PID kontrolör ile kararlı bir seviyede tutulmasına dayanmaktadır. DA bara geriliminin stabilitesi, sistemin güvenilirliği ve uzun vadeli performansı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Konvertörün anahtarlama işlemleri, histerisiz tabanlı DGM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, hızlı tepki süresi ve düşük harmonik bozunum sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Çalışma sonucunda, önerilen sisteminin hem statik hem de dinamik koşullarda başarılı bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Sistem, harmonik akımları etkin ve verimli bir şekilde filtreleyerek güç kalitesini artırmış, enerji verimliliğini iyileştirmiş ve teorik modellemelerle uyumlu sonuçlar sunmuştur. Bu sonuçlar, paralel aktif filtrenin enerji sistemlerinde harmonik kontrolü ve güç kalitesi iyileştirmesi açısından etkili ve önemli bir çözüm olduğunu göstermektedir(Chauhan vd., 2014).

Rahmani ve diğer araştırmacıların 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada, üç fazlı PAGF için doğrusal olmayan bir kontrol yöntemi geliştirmiş ve bu yöntemin

performansını deneysel çalışmalarla değerlendirmiştir. Önerilen kontrol yöntemi, reaktif, dengesiz ve harmonik yük akımlarının etkin bir şekilde kompanzasyonunu sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmada, doğrusal olmayan PAGF'sinin karmaşık yapısını sadeleştirmek ve kontrol edilebilirliğini artırmak amacıyla sistemin doğrusallaştırma işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen matematiksel model esas alınarak, DA kapasitör geriliminin stabilitesini ve kararlı çalışma koşullarını sağlamak üzere bir PI kontrolör tasarlanmıştır. Referans akım sinyalinin hesaplanması için senkron referans dönüşüm yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, akım bileşenlerinin doğru bir şekilde ayrıştırılmasına olanak sağlayarak, yük akımındaki reaktif ve harmonik unsurların filtrelenmesini kolaylaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, önerilen kontrol yönteminin harmoniklerin azaltılması ve güç faktörünün iyileştirilmesi noktasında yüksek verimlilikle çalıştığını belirtilmiştir. Ayrıca, bu yöntemin hem teorik analizler hem de pratik uygulamalar açısından tutarlı sonuçlar sunmuş, üç fazlı olmayan PAGF'nin güç kalitesini artırmadaki operasyonel etkinliğini kanıtlamıştır (Rahmani vd., 2010).

Satish ve diğerlerinin 2023 yılında yaptığı çalışmada; sinüzoidal olmayan gerilim koşulları altında üç fazlı PAGF kullanılarak harmoniklerin ve reaktif gücün etkin bir şekilde kompanzasyonu için bir yöntem önermişler. Çalışmada referans kompanzasyon akımlarının hesaplanmasında güç teorilerinden biri olan p-q teorisi temel alınmıştır. Çalışmada, referans akımın hesaplanmasına yönelik olarak iki farklı yaklaşım ele alınmıştır: birincisi, kompanzasyonu hedeflenen güce dayalı bir metodoloji, ikincisi ise kompanzasyon sonrasında elde edilmesi istenen kaynak akım karakteristiğine dayalı bir metodoloji. Bu yaklaşımların matematiksel temelini oluşturan denklemler sunulmuş ve analiz edilmiştir. Ayrıca, sinüzoidal olmayan gerilim durumlarının referans akım hesaplama süreçlerine etkisi kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve yöntemin bu koşullar altındaki performansı incelenmiştir. Çalışma, teorik analizler ve yöntem önerisi ile PAGF'lerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir katkı sağladığı ifade edilmiştir (Satish vd., 2023).

Chen ve arkadaşlarının 2019 yılında adaptif frekans tabanlı referans akım modeli önermiş ve yürütmüş oldukları çalışmada PAGF'nin, güç kalitesinin geliştirilmesinde etkili olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada PAGF'nin kompanzasyon performanslarının güç sisteminde doğrusal olmayan yüklerin olması durumunda bozulacağı ifade edilmiştir. Meydana gelen bu bozulmalarının azaltılarak giderilmesi için adaptif frekans tespit tekniği, faz senkronizasyonu ve adaptif kompanzasyonu içeren üç aşamalı bir PAGF uygulaması önerilmiştir. Çalışmanın sonucunda, önerilen modelin

PAGF'nin genel kontrol stratejilerinden (p-q teorisi) daha üstün olduğunu vurgulanmıştır (Chen vd., 2019).

Iqbal ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada, akım harmoniklerinin güç kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini detaylı bir şekilde incelemiş ve bu harmoniklerin azaltılmasına yönelik PAGF tabanlı bir çözüm geliştirmiştir. Çalışmada, filtrenin kontrol algoritması YSA kullanılarak tasarlanmış ve bu sayede sistemin adaptif bir kontrol mekanizmasına sahip olması sağlanmıştır. YSA'nın öğrenme ve genelleme yetenekleri, filtreye dinamik sistem koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlama kabiliyeti kazandırmış, böylece hem harmonik akımların etkin bir şekilde filtrelenmesi hem de güç kalitesinin iyileştirilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca, sistemin kararlı çalışmasını temin etmek amacıyla PI denetleyici kullanılarak DA link kapasitör geriliminin belirli bir seviyede sabit tutulması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, filtre tasarımında kritik bir rol oynamış ve sistemin kararlılığını artırmıştır. Ayrıca çalışmada önerilen adaptif paralel aktif güç filtresi, akım harmoniklerini azaltmada güçlü bir yöntem olarak tanımlanmış, performansı detaylı simülasyon çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yönteminin harmoniklerin giderilmesi, güç faktörünün iyileştirilmesi ve güç kalitesinin artırılmasında başarı sağladığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, adaptif PAGF tasarımının modern güç sistemlerinde uygulanabilir ve etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir (Iqbal vd., 2021).

Literatür incelendiğinde, doğrusal olmayan yükler içeren sistemlerdeki harmoniklerin azaltılması amacıyla geniş bir araştırma yelpazesinde AGF sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmektedir. Hem seri hem de paralel konfigürasyonlarda uygulanan AGF, birçok sisteme entegre edilmesine yönelik çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmiş ve bu stratejiler, pratikte etkin bir şekilde uygulanarak başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. AGF'lerinin, özellikle harmonik bozunumları ortadan kaldırma, güç faktörünü iyileştirme ve genel güç kalitesini artırma noktasında önemli avantajlar sunduğu literatürdeki çalışmalarla doğrulanmıştır. Bu bağlamda, AGF'nin performansını optimize etmek amacıyla, farklı kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve aktif filtre sistemlerin dinamik koşullara uyum sağlama yeteneği konularında araştırmaların yoğunlaştığı görülmektedir.

Wang ve arkadaşının 2016 yılında yaptığı çalışmada, PAGF'nin performansını geliştirmek amacıyla uyarlamalı bir radyal temel fonksiyonu (RTF) sinir ağı (NN) ve bulanık kontrol şeması tasarlamışlardır. Bu yenilikçi yaklaşımda, RTF sinir ağı, PAGF'nin dinamik modelindeki doğrusal olmayan bileşenlerin yakınsamasını sağlamak

için kullanılmış, böylece sistemin daha doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır. RTF sinir ağının ağırlıkları çevrimiçi olarak ayarlandığından, sistem çevresel değişikliklere ve dinamik yük koşullarına hızla bir şekilde adapte olabilmektedir. Bu adaptasyon süreci, ağ yakınsama hatalarını minimize etmek ve çevresel gürültülerin etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, kayan mod kontrol süresi ile desteklenmiş ve uyarlamalı bulanık sistemler tarafından optimize edilmiştir. Bu yöntem, sistemin performansını artırarak, daha kararlı ve güvenilir bir çalışma sağlamakta önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma sonucunda, önerilen kontrol sisteminin PAGF'nin harmonik kompanzasyonu ve güç kalitesi iyileştirmeleri konusundaki etkinliğini doğrulamış, iyi bir kompanzasyon performansı ve güçlü sağlamlık sergileyerek, pratik uygulamalar için yüksek potansiyel taşımakta olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, uyarlamalı RTF sinir ağı ve bulanık kontrol yönteminin, modern güç sistemlerinde harmoniklerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi için güçlü bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur (Wang vd., 2016).

Melo ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, EA'ların şarj edilmesi süreci ile Portekiz'deki elektrik şebeke sistemine entegrasyonu arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Bu kapsamlı çalışmada, araştırmacılar analizlerinin konusu olarak bir Nissan Leaf modeli kullandılar ve değerlendirmeler, elektriksel parametrelerin ölçümünü yöneten IEC6000-4-30 standardında oluşturulan Sınıf A metodolojisine uygun olarak çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan şarj istasyonu, maksimum 16 A akım sağlama yeteneğine sahip bir alternatif akım (AA) kaynağıdır. Bu çalışmada yürütülen kapsamlı değerlendirmeler, teste tabi tutulan EA tarafından üretilen harmonik bozulmaların, yasal olarak belirlenmiş izin verilen sınırlar içinde tutarlı bir şekilde kaldığını ve düzenleyici standartlara uygunluğu sağladığını ortaya koymuştur. Yapılan bu çalışma mevcut şarj teknolojisinin etkinliğini vurgulamakla kalmamış, aynı zamanda elektrik şebekesi üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri azaltmak için endüstri düzenlemelerine uymanın önemini de vurgulamaktadır (Melo vd., 2012).

Ayrıca, IEEE Power & Energy Society (PES) EA'ların şebekeden güç çekerken ürettiği harmonik seviyelerini ölçmek için bir çalışma yürütmüştür. Bu deneyde, dört farklı EA şebekeye bağlı bir şarj istasyonu kullanılarak şarj edilmiş ve harmonik çıktıları çeşitli seviyelerde kaydedilmiştir. Bulgular, kaydedilen harmonik değerlerin, EA'ların Avrupa ülkelerinde uyması gereken IEC61000-3-2 yönetmeliği tarafından belirlenen sınırların altında olduğunu ortaya koymuştur (Kütt, 2012).

EA'ların, batarya sistemleri nedeniyle kapasitif yükler olarak kabul edilir. Şebekeye bağlandıklarında, güç kalitesini etkileyen harmonik bozulmalara neden olurlar.

Şarj işlemi sırasında oluşan harmonikler tipik olarak 3., 5., 7., 9. ve 11. mertebeler olarak analiz edilir. Çeşitli çalışmalar veri toplamak için farklı araç modelleri kullanmaktadır. Örneğin, Carter ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yürütülen araştırmada, Birleşik Krallık'ta 32 A ve 13 A akım sağlayabilen şarj istasyonları kullanan dört farklı araç incelenmiştir. Bulgular, araçlardan ikisinin harmonik emisyonlarının yasal sınırlar içinde olduğunu, diğer ikisinin ise bu sınırları aştığını göstermiştir (Carter vd., 2012).

Monteiro ve diğerleri tarafından 2017'de gerçekleştirilen çalışmada, (EA) batarya şarj istasyonlarında kullanılan güç faktörü düzeltici (GFD) doğrultma devrelerinin önemi vurgulanmıştır. Çalışmada, klasik Boost GFD, simetrik köprüsüz GFD, asimetrik köprüsüz GFD ve tam köprü tam kontrollü GFD olmak üzere dört farklı devre topolojisi detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, bu dört topolojinin de GFD'siz devrelere kıyasla şebeke tarafından çekilen akımda daha düşük harmonik içeriği sağladığı ve güç faktörünü artırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, karşılaştırılan devreler arasında, tam köprü tam kontrollü devre yapısının şebeke akımında en düşük harmonik içeriği sağladığı, ancak kontrol yapısının daha karmaşık olduğu belirtilmiştir. Bu durum, yüksek verimli ve düşük harmonikli devre yapılarının, tasarımda daha fazla karmaşıklık ve kontrol gereksinimi doğurduğunu ortaya koymaktadır. Böylece, şarj istasyonlarının güç kalitesi üzerinde GFD'li devrelerin önemli bir etkisi olduğu ve bu etkiyi optimize etmek için uygun devre tasarımının seçilmesinin kritik olduğu ifade edilmiştir(Monteiro vd.,2017).

Katic ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yürütülen araştırmada, gerilim düşüşleri meydana geldiğinde EA'dan şebekeye şarj modunun dağıtım şebekesine olan etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada, 3 MW gücündeki IEEE 13 bara modeli kullanılarak bir dağıtım şebekesi simüle edilmiş ve bu sisteme 22 adet, 22 kW kapasiteli elektrikli araç şarj istasyonu bağlanmıştır. Simülasyon sonuçları, şarj istasyonlarının sayısındaki artışın gerilim seviyelerinde düşüşe ve harmonik bozulmaların yükselmesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, sistemin araçtan şebekeye modunda çalıştırılması halinde, bu olumsuzlukların giderildiği ve şebeke üzerindeki olumsuz etkilerin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda çalışma, araçtan şebekeye modunun dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin korunması ve gerilim regülasyonu açısından etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Katic vd., 2019).

Selvabharathi ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, EA'ların güç kalitesi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu etkilerin izlenerek kontrol altına

alınmasına yönelik değerlendirmelerde bulunulmuştur. Çalışmada, EA'ların şarj edilmesi sırasında güç faktörünün azaldığı gözlemlenmiş olup, bu durumun şebekeye olan olumsuz etkilerinin harmonik bileşenlerden kaynaklandığı ortaya koyulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, EA'ların şebekeye entegrasyonunda güç kalitesi sorunlarını en aza indirmek için etkin harmonik filtreleme tekniklerinin uygulanması gerektiği belirtilmiştir (Selvabharathi vd.,2020).

Yuvaraj ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çok sayıda EA'nın güç sistemine entegrasyonunun mühendislik ve ekonomik açıdan önemli zorluklar oluşturduğuna dikkat çekilmiştir. Bu entegrasyon sürecinin, operasyonel verimliliği artırma, ekonomik etkileri göz önünde bulundurma ve ideal kontrol stratejilerinin belirlenmesi gibi unsurları kapsayan kapsamlı bir değerlendirmeyi gerektirdiği vurgulanmaktadır. Ayrıca, çalışmada belirtilenlere göre, EA'ların güç şebekesine büyük ölçekte entegrasyonu, dikkatli bir şekilde yönetilmediği takdirde çeşitli teknik ve ekonomik problemlere yol açabilir. Özellikle, yapılan analizler, trafoların aşırı ısınması ve güç dağıtım altyapısına yönelik yeni yatırımların yapılması gerektiği gibi olumsuz etkilerin ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, söz konusu çalışmada, entegrasyon sürecinde karşılaşılan bu zorlukların çözülmesi adına daha ileri düzeyde yönetim stratejileri ve altyapı yatırımlarının önemine vurgu yapılmaktadır (Yuvaraj vd.,2024).

EA teknolojisindeki gelişmeler, şarj ünitelerinde ve yerleşik şarj ekipmanlarında iyileştirmelere yol açmış, böylece EA'ların şebeke üzerindeki harmonik bozulma etkileri azaltılmıştır. EA'ların sayısı artmaya devam ettikçe, güç şebekesindeki harmonik bozulmaların artmasını önlemek için araştırmacıların bu konuya doğru yönelmekte olduğu görülmektedir. Bu bağlamda önerilen tez çalışmasında, batarya şarj sistemlerinin neden olduğu harmoniklerin azaltılması ya da tamamen ortadan kaldırılması için aktif filtrelerin kullanımı ele alınacaktır. Bu kapsamda, AGF'lerin harmonik azaltmadaki performansı değerlendirilecektir. Ayrıca, AGF'lerin verimli çalışabilmesi için kritik bir parametre olan referans akım çıkarma yöntemleri de bu çalışmada ele alınacaktır. Günümüzde, farklı referans akım belirleme yöntemleri geliştirilmekte olup, bunların harmonik giderme sürecine olan etkileri önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, YSA ve senkron referans çatı ile referans akım çıkarma yöntemleri incelenecek olup, harmoniklerin azaltılması üzerindeki etkileri incelenecektir.

3. YÖNTEM

3.1. Elektrikli Araç Batarya Şarj Stratejileri

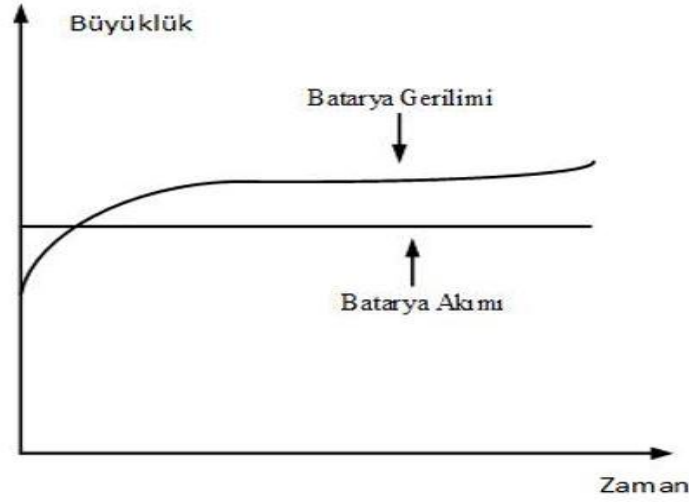
Elektrik enerjisi, günlük yaşamda vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye zarar veren içten yanmalı motorlu araçların kullanımı, enerji kaynaklarının tükenmesine yol açmaktadır. Bu olgu, çevre dostu ve alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan şarj edilebilir araçların geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmıştır (Falih vd, 2021). Elektrikli otomobiller fosil yakıtlı araçların yerini alacak bir çözümdür çünkü motoru ve araçtaki diğer aletleri çalıştırmak için şarj edilebilir bir bataryadan elektrik gücü alırlar (Banguero vd., 2018). Bataryalar elektrik enerjisini depolamak için kullanılan cihazlardır. Enerji depolama, alternatif bir yenilenebilir enerjinin birincil bileşeni haline gelir. Enerji kapasitesi, batarya bir güç kaynağı olarak kullanıldıktan sonra azalacak ve batarya yeniden şarj edildikten sonra tam kapasiteye dönebilecektir (Suryoatmojo, 2020).

Şarj edilebilir piller, elektrikli araçlar (EA'lar) için birincil enerji kaynağı olarak hizmet eder. EV popülaritesindeki artış, kurşun-asit pillerden lityum-iyon pillere doğru evrilen pil teknolojisindeki önemli gelişmelere bağlanabilir. Şu anda, araştırmalar EA'larda potansiyel kullanım için lityum-kükürt piller gibi yüksek enerji yoğunluklu seçeneklere odaklanmaktadır. EA pillerindeki enerjiyi yenilemek için çeşitli şarj yöntemleri mevcuttur. Geleneksel şarj teknikleri, sabit akım (SA), sabit voltaj (SG), sabit güç ve kaçak akım yöntemlerini kapsar. Son zamanlarda, daha hızlı pil şarjını kolaylaştırmak için sabit akım-sabit voltaj ve darbeleri ve negatif darbeleri şarj gibi teknikleri entegre eden daha gelişmiş şarj teknolojileri ortaya çıkmıştır.

3.1.1.Sabit akım

Sabit akım(SA) şarjı, tükenmiş bir aküye düşük seviyede akım verildiği en basit yöntemdir. Tipik olarak, akım akünün maksimum nominal kapasitesinin %10'una ayarlanır. Bu şarj yaklaşımı özellikle nikel-kadmiyum ve nikel-metal hidrit aküler için etkilidir. Ancak, akü aşırı şarj olursa gazlanma ve aşırı ısınma gibi sorunlara yol açabilir. Benzer şekilde, kaçak akım şarjı, akünün kendi kendine boşalmasını önlemek için küçük

bir akım uygulanmasını içerir. Bu yöntem genellikle acil güç yedekleme sistemlerinde kullanılır ve kurşun-asit akülerle uyumludur (Kuşdoğan, 2017).



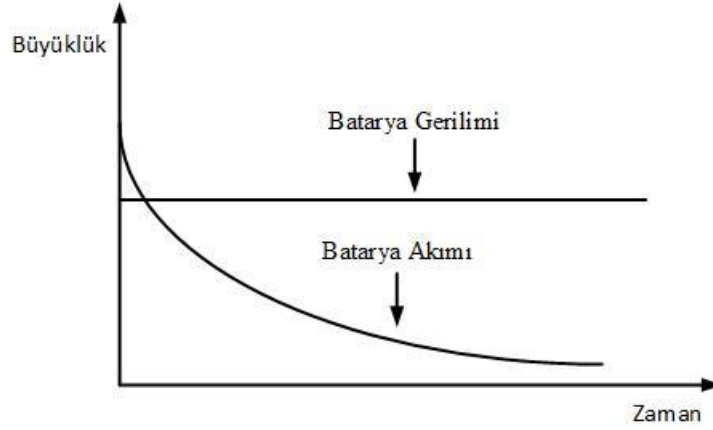
Şekil 3.1. Sabit akım şarjında batarya voltajı ve batarya akımı

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, sabit akım profilinde gerçekleştirilen batarya şarj işlemi sırasında, batarya akımı kontrol mekanizması tarafından sabit bir seviyede tutulmaktadır. Bu süreçte, batarya voltajında belirgin bir şekilde artış gözlemlenmekte olup, gerilim yükselmesi şarj işleminin ilerleyişine bağlı olarak yukarı yönlü bir eğilim sergilemektedir.

3.1.2. Sabit gerilim

Sabit gerilim (SG) şarj modunda, aküye sabit akım uygulanırken, voltaj değeri değişkenlik gösterir. Akım seviyesi genellikle akü kapasitesinin %10’u oranında ayarlanır. Şarj işlemi, akü voltajı, belirlenen önceden tanımlanmış değere ulaşana kadar devam etmektedir. Ni-MH ve Ni-Cd aküler şarj için SG yöntemini kullanır. Bu yöntem genellikle terminallerine sabit bir voltaj uygulayarak aküyü şarj etmek için kullanılır. Şarjın ilk aşamasında şarj akımı yüksektir. Akü voltajı şarj cihazının voltaj ayar sınırına ulaştığında, şarj akımı azalır. Bu tür bir kontrol, tam şarja ulaşmak için uzun şarj süreleri gerektiren uygulamalarda kullanılır. Uzun şarj süresi gerektirdiğinden, sıcaklık artışlarına ve batarya ömrünün kısalmasına neden olabilir (Banguero vd., 2021).

Bu yöntem seri bağlı hücrelerdeki dengesizliği ortadan kaldırır. Şarj işleminin başlangıcında çekilen yüksek güç akü ömrünü kısaltabilir. Yavaş şarj oranı ve akünün aşırı şarj olması bu tekniğin diğer dezavantajlarıdır (Naik, Madhu ve Vyjayanthi, 2021).

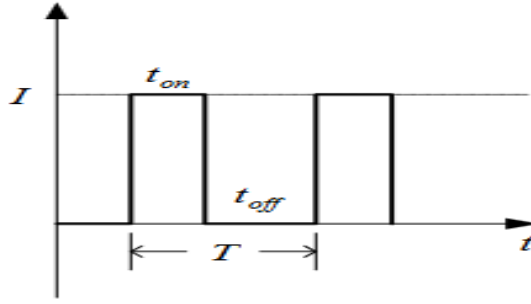


Şekil 3.2. Sabit gerilim şarjında batarya voltajı ve batarya akımı

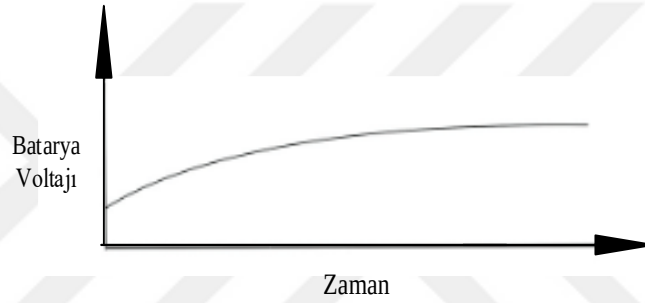
Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, sabit gerilim profilinde gerçekleştirilen batarya şarj işlemi sırasında, batarya voltajı kontrolör tarafından sabit bir seviyede tutulmaktadır. Bu operasyonda, batarya akımında gözle görülür bir şekilde düşüş gözlemlenmekte olup, akım değeri şarj işleminin ilerleyişine bağlı olarak aşağı yönlü bir grafik sergilemektedir.

3.1.3. Darbeli şarj (Pulse Charging-PC)

Darbeli şarj (PC) yöntemi, aküye düzenli aralıklarla darbeli akım uygulanmasını içerir. Bu yaklaşımda, aküler periyodik olarak tamamen boşaltılır ve ardından yeniden şarj edilir, bu işleme eşitleme şarjı denir (Linden ve Reddy, 2002). Bu teknik, akü voltajının zamanla dengelenmesine yardımcı olur. Bu yöntemi kullanırken, şarj frekansı, darbe tepe noktası ve darbe genişliği gibi parametrelerin dikkate alınması önemlidir, çünkü bunlar doğrudan akünün kapasitesini ve genel şarj süresini etkiler. Darbeli şarjın avantajlarından birisi, polarizasyonu en aza indirme yeteneğidir, bu da akü sıcaklığındaki artışları önlemeye yardımcı olur (Hua ve Syue, 2010) Ancak, bu yöntemin karmaşıklığı bir dezavantaj olarak görülebilir. Bu yöntem genellikle Kurşun-Asit ve LiFePO₄ batarya modelleri için kullanılır. Şekil 3.3’te darbeli şarj yöntemine ait akım dalga şekli ve Şekil 3.4’te batarya voltajına ait dalga şekli verilmiştir.



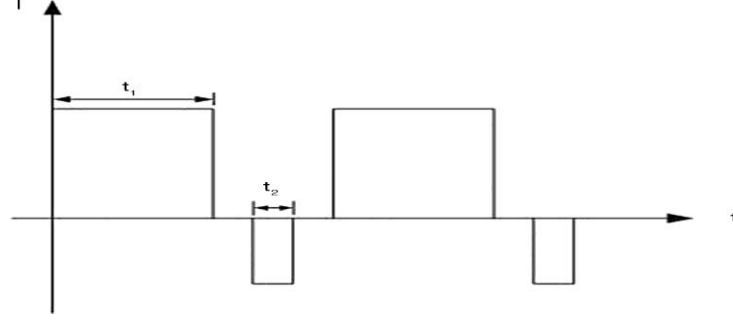
Şekil 3.3. Darbeli şarj yönteminde akım grafiği



Şekil 3.4. Darbeli şarj yönteminde batarya voltajı

3.1.4. Refleks şarj veya negatif darbeli şarj (NPC)

Negatif darbeli şarj (NPC) olarak da bilinen refleks şarj, PC yöntemine göre bir ilerlemeyi temsil eder. NPC kavramı, 1971'de W. Burkett ve J. Bigbee ile W. Burkett ve R. Jackson'ın patentleri aracılığıyla tanıtıldı (Lee vd., 2013 ; Nasser, 2017). NPC yöntemi, pozitif bir şarj darbesi (t_1 aralığı), şarj olmadan bir dinlenme süresi ve genellikle "geri yükleme darbesi" olarak adlandırılan bir deşarj darbesi (t_2 anı) içeren belirli bir şarj sırasını izler (Nasser, 2017). Bu yaklaşım, polarizasyonu etkili bir şekilde azaltarak pilin sıcaklık artışını düşürür (Li vd., 2009). Ancak, olası bir dezavantajı, şarj verimliliğinin azalmasına yol açabilmesidir (James vd., 2006). Şekil 3.5'te reflex şarj yönteminde batarya şarj ve deşarj aralıklarına ait grafik verilmiştir.



Şekil 3.5. Refleks profiline ait batarya şarj ve deşarj aralıkları

3.1.5. Damlama şarjı veya konik akım (Trickle Charge or Taper-Current-TC)

Damlama şarjı veya konik akım (TC) şarjı, pile düşük bir oranda, genellikle $C/100$ civarında sürekli SA sağlamayı içerir (Battery Application & Technology, 2018). Bu yöntem öncelikle akünün kendi kendine deşarjını telafi etmek için tasarlanmıştır (Linden ve Reddy, 2002). Çok küçük bir şarj akımı kullanarak, bu aküyü %100'e kadar etkili bir şekilde şarj edebilir. Genellikle marş ve ateşleme amacı içeren akü uygulamaları için kullanılır. Ancak, aşırı şarjdan kaynaklanan hasara karşı hassas aküler için tavsiye edilmez.

3.1.6. Yüzdürme şarjı (Float Charge-FC)

Yüzdürme şarjı (Float Charge, FC), akülerin tam şarj seviyesine ulaşmasını sağlamak ve uzun süreli enerji depolama kabiliyetini korumak amacıyla düşük seviyede SG uygulanmasına dayanan bir şarj yöntemidir (Chuang vd., 2012; Battery Charging Methods, 2018). Bu yöntem özellikle kurşun-asit aküler için uygundur (Linden vd., 2002). Yüzdürme şarj sistemi, akülerin şarj sürecini üç temel aşamaya ayırarak yönetir. İlk aşama, sabit akım fazı (I fazı/yoğun faz) olarak adlandırılır ve bu süreçte aküye belirli bir akım uygulanarak hızlı bir enerji depolaması gerçekleştirilir. Bu aşama, akünün düşük şarj seviyesinden hızla doluluk seviyesine ulaşmasını sağlayarak toplam şarj süresini optimize eder. İkinci aşama olan sabit voltaj fazı (V_o fazı/emilim fazı), bataryanın belirlenen nominal voltaj seviyesine ulaşmasının ardından devreye girer. Bu aşamada, aküye sabit bir gerilim uygulanırken akım kademeli olarak azalır ve böylece tam doluluğa

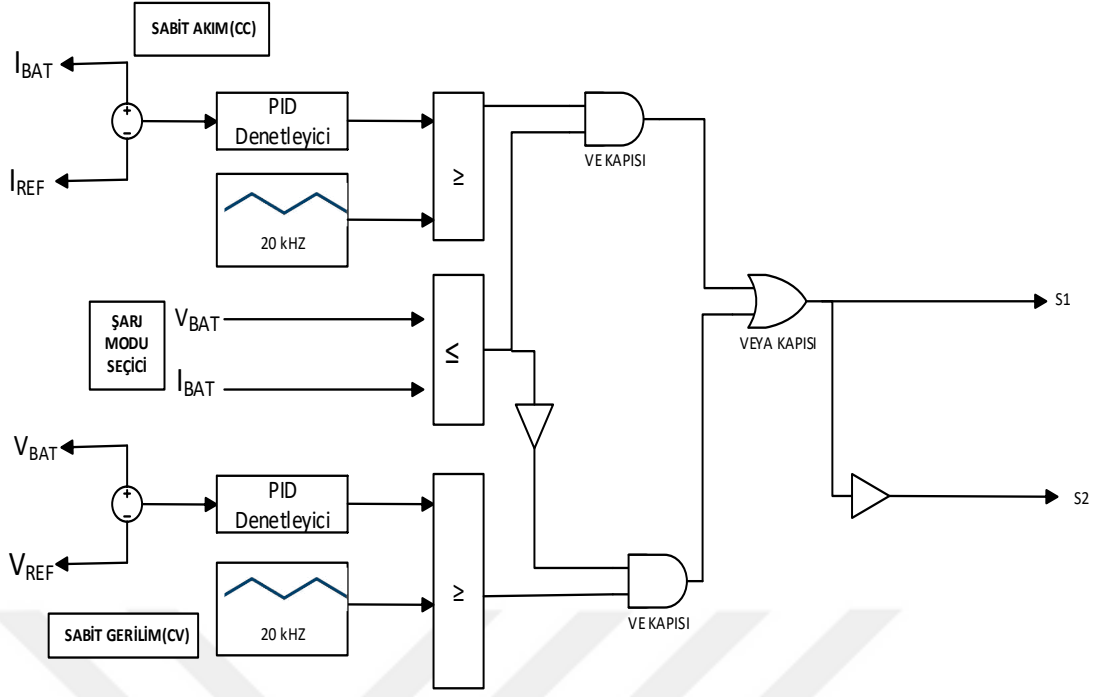
ulaşılması sağlanır. Üçüncü ve son aşama ise yüzdürme şarjı (V fazı) olup, akünün tam dolu olarak muhafaza edilmesini sağlar (Linden vd., 2002).

3.1.7. Sabit akım ve sabit gerilim (SA-SG)

Akü şarj cihazı, elektrikli otomobil akülerindeki enerjiyi doldurmak için temeldir. Akım ve voltaj değerleri şarj edilen bataryanın özelliklerine göre ayarlanmıştır. Bir şarj cihazı zamanı, akü şarj durumunu ve akü performansını etkileyebilir (Gao vd., 2020). DA güç kaynağının voltajı ve akımı çok yüksekse, batarya hücrelerini tahrip eder, böylece aşırı şarj bataryada aşırı bir ısınma meydana getirebilir ve ömrünü kısaltabilir. Bununla birlikte DA güç kaynağı çok düşükse, batarya şarj olmayacaktır. Bu sorunların üstesinden gelmek için yapılması gerekenlerden biri, bataryayı şarj ederken SA-SG sistemi adı verilen bir yöntem uygulamaktır. SA, akü şarj döngüsünün başlangıcında uygulanmıştır. Batarya voltajı maksimum voltaj değerine ulaştığında, şarj cihazı SG şarj moduna geçer ve batarya tamamen şarj olana kadar bu modda şarj etmeye devam eder (Chen vd., 2020).

SA-SG, SA ve SG yöntemlerinin birleşimidir. Bu doldurma yöntemi, iki yöntemi birleştirdiği için iki adımlı yöntem olarak da bilinir. şarj işlemi için, şarj cihazının akımı ve voltajı şarj işleminden önce belirlenmelidir. SA-SG yöntemi ile şarjın çalışma prensibi, batarya şarjının başlangıcında maksimum batarya voltajına ulaşana kadar ilk olarak SA ile şarj edileceğidir. İlk dönem akünün yüksek akımla şarj edilmesi seçilir, çünkü akımın akü üzerinde en az olumsuz etkiye sahip olacağı zamandır (ısı gibi), bu nedenle akü daha güvenli ve daha uzun ömürlü olacaktır. Bundan sonra akü dolana kadar SG moduna geçecektir. SA-SG doldurmak, SA doldurmaktan veya sadece SG doldurmaktan daha iyi bir seçenektir (Serhan vd., 2018).

SA-SG yöntemi, aşırı şarj riski olmadan hızlı şarj sağlar ve çeşitli pil türleri için uygundur. Bu yöntemi kullanarak batarya tam kapasitesine kadar şarj olacaktır. Bulanık mantık kontrolörü, kontrolör giriş değişkenleri olarak voltaj ve akım değişimlerini ve şarj çıkış değişkenleri olarak akü voltajını kullanır. Akü voltajı, verilen şarj voltajı ve akımına göre artacaktır. Bu stratejiyi uygulayarak, batarya kapasitesine göre tam olarak şarj edilecek ve aşırı şarj olmaktan kaçınacaktır (Muslimin vd, 2023). şekil 3.6'de SA-SG şarj yöntemine ait blok şeması verilmiştir.



Şekil 3.6. SA-SG şarj yöntemi blok şeması

3.2. Aktif Güç Filtresi

AGF'ler, indüktörler ve kapasitörler gibi pasif enerji depolama bileşenleri ile birlikte güç anahtarlama cihazlarını içeren bir güç elektroniği devreleri kategorisini kapsar (El-Habrouk Darwish vd., 2000). İdeal koşullar altında, tamamen sinüzoidal bir güç kaynağına bağlı doğrusal yükler ideal olarak faz, frekans ve dalga biçimi açısından voltajla senkronize akım çekmelidir. Eğer durum böyle olsaydı hem güç faktörü hem de THB sıfıra yaklaşacağından reaktif güç kavramı önemsiz olurdu. Bununla birlikte, sistemlerdeki yüklerin doğrusal olmayan doğası nedeniyle, harmonik bileşenlerle birlikte yük akımı dalga biçiminde bozulmalar ortaya çıkar. Endüktif ve kapasitif yüklerin varlığı genellikle yük gerilimi ile kaynak arasında bir faz farkına neden olur ve bu da yaygın bir durum olan reaktif güç çekimine yol açar. Bazı durumlarda hem harmonik üretimi hem de reaktif güç talebi aynı anda gerçekleşir. Ayrıca, kararlı bir sistem için kaynak geriliminin genliği ve frekansı sabit ve sinüzoidal kalmalıdır; ancak büyük yüklere sahip kullanıcılar, kaynak empedansında önemli dalgalanmalara neden olan harmonik akımlar çekebilir ve bu da önemli gerilim değişikliklerine neden olabilir (Doğan, 2016).

AGF'ler tipik olarak dört temel bileşenden oluşur: DA güç kaynağı, güç devresi, AA filtresi ve kontrol devresi. Güç devresi, istenen filtre akımını veya gerilimini üretmek

için etkinleştirilen MOSFET'ler ve IGBT'ler gibi anahtarlama elemanlarını içerir. Bu anahtarlama eylemleri, sistem içindeki çeşitli noktalardan toplanan akım veya voltaj verileri kullanılarak kontrol edilmelidir. DA güç kaynağı, filtre tarafından doğru kompanzasyon için gerekli voltajı sağlar. AGF'lerinin birincil amacı, güç şebekesine kontrol edilebilir tek fazlı veya üç fazlı akımlar veya gerilimler sağlamaktır (Sadeq, 2014).

AGF'ler, düşük ve orta gerilim güç kaynağı sistemlerinde akım harmoniklerini yönetmenin yanı sıra yüksek gerilim dağıtım seviyelerinde reaktif güç ve gerilim regülasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır (Gali ve Gupta, 2017). Bir AGF'nin temel rolü, harmonikleri sistemden elimine etmektir; ancak bunu başarırken bir harmonik kaynağı olarak hareket eder. AGF'leri, çeşitli kontrol algoritmaları kullanarak şebeke akımlarının veya gerilimlerinin ideal sinüzoidal formunda harmoniklerin neden olduğu sapmaları tespit eder. Daha sonra belirlenen harmonik akımları veya gerilimleri kaynak ve yük arasındaki ortak bağlantı noktasından sisteme geri enjekte ederek bunların büyüklük olarak eşit ancak faz olarak zıt olmasını sağlarlar (Akçay, 2010).

Bu filtreler, harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, nötr hat akımı kompanzasyonu, gerilim harmoniklerinin ortadan kaldırılması, gerilim dalgası bastırma, ani gerilim yükselmelerinin azaltılması ve üç fazlı sistemlerin dengelenmesi gibi birçok işleve hizmet eder (Akmaz, 2012).

AGF'leri pasif filtrelere göre çeşitli avantajlar sunarken, bazı dezavantajları da vardır (Manias, 2016; Sadeq, 2014).

AGF'lerin avantajları şunlardır:

- Güç sisteminin harmonik bileşenin değerine ve frekansına göre otomatik olarak ayarlanması.
- Sistemi aşırı yükleme veya rezonans etkilerine neden olma riski yoktur.
- Yük değişimlerine otomatik olarak ayarlanabilme özelliği.
- Seçilen çeşitli harmonik bileşenleri aynı filtre ile elimine edebilme.
- Güç sistemine basit entegrasyon.
- Reaktif güç kompanzasyonu sağlama.
- Esnek tasarımı sayesinde kolay genişleme imkânı.
- Daha küçük fiziksel boyutlar.

Dezavantajları ise şunlardır:

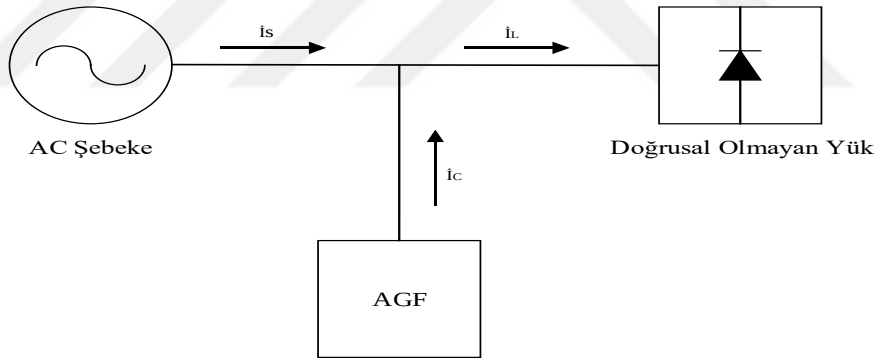
- Daha karmaşık uygulama.

- Daha yüksek maliyetler.
- Artan güç kayıpları.

Doğrusal olmayan yükler ile elektrik güç sistemleri arasına entegre edilen AGF, kaynak geriliminde oluşabilecek gerilim düşüşleri, ani sıçramalar, kısa süreli kesintiler, dalgalanmalar ve dengesizlikler gibi olumsuzlukların etkin bir şekilde giderilmesine olanak tanıyan gelişmiş bir çözüm önerisi olarak sunulabilir. SAGF'ler, gerilim bozulmalarının neden olabileceği güç kalitesi problemlerini minimize ederek şebeke kararlılığına katkıda bulunmaktadır (Jamlaay, 2024).

Özellikle sanayi sektörü ve tıbbi cihazlar gibi hassas elektronik ekipmanların kullanıldığı alanlarda, bu tür yüklerin güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. AGF'nin uygulanması, sadece yüklerin korunmasını değil, aynı zamanda sistem genelinde enerji verimliliğinin artırılmasını ve operasyonel sürekliliğin sağlanmasını da desteklemektedir.

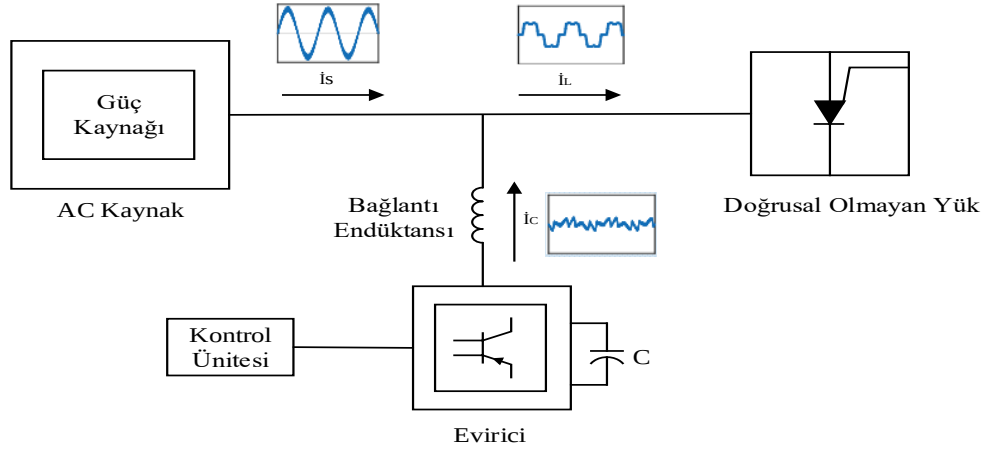
AGF'ler, topolojik yapılarına, invertör konfigürasyonuna ve ilgili faz sayısına göre sınıflandırılabilir (Özer, 2023). Şekil 3.7 AGF'ne ait bir blok şeması verilmiştir.



Şekil 3.7 Aktif güç filtresi blok şeması

3.3. Paralel Aktif Güç Filtresi

PAGF'ler, harmonik akımın ortadan kaldırılması, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı regülasyonu ve nötr bara akımı kompanzasyonu gibi konuları ele alarak endüstriyel ortamlarda akım harmoniklerini ve gerilim bozulmalarını azaltmak için oldukça etkili çözümlerdir (Orucu, 2020). Şekil-3.8'de PAGF'nin genel şeması verilmiştir.



Şekil 3.8. PAGF genel şeması

PAGF sistemleri, endüstriyel ortamlardaki mevcut pasif harmonik filtre sistemleriyle entegre edilebilir. Ancak, PF sisteminin şebekenin kritik rezonans frekansı dikkate alınarak tasarlanması önemlidir. PAGF sistemlerinde, harmonik bileşenleri tespit etmek için yaygın tekniklerden biri, hızlı reaktif güç yöntemi olarak da bilinen Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) yöntemidir. HFD yöntemi, ölçülen akımı tam bir sinüzoidal dalga şekline dönüştürebilen bir akım üreten bir hesaplama devresi kullanarak gerçek zamanlı olarak çalışır. Bu analiz için hem kaynak gerilimi hem de yük akımı referans olarak kullanılır. HFD yönteminin avantajları arasında referans hesaplamaları için gereken minimum bileşen sayısı ve bozulmaya katkıda bulunan tüm frekanslardaki harmonikleri telafi etme yeteneği yer alır. Analitik yöntemlerdeki ve yarı iletken kontrol teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, verimliliğin artması ve akım harmoniklerinin giderilmesindeki başarının artması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda paralel aktif filtrelerin benimsenmesi artmıştır.

Güç şebekesine ait geriliminin tamamen sinüzoidal olduğu ideal bir durumda, gerilime ait matematiksel ifade, denklem 3.1’de olacak şekilde edilebilir:

$$V_s(t) = V_m \times \cos \omega t \quad (3.1)$$

Şebekeye doğrusal olmayan bir yük eklendiğinde, özellikle yük endüktif ise, akım dalga formu gerilimin gerisinde kalma eğiliminde olur ve bu da sistemde sonsuz

harmonik bileşenlerin oluşmasına neden olur ve bu durumda şebeke akımına ait matematiksel ifade denklem 3.2'deki gibi olur:

$$i(t) = \sum I_{nm} \cos(nwt - \phi_n) = I_n \cos(nwt - \phi_1) + \sum I_{nm} \cos(nwt - \phi_n) \quad (3.2)$$

Şebekeden çekilen anlık güç aşağıdaki formül kullanılarak denklem 3.3'teki gibi hesaplanabilir:

$$p(t) = V_s(t) \times i(t) \quad (3.3)$$

Bu güç aktif güç, reaktif güç (aktif güce ortogonal olan) ve şebekeden çekilen çeşitli harmonik güç bileşenlerinden oluşur. Şebekeden çekilen gerçek veya temel akımı belirlemek için aktif güç şebeke gerilimine bölünür. Toplam akım değeri daha sonra harmonik ve reaktif akım bileşenlerini elde etmek için gerçek akımdan çıkarılır. Bu bileşenler, çekilen akımın ideal olarak sinüzoidal olmasını sağlamak için paralel aktif filtre tarafından düzenlenir. Şebekeden çekilen aktif güç ve bu aktif güç için gerekli akımın reel bileşeni şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{ak}(t) = V_m \times I_{1m} \times \cos(wt) \times \cos(\phi_1) \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'ten hareketle, şebekeden çekilen gerçek akım bileşeni şu şekilde elde edilebilir:

$$i_s(t) = P_{ak}(t) \div V_m(t) = I_{1m} \times \cos(wt) \times \cos(\phi_1) \quad (3.5)$$

Yük akımından gerçek akım bileşeni çıkarıldığında, reaktif akım bileşeni ve harmonik akım bileşenlerinden oluşan akım denklem 3.6 ve denklem 3.7'deki gibi elde edilir:

$$i_{boz}(t) = i(t) - i_s(t) \quad (3.6)$$

$$i_{boz}(t) = I_{1m} \times \sin(wt) \times \sin(\phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \times \cos(nwt - \phi_n) \quad (3.7)$$

Bu kapsamlı yaklaşım, endüstriyel uygulamalarda akım harmoniklerinin ve gerilim bozulmalarının etkin bir şekilde yönetilmesinde PAGF'lerin işlevini göstermektedir.

Endüktans seçimi, AGF'lerin etkinliğinde çok önemli bir rol oynar. Filtre endüktansı, güç dönüştürücü içindeki güç elektroniği cihazlarının anahtarlama işlemleri sırasında oluşan yüksek frekanslı dalgalanma akımlarını azaltmaya hizmet ederek aktif filtre akımının referans sinyallerini doğru bir şekilde izlemesini sağlar. Küçük bir endüktans kaynak akımında önemli anahtarlama dalgalanmalarına neden olabilirken, aşırı büyük bir endüktans kompanzasyon akımının amaçlanan değerlere ulaşmasını engelleyebilir (Jou vd., 2005). L_f denklem 3.8 ile bulunur (Sezer, 2006).

$$L_f = \frac{V_{DA}}{6 \cdot f_s \cdot I_{ppmax}} \quad (3.8)$$

Burada f_s , anahtarlama frekansı olup, konvertör verimi % 90 şeklinde değerlendirilmektedir. Buna göre DA tarafındaki maksimum akım değeri, I_{DA} değeri % 10'luk değişimler içermektedir. I_{ppmax} , denklem (3.9)'daki gibi bulunur.

$$I_{ppmax} = 0.1 \times I_{DA} \quad (3.9)$$

AGF tasarımındaki bir diğer kritik parametre V_{DA} kapasitörünün voltajıdır. Bu voltaj, kompanzasyon gerektiren akımı dengelemek için AGF akımını yönlendirmek için gereklidir ve tepe şebeke voltajını aşmalıdır. Bununla birlikte, çok yüksek bir DA voltajının tercih edilmesi, daha yüksek filtre endüktansı, güç elektroniği cihazları için daha yüksek voltaj değerleri ve DA kapasitör için daha yüksek voltaj değerleri gibi çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Yüksek filtre endüktansı önemli güç kayıplarına, aşırı ısınmaya ve frekans tepki performansının bozulmasına yol açarak yüksek voltajlı kapasitör güç filtrelerinin uygulanabilirliğini sınırlandırabilir (Jou vd., 2005).

AGF etkinleştirilmesi üzerine, anlık gerçek gücün dalgalanan bileşeni nedeniyle DA kondansatör geriliminde değişimler gözlenir. Bu dalgalanan bileşeni azaltmak için enerji, inverterin DA tarafından AA tarafına anlık gerçek güç dalgalanmalarına karşılık gelen miktarlarda aktarılır.

Sonuç olarak DA kondansatör üzerindeki gerilim bu enerji transferine yanıt olarak dalgalanır. DA kapasitör geriliminin dalgalanan ve doğru bileşenleri Denklem (3.10)'de gösterilmektedir (Akmaz, 2012).

$$V_{DA} = \bar{V}_{DA} + \widetilde{V_{DA(t)}} \quad (3.10)$$

Bu denklemde, ilk doğru akım ifadesi ortalama kapasitör gerilimini gösterirken, ikinci doğru akım ifadesi kapasitör geriliminin dalgalanan bileşenini temsil eder. PAGF'nin kararlı durumda üretmesi gereken güç, gerçek gücün dalgalanan bileşenine karşılık gelir ve Denklem (3.11)'de ifade edilir (Akmaz, 2012).

$$\tilde{P}_f = \tilde{P}_{3y} \quad (3.11)$$

Kondansatörün şebekeye vermesi gereken akım denklem (3.12)'de ifade edilmektedir (Akmaz, 2012).

$$\tilde{I}_f = \frac{\tilde{P}_{3y}}{V_{DA}} \quad (3.12)$$

Kondansatör gerilimindeki dalgalanma denklem (3.13) deki gibidir.

$$\widetilde{V_{DA(t)}} = \frac{1}{C_{DA}} \int_0^t \tilde{I}_f(t). dt \quad (3.13)$$

Kondansatörün değeri ise denklem (3.12) ve denklem (3.13) kullanılarak denklem (3.14) elde edilir (Akmaz, 2012).

$$C_{DA} = \frac{\tilde{P}_{3y}}{(\widetilde{V_{DA}})x(\bar{V}_{DA})x(w_p)} \quad (3.14)$$

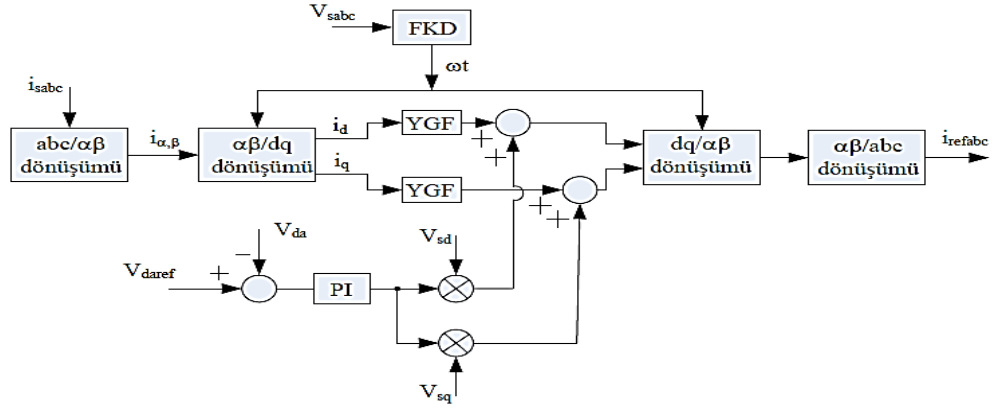
Aktif filtre sistemlerinde, besleme kayıplarını azaltmak, kontrol metodolojilerini geliştirmek ve kendi kendine yeterli V_{DA} kapasitör gerilimini korumak için kapalı döngü oransal-integral (PI) kontrol veya Kayar Mod kontrol teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Sing vd., 2005). Bu nedenle, optimum performansı sağlamak için akım kaybını AGF'ye geri beslemek çok önemlidir.

3.4. Paralel Aktif Güç Filtrelerinde Referans İşaret Çıkarım Yöntemleri

Referans akımının çıkarılması için kullanılan metodoloji, temel olarak, harmonik kaynak tarafından elektrik şebekesinden çekilen harmonik akımları etkili bir şekilde ortadan kaldırmak için PAGF'nin elektrik sistemine sağlaması gereken akımın büyüklüğünün hesaplanmasıyla ilgilidir, aynı zamanda sistemde mevcut herhangi bir reaktif gücü aynı anda kompanze eder. PAGF'nin optimum dinamik performansını elde etmek için, hem son derece doğru hem de hızlı bir şekilde referans akım çıkarma yönteminin uygulanması çok önemlidir. Çeşitli referans akımı çıkarma metodolojileri mevcuttur. Bu bağlamda PAGF'nin işlevselliği, harmonik kompanzasyonu sağlamayı amaçlayan bir sistem olarak iki temel bileşene ayrılabilir. İlk bileşen, yük akımı içinde bulunan harmonik bileşenlerin tespitini ve değerlendirmesini kapsar ve bunu daha sonra gerekli referans akımının çıkarılması izler. İkincil bileşen, voltaj kaynağı invertörünün çalışması için gerekli olan uygun anahtarlama sinyallerinin üretilmesiyle ilgilidir. Literatürde çok sayıda referans akım çıkarım metodu bulunmakta olup, bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan yöntemlere yer verilmiştir.

3.4.1. Senkron referans çatı yöntemi

Bu yaklaşımda, üç fazlı akımlar Park dönüşümü kullanılarak DA değerlerine veya d-q eksenli bileşenlerine dönüştürülür. Bu dönüşüm, bir yüksek geçiren filtre veya bir düşük geçişli filtre aracılığıyla temel harmonik bileşenin çıkarılmasını sağlar. Filtrelemeden sonra dq eksenli bileşenleri tekrar üç fazlı referans akımlarına dönüştürülür (Kocabaş, 2009; Kocabaş vd., 2006). Şekil 3.9, senkron referans çatı yöntemini (SRÇY) kullanarak referans akımları elde etme sürecini özetleyen bir blok diyagramı sunmaktadır.



Şekil 3.9. SRÇY ile referans akımların elde edilmesine ilişkin blok diyagram (Çöteli, Uçar, Dandil ve Ata, 2011).

Şekilden de görüleceği üzere, şebeke açısal frekansı, üç fazlı şebeke sinyalinin faz kilitli döngüye (PLL) girilmesiyle belirlenir. Her faz için yük akımı (i_{Labc}) başlangıçta Denklem (3.15) aracılığıyla $\alpha\beta$ eksen bileşenlerine dönüştürülür. Daha sonra bu $\alpha\beta$ bileşenleri, Denklem (3.16)'da gösterildiği gibi Park dönüşüm matrisi aracılığıyla şebekenin açısal hızı ω 'de dönen d-q bileşenlerine dönüştürülür. Bu işlem yük akımının temel bileşenini DA sinyallerine dönüştürürken, harmonik bileşenlerin frekansları senkron hız ve yöne göre kaydırılır (Kocabaş, 2009). Böylece d-q eksen akımları (i_d ve i_q) Denklem (3.17)'da gösterildiği gibi hem temel hem de harmonik bileşenleri içerir.

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos(i\omega t) \cdot dt \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_d + \tilde{I}_d \\ \bar{I}_q + \tilde{I}_q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Denklem (3.15)'te ω şebekenin açısal frekansını temsil eder. Denklem (3.17) için $\tilde{I}_d$ aktif akımın AA bileşenini, $\bar{I}_d$ ise aktif akımın DA bileşenini gösterir. Benzer şekilde, $\tilde{I}_q$ reaktif akımın AA bileşenidir ve $\bar{I}_q$ reaktif akımın DA bileşenini temsil eder. Sonuç

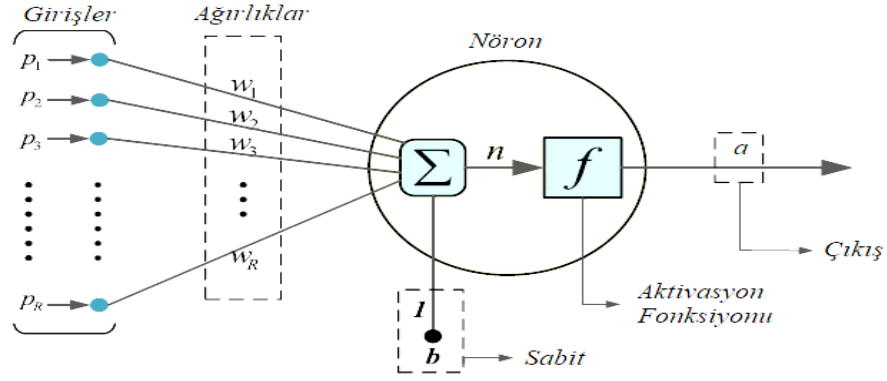
olarak, filtreleme gerektiren harmonik akımların d-q eksen bileşenleri belirlenir. Bu bileşenlere ters Park ve ters Clarke dönüşümlerinin uygulanması, abc çerçevesinde referans akımların oluşturulmasını sağlar.

Ek olarak, DA-link kondansatör gerilimini sabit bir seviyede tutmak için Oransal + İntegral (PI) kontrolör kullanılır. Bu kontrolörden gelen sinyal çıkışı, nihai referans akımlarını üretmek için YGF'den elde edilen referans akımlarına eklenir (Çöteli vd, 2011). SRÇY, yalnızca üç fazlı sistemlerde uygulanabilir. Bu yöntemde, temel bileşenler DA değerlere dönüştürüldüğü için kolaylıkla filtrelenebilir. Hesaplamalar anlık olarak gerçekleştirilse de, filtreleme işlemi nedeniyle bazı gecikmeler oluşabilir.

3.4.2.Yapay sinir ağları

Yapay zeka alanı, makinelerin muhakeme, yargılama, duygusal tepkiler, dil anlama ve problem çözme gibi insanlara benzer yetenekler göstermesine olanak tanıyan tekniklerin keşfi ve geliştirilmesine odaklanır. Yapay zeka içindeki önemli bir yöntem, insan beyninin mimarisini taklit eden YSA'dır. Yaklaşık 15 milyar nöron içeren insan beyninin aksine, bir YSA'daki nöron sayısı, eldeki görevin özel taleplerini karşılamak üzere tasarlanmıştır (Birecikli vd., 2020; Jiang vd., 2022). YSA'lar verilerden öğrenme ve bu bilgiyi kullanma yeteneğine sahiptir ve bu da onları tahmin, sınıflandırma, tanımlama ve kontrol dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın hale getirir.

YSA'lar, insan beyninin kavramsal mimarisinden türetilen metodolojik bir çerçeve oluşturur. YSA'lar, insan serebral yapısında bulunan biyolojik nöronlardan sonra modellenen yapay nöronlardan oluşur. Yapay bir nöron, çoklu girdi ve tek çıkışlı bir konfigürasyon ile karakterize edilen biyolojik bir nöronun temel matematiksel soyutlamasını temsil eder. Bu sistem karar verme ve uyarlanabilir öğrenme kapasitesine sahiptir (Yarıkkaya, 2023). Şekil 3.10 'da çok girdili bir nöron yapısı verilmiştir.

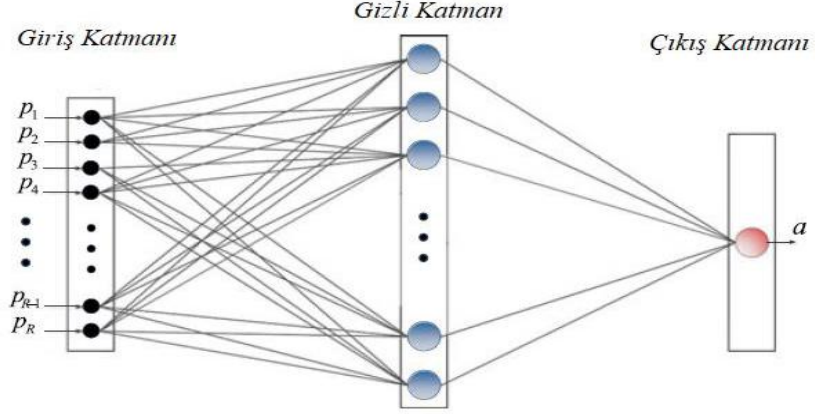


Şekil 3.10. Çok girişli nöron yapısı (Yarıkkaya, 2023)

Toplama fonksiyonu, nöron giriş değerlerinin (p) belirli bir ağırlık (w) ile çarpılmasının ardından elde edilen sonuçların bir araya getirilmesini sağlar. Bu işleme ek olarak, bir sabit bir değeri (bias- b) de sürece dahil edilir. Nöron içerisinde tüm bu girişlerin toplanması sonucu oluşan n değeri, bir aktivasyon fonksiyonuna tabi tutulur. Aktivasyon fonksiyonu, literatürde transfer fonksiyonu olarak da adlandırılmaktadır ve genellikle nöron çıkışlarını belirli bir aralıkla sınırlandırma işlevi görür. En sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları arasında sigmoid, hiperbolik tanjant ve doğrusal (püreline) fonksiyonları bulunmaktadır. Aktivasyon fonksiyonunun girişi olan n ve nöronun giriş sayısı olan R dikkate alınarak, bir nöronun matematiksel ilişkisi denklem (3.18)'de tanımlanmıştır.

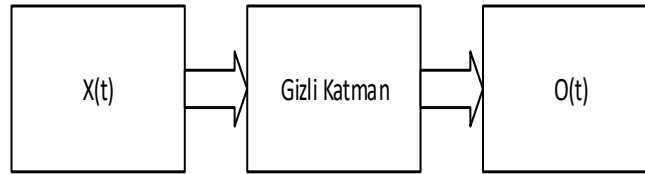
$$n = \left(\sum_{j=1}^R w_j \cdot p_j \right) + b \quad (3.18)$$

YSA, birden fazla nöronun bir araya gelmesiyle oluşturulabilir. Bu durumda, her bir nöron tarafından denklem 3.18'de ifade edilen matematiksel işleminin çözülmesi gerekmektedir. Çok sayıda nöronun birbirleriyle bağlantı kurarak oluşturduğu yapıya ait bir temsil, Şekil 3.10'da detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu yapı, YSA'lar temelini oluşturan nöronlar arasındaki etkileşimi ve bilgi akışını göstermektedir.

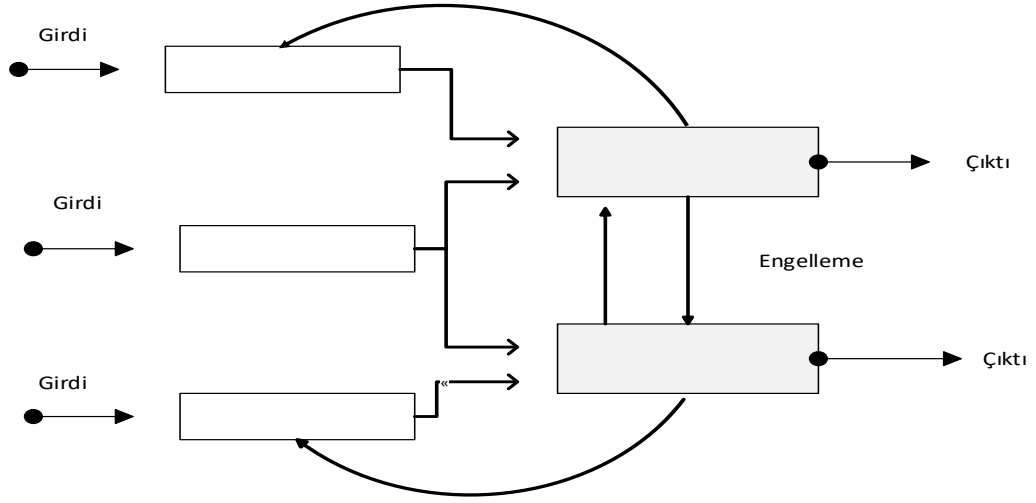


Şekil 3.11. Çok katmanlı YSA (Yarıkkaya, 2023)

Şekil 3.11’de gösterildiği gibi YSA, giriş ve çıkış katmanlarının yanında, genellikle bir veya birden fazla gizli katman içeren bir yapıya sahiptir. Gizli katmanlar, ağın öğrenme kapasitesini artıran ve karmaşık ilişkilerin modellenmesine olanak sağlayan önemli bir unsurdur. Şekilde verilen YSA mimarisi, ileri beslemeli ağ yapısı olarak sınıflandırılmaktadır. İleri beslemeli ağlar, yalnızca mevcut giriş verilerini işleyerek doğrudan bir çıkış üretir ve herhangi bir geri besleme mekanizması içermez. Bu özelliklerinden dolayı, bu tür ağ yapıları literatürde statik ağlar olarak adlandırılır. Statik ağların aksine, geri besleme mekanizmasına sahip ağlar, yalnızca mevcut giriş verilerini değil, aynı zamanda ağın önceki zaman adımlarında ürettiği çıkış bilgilerini de hesaplamalarına dâhil eder. Bu nedenle, geri besleme mekanizması içeren ağlar dinamik ağlar olarak tanımlanmaktadır. Dinamik ağlar, özellikle zaman serileri, sekans verileri ve geçmiş bilgilere dayalı analizlerin önem kazandığı uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Statik ve dinamik ağlar arasındaki bu ayrım, YSA mimarilerinin uygulama alanları ve performansları açısından mühendislik alanlarında önemli bir fark ortaya koymaktadır (Yarıkkaya, 2023). Şekil 3.12’de ileri beslemeli yapıdaki YSA ve Şekil 3.13’de geri beslemeli yapıdaki YSA blok şeması olarak verilmiştir.



Şekil 3.12. İleri beslemeli yapay sinir ağı blok şeması



Şekil 3.13. Geri beslemeli yapay sinir ağı

3.4.2.1. Yapay sinir ağlarının temel özellikleri

YSA'nın her tür probleme standart bir yöntemle uygulanması, her zaman etkili sonuçlar doğurmayabilir. Bu nedenle, problem yapısının gerektirdiği özelliklere göre bazı stratejiler geliştirilmesi önem arz etmektedir. Aşağıda, bu bağlamda önerilen temel yaklaşımlar maddeler halinde sıralanmıştır (Erdemci, 2023):

- Bellekler dağıtılmış bir yapısal form oluşturur: YSA'larında tekil bağlantılar tek başına anlam taşımamaktadır; bunun yerine, ağ bileşenleri karşılıklı etkileşim ve bağlantı yoluyla organize bir yapı oluşturur. Bilginin ağ boyunca dağıtılmış olması, anlamlı bir çıktının yalnızca ağın bütüncül bir perspektiften değerlendirilmesiyle elde edilebileceğini göstermektedir.
- Makine öğrenmesini YSA'lar yapar: Önceki deneyimlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve bu doğrultuda analiz ile sentez süreçlerinin yürütülebilmesi için bilgisayarların öğrenme kapasitesine sahip olması zorunludur.
- Bilgiyi depo eder: Edinilen bilgiler, sonraki problemlerde kullanılmak üzere sistem bünyesinde depolanır. Bu bilgiler, bir veri tabanında saklanmaktan ziyade ağın yapısı içerisinde dağınık bir biçimde muhafaza edilir.
- YSA'ların performansları güven oluşturmak adına öncelikle eğitime sürecine tabi tutulur daha sonra testten geçirilir: YSA'lar, başlangıçta eğitim setleri aracılığıyla bir öğrenme aşamasından geçirilir. Eğitim sonrası, ağa yöneltilen

sorulara verdiği yanıtlar analiz edilir. Yanıtların doğruluğu onaylandığında, ağ yeni ve daha önce deneyimlemediği problemlerle sınanır. Bu problemler karşısında doğru bir çözümler yaklaşımı sergilerse uygulamada kullanılmasına geçilir; aksi durumda ise eğitim süreci tekrar uygulanarak ağın performansı iyileştirilir.

- Bağlantı kurma ve örüntüler yapabilir: Deneyimler kategorize edilir ve bu kategoriler arasındaki örüntüler sistematik bir şekilde ilişkilendirilir
- Kendilerine has öğrenme özellikleri ve bilgileri bir araya getirebilirler: Edindikleri deneyimleri öğrenme ve bu deneyimleri birleştirerek yeni bilgiler üretme kapasitesine sahiptirler.
- Tam ve belirsiz bilgileri işleme yeteneği vardır: YSA'lar, tam olmayan ve belirsiz verileri işleyebilir ve bu süreçte ağın performansında herhangi bir kayıp yaşanmaz.
- Bilgiler eksik olsa da çalışabilirler: Eğitim sürecinden sonra, YSA'lar eksik bilgiye rağmen çözüm üretebilir. Bu eksiklikler ağın performansını etkilemez, ancak eksik verilere karşı ağın hassasiyetini gösteren hataların ortaya çıkmasına neden olabilir.
- YSA'ların işleyişi, diğer algoritmaların çalışma yöntemlerinden farklı bir yaklaşım sergiler: Bilgi işleme yöntemleri bakımından algoritmik olarak geleneksel programlardan farklı bir yapı sergiler.
- Gerçekleşmiş durumlar veya olaylardan faydalanarak öğrenirler: YSA'lar, karşılaştığı problemin çözümünü iyileştirme sürecinde bir deneyim olarak ele alır ve bu çözümleri düzenli olarak analiz eder. Bu yaklaşım, her yeni problem karşısında YSA'ların daha etkili çözüm yöntemlerini geliştirmelerini sağlamak adına önemli bir öğrenme yöntemidir.
- Bünyesinde algılama içeren olaylar veya durumlar için kullanılabilir: Bilgi odaklı çözümler için algılamaya yönelik verilerin gerçekleştirilmesi amacıyla etkin bir şekilde kullanılabilirler.
- Eksik örüntüyü tamamlama yeteneği mevcuttur: Bazen verilen bir örnek, eksik, hatalı veya yetersiz olabilir. Bu tür durumlarla karşılaştıldığında, çözümçü bir yaklaşımla benimser.

- Zamanla ve sıralı bir şekilde ağı yapısında çeşitli sorunlar oluşabilir: Hatalara karşı duyarlı olduklarından, eksik bilgilerle karşılaşıldığında ağ yapısında bozulmalar görülebilir.

Çeşitli hesaplama alanlarında yaygın olarak kullanılan geleneksel algoritmalar, karmaşıklıkları ile karakterize edilen veya daha önce karşılaşılmamış ve basit çözüme meydan okuyan zorluklar sunan sorunları ele almak söz konusu olduğunda temelde yetersiz olarak kabul edilmiştir. Yukarıda bahsedilen temel özellikler göz önüne alındığında, YSA'ların kullanımının, özellikle etkinliklerini artıran gelişmiş makine öğrenimi tekniklerinin uygulanmasıyla bağlantılı olarak, doğası gereği eksik veya belirsiz bir şekilde tanımlanmış sorunlarla karşı karşıya kaldığında bile uygulanabilir çözümler üretme potansiyeline sahip olduğu açıktır.

3.4.2.2. YSA'da öğrenme algoritmaları

Literatürde YSA'ların öğrenmesi ile ilgili çok sayıda öğrenme algoritması kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir. Öğrenme algoritmaları için belirlenmiş bölümde, geriye yayılma öğrenme algoritmalarına kıyasla önemli bir etkinlik gösteren Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritması hakkında kapsamlı bir genel bakışa değinilmiştir.

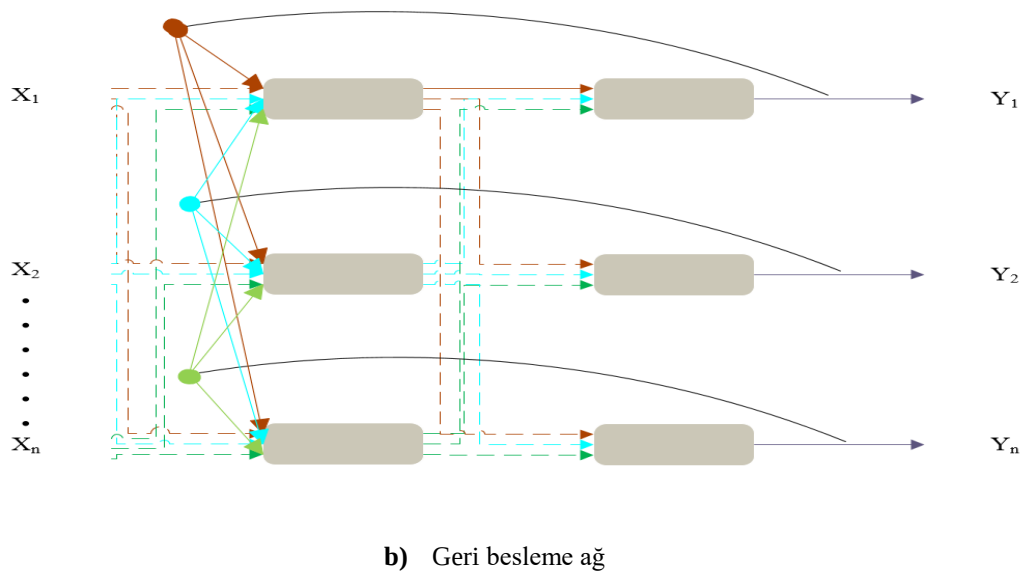
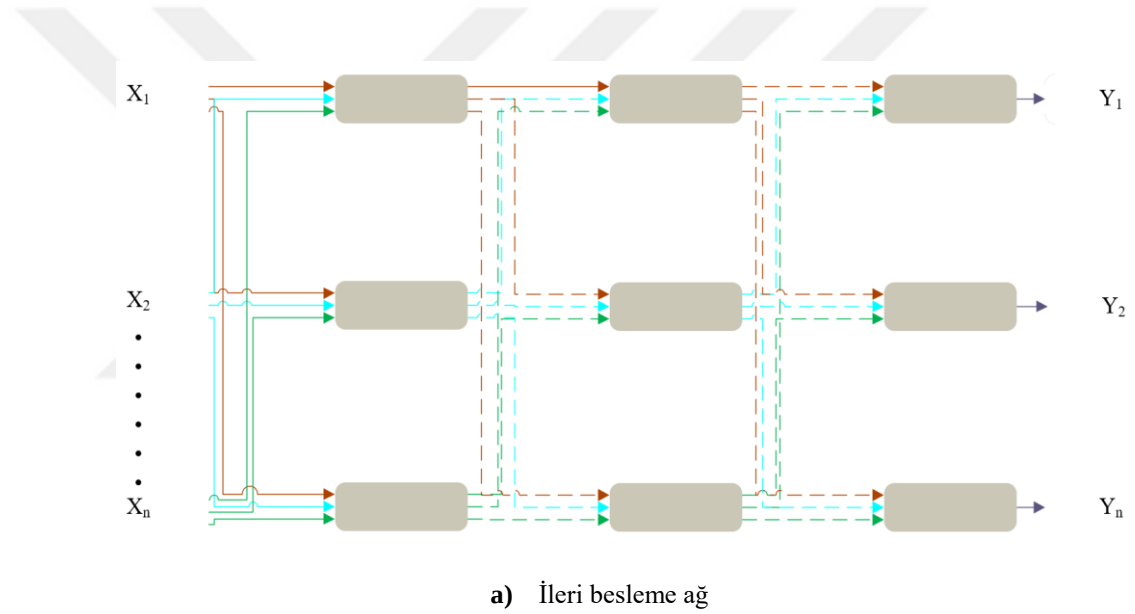
- Geriye yayılım öğrenme algoritması:

Geri yayılım algoritmaları, giriş, çıkış ve gizli katmanlardan oluşmaktadır. Bu algoritmalar, hiyerarşik bir ağ yapısına sahip olup, gizli katmandaki düğüm sayısı ve gizli katman sayısı değiştirilebilir. Artan düğüm sayısı, ağın öğrenme süresini uzatarak hatırlama yeteneğini artırırken; düğüm sayısının azalması ise, hatırlama yeteneğini azaltarak eğitim süresini kısaltır. Giriş ve çıkış katmanlarındaki düğümler, kendilerinden sonraki katmandaki düğümlerle bağlantılar kurarlar; ancak aynı katmanlar arasında böyle bir bağlantı kurulamaz. Her katmanın çıkış değerleri, kendilerinden sonraki katmanların giriş değerlerini oluşturur. Giriş değerlerinin ağın girişinden çıkışına doğru ilerlemesi, ileri besleme olarak adlandırılır. Geri yayılımda oluşan hatalar ise, çift yönlü hafıza tekniği kullanılarak ileri besleme yolunu izleyerek geriye yayılır(Aktaş, 2016). Gizli katmanlardaki ağırlıklar, geri yayımlı öğrenme tekniği ile ayarlanır; bu süreçte sonraki katmanlara ait hatalar kullanılır. Bu sayede, son gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıklar düzenlenir. İşlemler, ilk gizli katmana kadar aynı şekilde devam eder. Bu uygulama, 'toplam hata' en düşük seviyeye ulaşana dek süregeldikçe tekrarlanır. Sinir

ağının eğitim sürecine genel bir algoritma olan geri yayılım algoritması dâhil olur. Giriş ve çıkışlar arasında hesaplanan hata sinyali aracılığıyla, ağırlık değerleri sürekli olarak güncellenir. Denklem 3.19’da hata yani $e(k)$, sinir ağı çıkışı $o(k)$ ve gerçek çıkış $y(k)$ arasındaki fark gösterilmiştir.

$$e(k) = y(k) - o(k) \quad (3.19)$$

İleri ve geri yönlü çok katmanlı yapay sinir ağı, Şekil 3. 14’de a ve b bölümleri olarak gösterilmektedir. Giriş ile çıkış katmanı arasında bulunan katmanlara gizli katmanlar denir. Bu gizli katmanların ve nöron sayısının belirlenmesi, deneme yanılma yöntemiyle yapılır.



Şekil 3.14. Çok katmanlı sinir ağı topolojileri (Erdemci, 2023)

- Levenberg - Marquardt öğrenme algoritması(LM):

Geri yayım algoritmasının sonuçlara ulaşmada yavaş kalması, önemli bir dezavantajdır. Geri yayım, bir düşme algoritması olarak çalışırken, Levenberg-Marquardt (LM) algoritması Newton yöntemine benzer bir yaklaşım sergiler. Bu durumda, adım düşme metodunun sağlamlığı ile Newton metodunun hızı bir araya gelerek LM algoritmasını oluşturur(Erdemci, 2023).

x parametresine göre minimize edilmesi gereken $E(x)$ fonksiyonuna sahip olduğumuzu kabul edelim. Bu durumda Δx , Newton yöntemine göre denklem 3.20'deki gibi olacaktır.

$$\Delta x = (\Delta^2 E(x))^{-1} \Delta E(x) \quad (3.20)$$

Burada Hessian matrisi $\Delta^2 E(x)$ kısmıdır ve $\Delta E(x)$ ise β eğim sabiti, Σ net girişi belirleyen toplama fonksiyonu olur ve e_i 'in (tahmin edilen değerler) karelerin toplamının fonksiyonu $E(x)$ olduğundan;

$$E(x) = \sum_{i=1}^N e_i^2(x) \quad (3.21)$$

Şeklinde ifade edilebilir. $\Delta E(x)$ ve $\Delta^2 E(x)$ ait formül denklem 3.22 ve 3.23'te gibi gösterilebilir.

$$\Delta E(x) = J^T(x) \cdot e(x) \quad (3.22)$$

$$\Delta^2 E(x) = J^T(x) \cdot J(x) + S(x) \quad (3.23)$$

burada $J(x)$ Jacobian matrisi olarak bilinir ve denklem 3.24'deki gibi gösterilir.

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$S(x) \text{ ise } S(x) = \sum_{i=1}^N e_i(x) \nabla^2 e_i(x) \quad (3.25)$$

olarak ifade edilir. Daha sonrasında, Gauss-Newton metodu için $S(x)$ (denklem 3.25) yaklaşık olarak kabul edilir) ve Δx denklem 3.26'de verilen biçimde gösterilir.

$$\Delta x = (J^T(x).J(x))^{-1} . J^T(x).e(x) \quad (3.26)$$

Gauss-Newton ifadesi, LM denkleminin değişime uğramış haliyle denklem 3.27'de verilmiştir.

$$\Delta x = (J^T(x).J(x) + \mu I)^{-1} . J^T(x).e(x) \quad (3.27)$$

μ parametresi, bir adım $E(x)$ artırılarak β ile çarpılır. $E(x)$ bir adım azaltışında, μ (momentum) parametresi β 'ya bölünür. Küçük bir μ parametresi nedeniyle algoritmada Gauss-Newton yaklaşımı oluşturulurken, μ büyük değerde olduğunda ise algoritma içerisinde adım düşümü ($1/\mu$ basamak ile) olur. Adım Jacobian matrisinin hesaplanması, bu algoritmadaki kritik anahtardır. Sonuç olarak LM algoritması, çok fazla bellek getirmesi bir dezavantajdır ve yanında çok hızlı olarak çözüme ulaşmayı sağlar. Geri yayılım algoritması daha az bellek gerektirmesi avantaj iken sonuca yavaş ulaşması bir dezavantajdır(Erdemci, 2023).

Nöron sayısı azaltılmış bir sinir ağının eğitimi sırasında, en iyi eğitim algoritmalarının bile zorluklarla karşılaştığı bilinmektedir. LM algoritmasına ilişkin bazı fonksiyonel tanımlamalar Tablo 3.1'te verilmiştir.

Tablo 3.1 Eğitim algoritmalarındaki fonksiyonel detaylar (Erdemci, 2023)

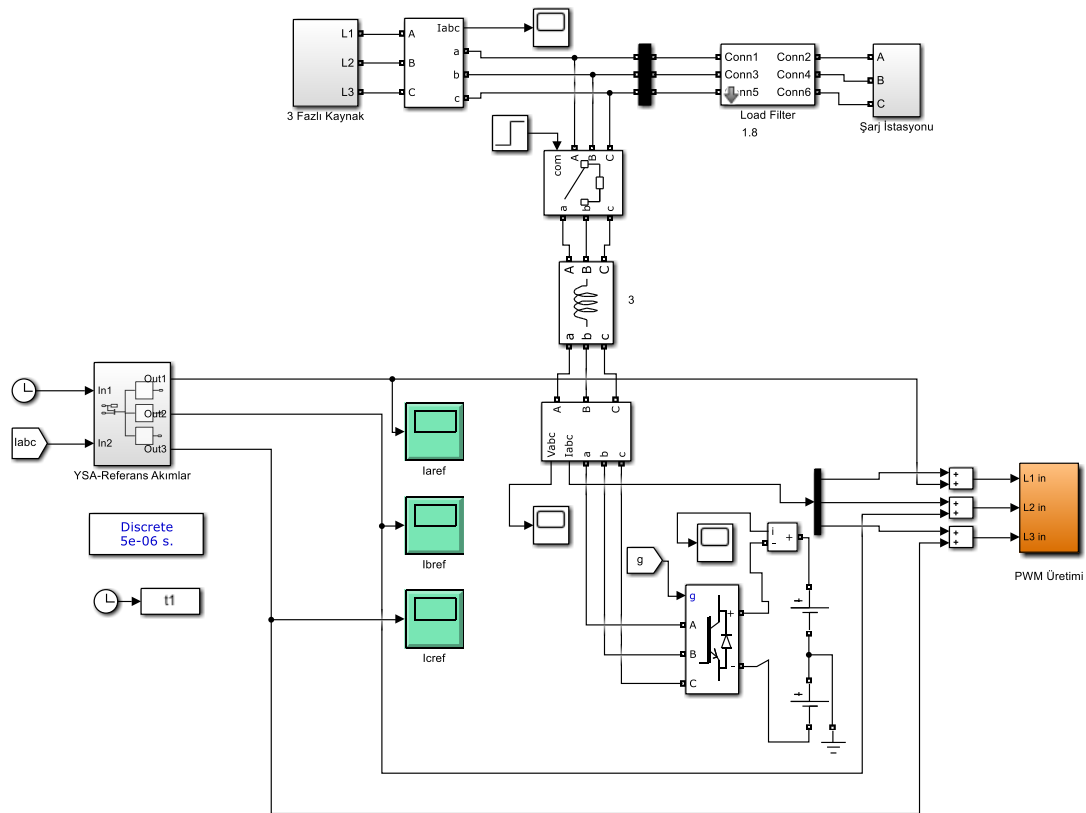
Fonksiyon	Açıklama
traincgb	Traincgp, hızlı sonuçlar elde etme açısından etkili bir yöntem sunmakta olup, işlem ve bellek kapasitesi açısından eğitim yönteminin gerisinde yer almaktadır. Bu geliştirme, gradyan tabanlı bir yöntem olarak Powell-Beale tarafından geliştirilmiştir.
trainscg	Eğitim algoritması biçiminde kullanılan bir CG algoritmasıdır.

traincgp	Problemin çözümüne yönelik hızlı sonuçlar sağlarken, işlem ve hafıza değişimleri bakımından traincgfnin açılmasından daha düşük performans göstermektedir. Bu, CG yöntemleri çerçevesinde Polak-Ribiere yaklaşımıyla sunulmaktadır.
trainbfg	BFGS Quasi-Newton yöntemi, çözüm süreci daha kısa adımlarla başarıya ulaşan bir yöntem olarak, genellikle daha hızlı ve verimli bir değişim süreci sağlar.
traincgf	Eşlenik Gradyan (CG) güncellemeleri, standart açılışlara kıyasla daha az işlemle kalıcı olarak ulaşılmasını sağlar ve Fletcher-Reeves yöntemini kullanarak çözüm sürecini optimize eder.



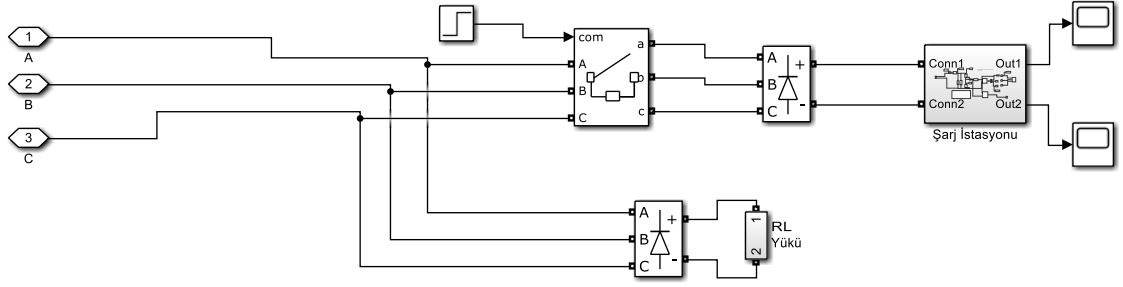
4.2. YSA Kontrollü Paralel Aktif Filtre Sistemi

Şekil 4.2'de gösterildiği gibi YSA kontrollü PAGF'den oluşan sistemin yapısı, üç fazlı şebekeye bağlı bir invertör, akü şarj cihazı gibi doğrusal olmayan yükler ve her faz için bir YSA kontrol bloğu içerir. YSA bileşenleri, mevcut koşullara dayalı olarak gerçek zamanlı referans akımları oluşturmak için önceden toplanmış veriler kullanılarak eğitilir. Bu referans akımları invertörün anahtarlanmasını yönlendirir ve şebekeye eşit genlikte ve zıt fazda akımlar sağlayarak harmonik içermeyen sinüzoidal akımlar enjekte etmesini sağlar.



Şekil 4.2 YSA kontrollü PAGF'nin benzetim modeli

Harmonikleri üretmek için Şekil 4.3' te görüldüğü gibi R-L yükünü besleyen 6 darbeli köprü diyot doğrultucu kullanılmıştır. Böylece doğrusal olmayan yükler elde edilmiştir. Birinci R-L yükü olup 15 ohm ve 25 mH değerindedir. Birinci yük ve ikinci yük (şarj istasyonu) hemen devreye girmekte iken PAGF 0.1'inci saniyede devreye girmektedir.

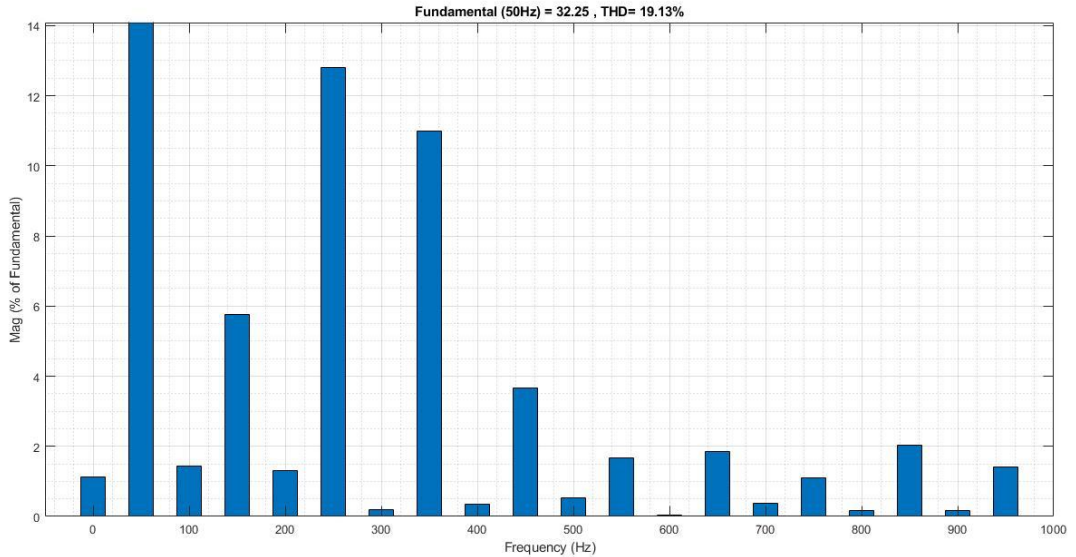


Şekil 4.3. Diyot doğrultuculu R-L yükü ve şarj istasyonu Matlab/Simulink benzetim modeli

YSA ağını eğitmek için 6000 adet harmonikli üç fazlı akım, gerilim verileri ve zaman verisi kullanılarak referans akım değerleri tahmin edilmiştir. Verilerin %70 ağı eğitmek için %30 ise test etmek için kullanılmıştır. Modellenen ağı eğitilmesinde bir tür geri yayılım algoritması olan Levenberg-Marquardt algoritması tercih edilmiştir. Ağ basit bir yapıda olup giriş katmanı, 10 nöronlu gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır.

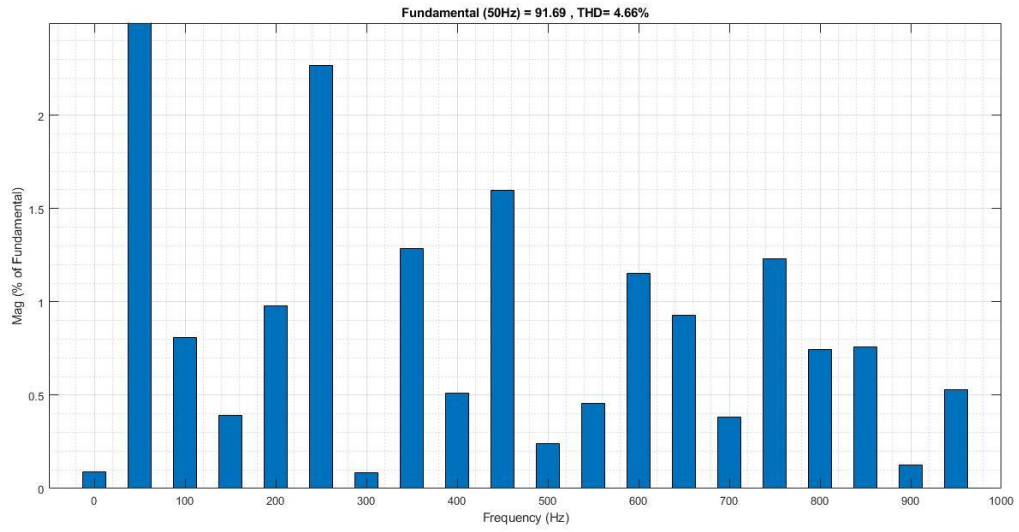
4.2.1. YSA kontrollü paralel aktif filtre sisteminin benzetimi

Şekil 4.1 'te verilen EA batarya şarj devresi Matlab/Simulinkte modellenmiş ve PAGF'sinin EA batarya şarj sistemine entegre edilmeden önceki THB değeri %19.13 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.4'te ilgili THB değerine ait grafik verilmiştir.



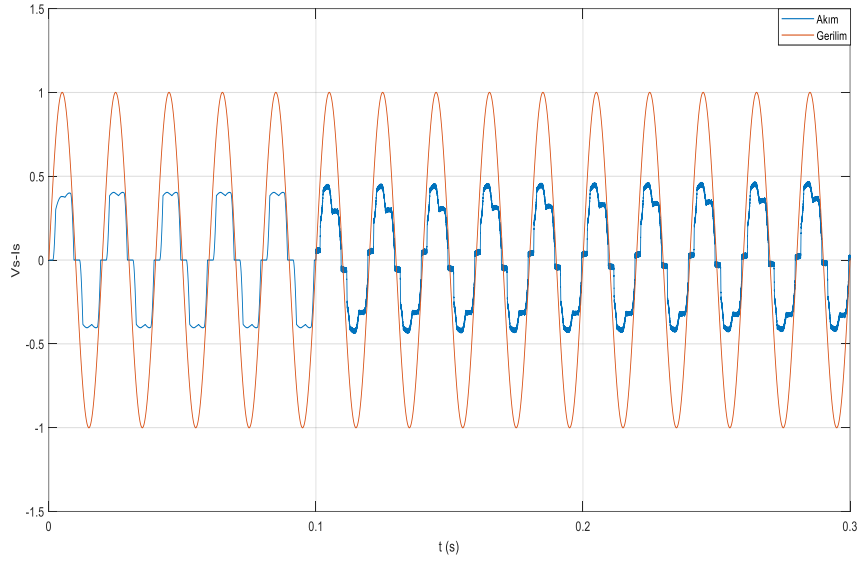
Şekil 4.4 PAGF Sisteme entegre edilmeden önce THB değeri

YSA kontrollü PAGF'sinin batarya şarj sistemine dâhil edilmesi ile birlikte THB değerinde belirgin bir şekilde düşüş sağlanmıştır. Şekil 4.5'te YSA kontrollü PAGF'nin sisteme dâhil edilmesi sonucu elde edilen THB grafiği verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere THB değer %4.66 değerine inmiştir. IEEE ve IEC gibi uluslararası kuruluşların harmonikler için belirlemiş olduğu standartlarda, akım için THB sınır değeri % 5 olarak belirtilmiştir (Orucu, 2020). YSA kontrollü filtre THB değerini bu sınır değerinin altına indirerek başarılı bir sonuç ortaya koymuştur.



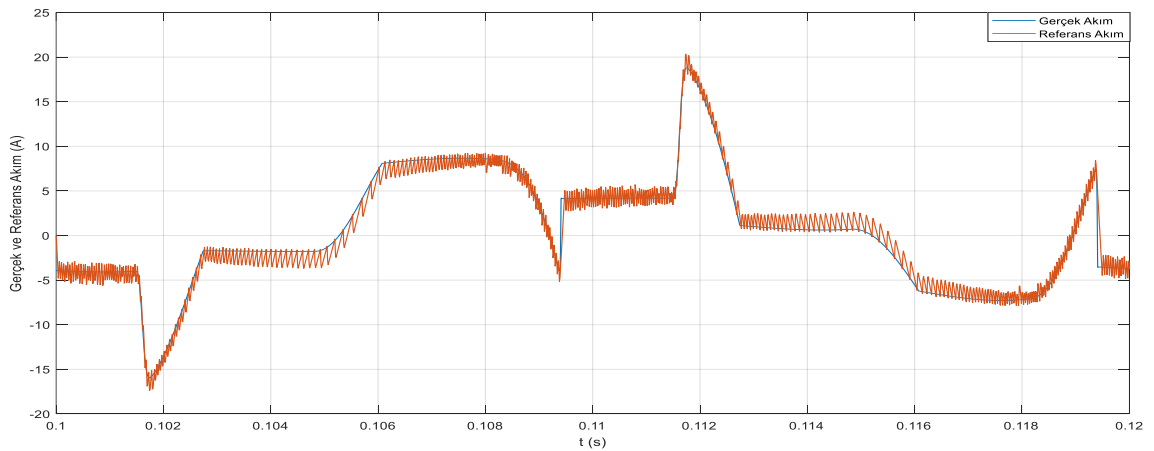
Şekil 4.5 YSA kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde THB değeri

Şekil 4.6'da, YSA kontrollü PAGF'nin sisteme dâhil edilmesinin kaynak akımı ve gerilim dalga formlarına etkisi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, PAGF'nin devrede olmadığı yani 0.1 saniye öncesinde, kaynak akımında belirgin harmonik bozulmaların mevcut olduğu açıkça görülmektedir. Ancak, 0.1 saniyeden itibaren PAGF'nin devreye alınmasıyla birlikte, kaynak akımındaki harmonik bozulmaların belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Bu iyileşme, PAGF'nin aktif harmonik filtreleme özelliğinin etkin bir şekilde çalıştığını ve sistemdeki harmonik içeriğin başarılı bir şekilde azaltıldığını ortaya koymaktadır. Yükler doğrusal olmadığı için sadece akımda bozulmalar olduğu görülmekte ve kaynak geriliminde harmonik bozulmalar gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.6 YSA kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde kaynak akımı ve gerilimi

Şekil 4.7'de, YSA kontrollü PAGF devresinde yer alan gerçek akım ile referans akıma ilişkin grafik sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, referans akım sinyalinin, 0.1 saniye itibarıyla devredeki gerçek akımı başarılı bir şekilde takip ettiği açıkça görülmektedir. Bu durum, PAGF'nin kontrol mekanizmasının etkinliğini ortaya koymakta olup, gerçek akım ile referans akım arasındaki uyumun sağlanabildiğini göstermektedir. Ayrıca, sistemin dinamik tepki süresi açısından değerlendirildiğinde, PAGF'nin 0.1 saniyeden sonra hızlı ve kararlı bir şekilde referans akıma uyum sağladığı gözlemlenmektedir.

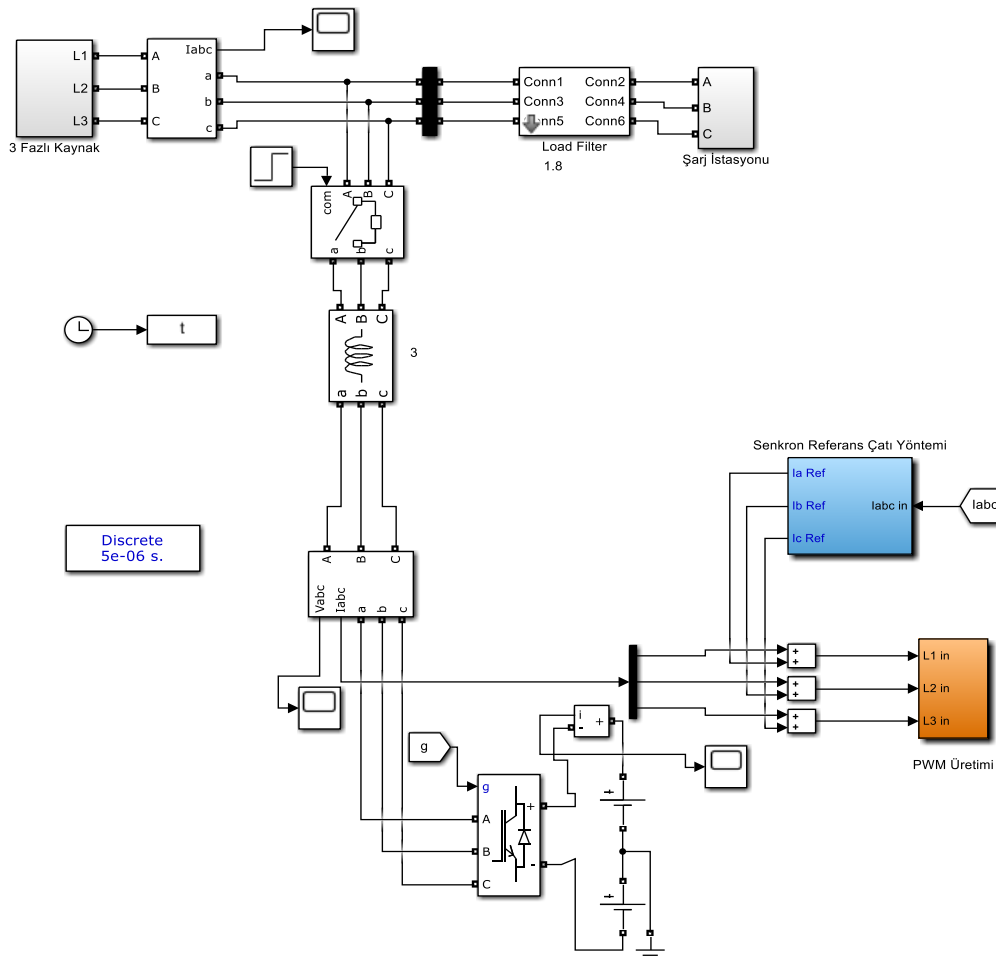


Şekil 4.7 YSA kontrollü PAGF sisteminde gerçek akım ve referans akıma ait dalga formu

4.3. SRÇY Kontrollü Paralel Aktif Filtre Sistemi

Senkron referans çatı kontrollü PAGF sistemi Şekil 4.8’da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere sistem, üç fazlı gerilim kaynağı, batarya şarj sistemi, gerilim kaynaklı evirici, bağlantı endüktansları ve kontrol bloklarından oluşmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin karakteristiklerinin sonucu olarak şebekeden çektikleri akımın dalga şeklinin de saf sinüzoidal yapıda olmadığı bilinmektedir.

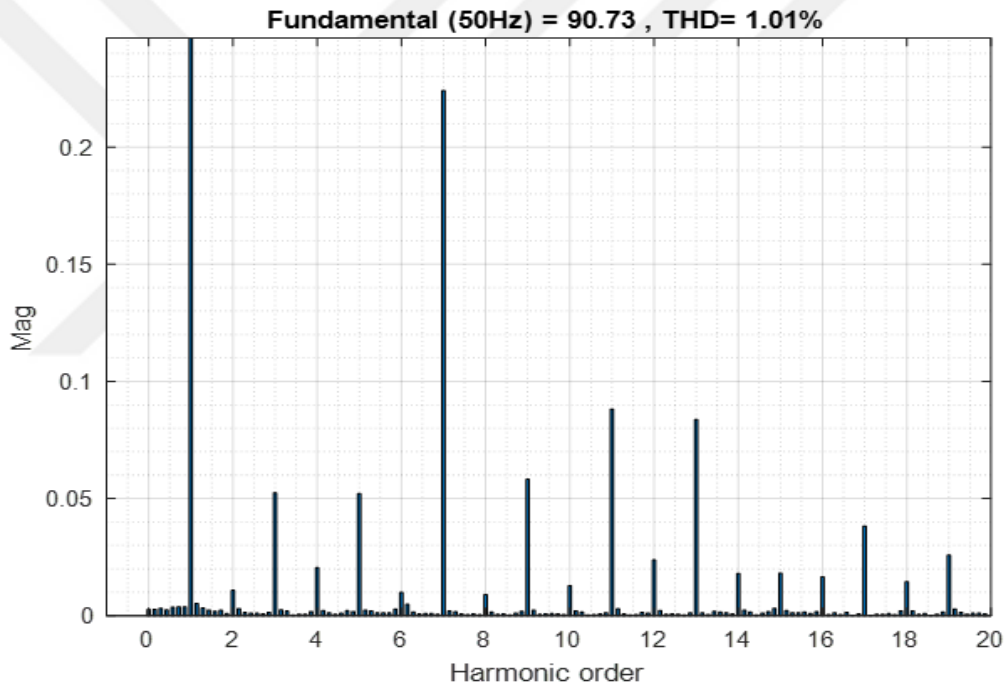
Üç-faza ait akımlar Park dönüşümü yardımı ile DA değerlere (d-q eksen bileşenlerine) dönüştürülür. Bu şekilde elde edilen d-q bileşenlerinden referans işaretlerin oluşturulması için yüksek geçiren filtre vasıtasıyla ana harmonik bileşen ayrıştırılarak geriye harmonikli akımlara ait bileşenler kalır. Filtre çıkışlarından elde edilen d-q-eksen bileşenleri üç-fazlı büyüklüklere Ters Park ve Clarke dönüşümleri yardımıyla dönüştürülerek referans akımlar elde edilir.



Şekil 4.8 SRÇY kontrollü PAGF sistemi

4.3.1. SRÇY kontrollü paralel aktif filtre sisteminin benzetimi

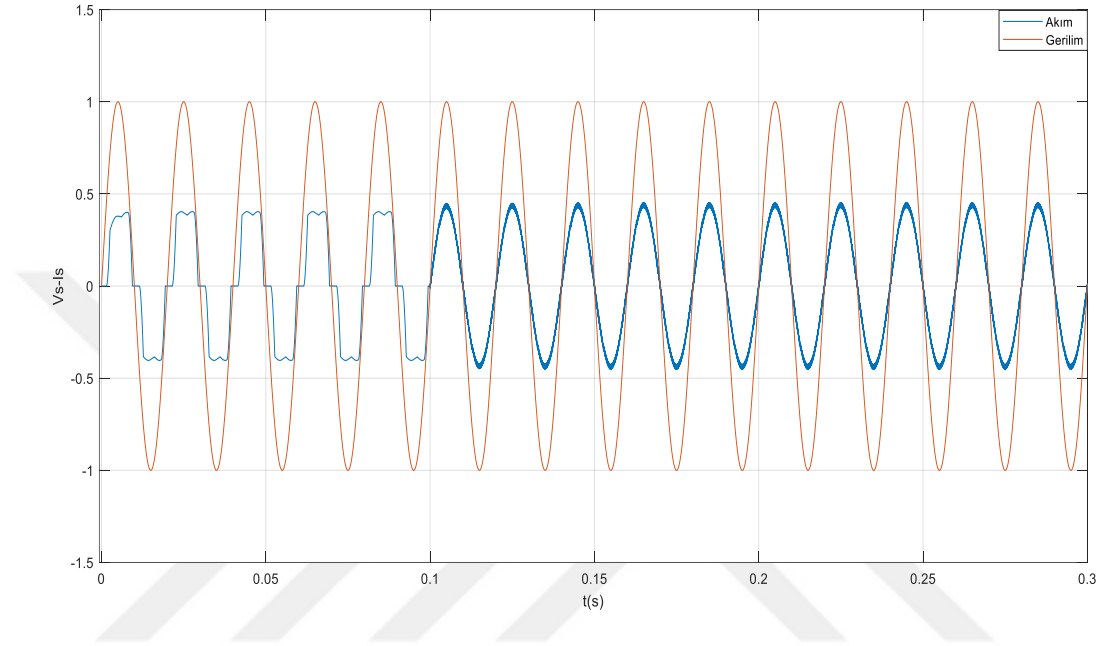
Şekil 4.2 'de verilen EA batarya şarj devresi Matlab/Simulinkte modellenmiş olup, PAGF elektrikli araç batarya şarj sistemine entegre edilmeden önceki THB değeri %19.13 olarak ölçülmüştü. SRÇY kontrollü PAGF'si batarya şarj sistemine dâhil edilmesi ile birlikte THB değeri kayda değer bir düşüş göstermiştir. Şekil 4.9'da senkron referans çatı kontrollü PAGF sisteme dahil edilmesi sonucu elde edilen THB grafiği verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere THB değeri %1.01 değerine inmiştir. Dolayısıyla SRÇY tabanlı PAGF, uluslararası kuruluşların belirtmiş olduğu THB sınır değerinin altında ve başarılı bir performans göstermiştir.



Şekil 4.9 SRÇY kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde THB değeri

Şekil 4.10'da, SRÇY kontrollü PAGF'nin sisteme dahil edilmesinin, kaynak akımı ve gerilim dalga formlarına etkisi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, PAGF'nin devrede olmadığı, yani 0.1 saniye öncesinde, kaynak akımı dalga formunda belirgin harmonik bozulmaların mevcut olduğu açıkça görülmektedir. Ancak, 0.1 saniye itibarıyla PAGF'nin devreye alınmasıyla birlikte, kaynak akımındaki harmonik bozulmaların belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Bu azalma, SRÇY kontrollü PAGF'nin harmonikleri azaltma etkinliğini ve filtreleme kapasitesini

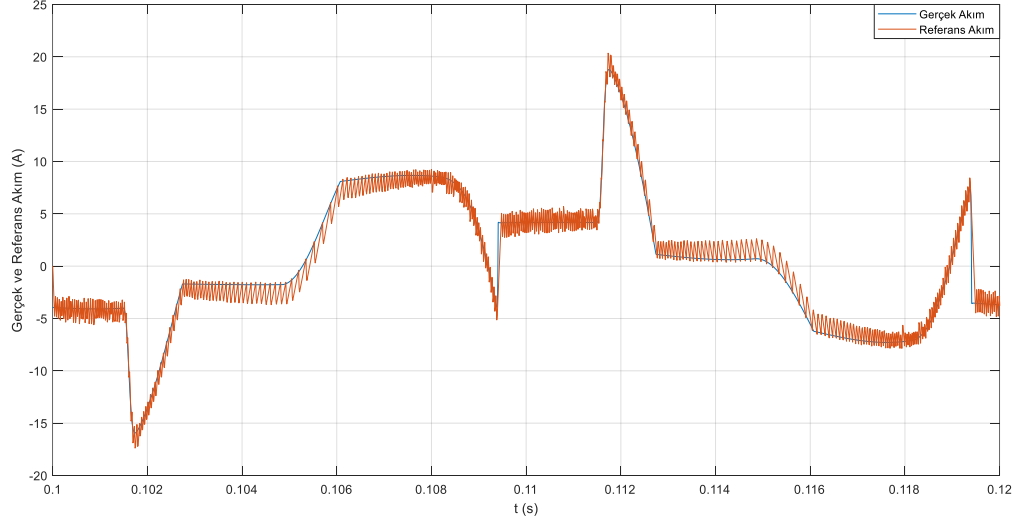
doğrulamaktadır. Ayrıca, bu iyileşmenin derecesi, Şekil 4.7’de verilen YSA kontrollü PAGF devresinin elde ettiği verilere kıyasla daha yüksek bir harmonik düzeltme sağlandığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, SRÇY kontrollü PAGF’nin, harmonik azaltımı açısından YSA kontrollü PAGF’ye göre daha başarılı bir performans sergileyebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.10 SRÇY Kontrollü PAGF sisteme entegre edildiğinde kaynak akımı ve gerilimine ait dalga formu

Şekil 4.11’de, SRÇY kontrollü PAGF devresinde yer alan gerçek akım ve referans akıma ilişkin grafik sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, 0.1 saniye itibarıyla referans akım sinyalinin devredeki gerçek akımı yüksek bir doğrulukla takip ettiği tespit edilmiştir. Bu durum, SRÇY kontrollü PAGF’nin akım referans sinyalini üretme ve gerçek akımı belirlenen referans değerine yönlendirme konusunda başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Referans akım takibinin doğruluğu, sistemin etkin bir şekilde çalıştığını ve harmonik filtreleme konusunda yüksek bir hassasiyetle çalıştığını göstermektedir.

Bunun yanı sıra, Şekil 4.7’de sunulan YSA kontrollü PAGF devresine ait grafikler benzer bir yapı sergilendiği gözlemlenmiştir. Her iki kontrol yöntemi de referans akımın takip edilmesi açısından başarılı bir performans ortaya koymuştur.



Şekil 4.11 SRÇY kontrollü PAGF sisteminde gerçek akım ve referans akım ait dalga formu

Tablo 4.1’de, tez çalışması süresince yapılan benzetim çalışmalarında THB değerlerine ait özet tablo verilmiştir. Tabloda, SRÇY ve YSA kontrollü PAGF yöntemlerinin THB üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. SRÇY kontrollü PAGF için, Yük 1 ve Yük 2 birlikte çalıştığında ise, PAGF’siz durumda %THB 19,13 olarak ölçülmüş, PAGF devreye alındığında bu değer 1,01 seviyesine gerilemiştir.

YSA kontrollü PAGF’de ise Yük 1 ve Yük 2 birlikte çalıştığında, PAGF’siz durumda 19,13 olan %THB, PAGF devreye girdiğinde 4,66 olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.1. THB sonuçlarına ait özet tablo

Yöntem	Yük Durumu	Kaynak Akımının %THB’si	
		PAGF Yok	PAGF Devrede
SRÇY	Yük1 ve Yük2	19.13	1,01
YSA	Yük1 ve Yük2	19.13	4.66

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Karbon temelli yakıt araçları, ekosistemi olumsuz etkileyen bir dizi diğer zararlı madde ile birlikte CO₂ kaynaklı sera gazlarının emisyonuna katkıda bulunan baskın bir kaynak olarak kabul edildiğinden, özellikle çevre kirliliği sorunu ile ilgili tehlikeli riskler ve çok yönlü sorunlara neden olmaktadır. Özellikle sanayi bağlamında gelişmiş ülkelerde hava kirliliği çoğu zaman izin verilen limitleri aşmakta ve insan sağlığını ciddi şekilde tehdit etmektedir. AB ülkeleri tüm bu nedenlerle CO₂ emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. EA'lar, CO₂ emisyonunu azaltmak için iyi bir fırsat olarak görülmektedir. Ancak güç sistemleri EA'ların artmasına paralel olarak enerji arz sorunu ve güç şebekelerinde çeşitli güç kalitesi sorunlarına neden olmaktadır. Kalite problemlerinin önemli bir kısmını harmonikler oluşturmakta olup, bu harmoniklerin azaltılması için çeşitli filtreler geliştirilmiştir. Bu filtreler en genel hatlarıyla PF ve AGF'dir. PF'lerin çeşitli dezavantajlarından dolayı AGF ön plana çıkmaktadır. Aktif filtrelerde en önemli kısım referans akım çıkarım yöntemleridir. Bu çalışma kapsamında şarj sisteminin yapısında bulunan doğrusal olmayan elemanların neden olduğu harmoniklerin azaltılması için aktif filtre sistemleri önerilmektedir. Tez çalışması kapsamında YSA ve SRÇY modelleri kullanılmıştır.

Tez çalışmasında yapılan benzetim sonuçlarından hareketle; sabit akım şarj profiline sahip bir batarya şarj sisteminde THB değeri %19 seviyelerinde ölçülmüştür. Bu sisteme öncelikle YSA ile kontrol edilen PAGF entegre edilerek sistemdeki toplam THB %4.66 seviyesine başarılı bir şekilde düşürülmüştür. Ardından PAGF referans akım kontrol yöntemi değiştirilerek SRÇY ile kontrol edilen kontrol sistemi devreye alınarak THB değeri ölçülmüş ve %1.01 olarak tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının nihai sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenebilir:

- PAGF, EA batarya şarj sistemlerinin neden olduğu harmoniklerin azaltılması için önemli ve başarılı bir yöntemdir.
- PAGF'de referans akım çıkarım yöntemleri, sistemin performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

- SRÇY ve YSA kontrollü her iki PAGF sistemindeki THB değeri, uluslararası kuruluşların belirlemiş olduğu THB sınır değeri olan %5'in altındadır ve her iki filtrede başarılı bir performans sergilemiştir.
- SRÇY ile kontrol edilen PAGF sistemi, YSA kontrollü PAGF sistemine göre batarya şarj sistemlerinde harmonik yok etme konusunda daha başarılı bir sonuç ortaya koymuştur.

5.2 Öneriler

Tez çalışmasında kritik bir öneme sahip olan AGF'ler ve referans akım çıkarım yöntemleri ön plandadır. Referans akım çıkarım yöntemleri kullanırken, mevcut yöntemlerin yerine, derin öğrenme veya makine öğrenmesi tekniklerinin entegrasyonu, harmonik azaltma ve diğer güç kalitesi sorunlarına yönelik daha etkili ve verimli çözümler sunma potansiyeline sahip olacağı önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akçay, M. T. (2010). Dengesiz Çalışma Koşulları için Seri Aktif Güç Filtre Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Aktaş, M. Y., 2016, Rüzgâr Güç Yoğunluğunun Yapay Sinir Ağı İle Tahmini. (Yüksek Lisans Tezi). Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt
- Akmaz, D. (2012). Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması İçin Aktif Güç Filtre Tasarımları. (Yüksek Lisans Tezi), Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Tunceli.
- Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., Morant, F., & Aristizabal, A. (2018). A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 11(4), 1021..
- Battery Application & Technology (2018). https://www.engineersedge.com/battery/trickle_charging.htm.
- Battery Charging Methods (2018). http://www1.labvolt.com/publications/Exercises/86351-00_4.pdf (2018).
- Birecikli, B., Karaman, Ö. A., Çelebi, S. B., & Turgut, A. (2020). Failure load prediction of adhesively bonded GFRP composite joints using artificial neural networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 4631-4640.
- Carter, R., Cruden, A., Roscoe, A., Densley, D., & Nicklin, T. (2012, May). Impacts of harmonic distortion from charging electric vehicles on low voltage networks. In *Electric Vehicle Symposium 26*.
- Chen, C. I., Lan, C. K., Chen, Y. C., & Chen, C. H. (2019). Adaptive Frequency-Based Reference Compensation Current Control Strategy Of Shunt Active Power Filter For Unbalanced Nonlinear Loads. *Energies*, 12(16), 3080.
- Chen, G., Liu, Z., & Su, H. (2020). An optimal fast-charging strategy for lithium-ion batteries via an electrochemical–thermal model with intercalation-induced stresses and film growth. *Energies*, 13(9), 2388.
- Cho, Y., S. ve Cha, H. (2011). Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor, *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 1(1): 7-13.
- Chuang, Y.C.; Ke, Y.L.; Chuang, H.S.; Chang, S.Y. (2012). Battery float charge technique using parallel-loaded resonant converter for discontinuous conduction operation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 48, 1070–1078.
- Çöteli, R., Uçar, F., Dandil, B., & Ata, F. (2011). Paralel Aktif Güç Filtresinin Denetimi için Farklı Referans İşaret Çıkarma Yöntemlerinin İncelenmesi. In *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ (Vol. 4, pp. 461-466).

- Deng, L., & Yu, D. (2014). Deep learning: methods and applications. Foundations and trends® in signal processing, 7(3–4), 197-387..
- Doğan, H. (2016). Aktif Güç Filtreleri için FPGA Tabanlı Bir Kontrolörün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.
- Durna, E. (2018). Hysteresis Band Control of Hybrid Active Power Filter: An Application to a Medium Frequency Induction Melting Furnace. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği (2020). T.C. Resmi Gazete (31106, 21 Nisan 2020). EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu).
- El-Habrouk, M., Darwish, M., & Mehta, P. (2000). Active Power Filters: A Review. Electric Power Applications, IEEE Proceedings, 147 (5), 403-413.
- Erdemci, H. (2023). Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak 2040 Yılına Kadar Türkiye'nin Enerji Talep Tahmini. (Yüksek Lisans Tezi) Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Ertaş, Y., & Karaman, Ö. A. (2023). Yapay Sinir Ağı Kontrollü Şönt Aktif Filtre Uygulaması: Elektrikli Araç Batarya Şarj Sistemi. Uluslararası İleri Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi 7, 224-228.
- Falih, A. Z., Efendi, M. Z., & Murdianto, F. D. (2021). CC-CV Controlled Fast Charging Using Fuzzy Type-2 for Battery Lithium-Ion. JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering), 5(2).
- Gali, V., Gupta, N., & Gupta, R. (2017). Mitigation of Power Quality Problems Using Shunt Active Power Filters: A Comprehensive Review. 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) (s. 1100-1105). Siem Reap, Cambodia: IEEE.
- Gao, J. Y., Yang, Y. F., Zhang, X. K., Li, S. L., Hu, P., & Wang, J. S. (2020). A review on recent progress of thermionic cathode. Tungsten, 2, 289-300..
- Gök, Ü. (2023). Elektrik Sistemlerinde Harmonik Olayların Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Habib, S., Kamran, M., & Rashid, U. (2015). Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—a review. Journal of Power Sources, 277, 205-214..
- Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the dimensionality of data with neural networks. science, 313(5786), 504-507.
- Hua, A.C.-C.; Syue, B.Z.-W. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO₄ battery. In Proceedings of the IEEE 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), Sapporo, Japan, 21–24 June 2010; pp. 1478–1483.

- İlgin, M. (2019). Reaktif Gücün ve Harmoniklerin Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- James, M.; Grummett, J.; Rowan, M.; Newman, J. Application of pulse charging techniques to submarine lead-acid batteries. J. Power Sources 2006, 162, 878–883.
- Jamlaay, M. (2024). Three Phase Series Active Power Filter Based Adaptive Linear Neuron (ADALINE) to overcome voltage harmonics in power systems. International Journal of Science, Technology & Management.
- Jiang, D., Zhang, H., Kumar, H., Naveed, Q., Takhi, C., Jagota, V., & Jain, R. (2022). Automatic Control Model of Power Information System Access Based on Artificial Intelligence Technology. Mathematical Problems in Engineering.
- Jou, L.H., Wu, C.J. and Chang, J.Y., 2005. A Novel Active Power Filter for Harmonic Suppression, Power Delivery, IEEE Transactions on, 20, 1507–1513.
- Karaman, Ö. A. (2018). Yeni Bir Denetim Algoritmaları Paralel Aktif Güç Filtresi ile Akım Harmoniklerinin Azaltılması. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ.
- Katić, V. A., Aleksandar, M., Dumnić, B. P., & Popadić, B. P. (2019). Impact of V2G operation of electric vehicle chargers on distribution grid during voltage dips. In IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies (pp. 1-6). IEEE.
- Kingma, D. P. and Welling, M. (2013) Auto-encoding variational bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114.
- Kocabaş, İ. (2009). 10KVA Gücünde DSP Tabanlı Gerilim Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Gerçekleştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- Kocabaş, İ., Uçak, O., & Terciyanlı, A. (2006). DSP Tabanlı Gerilim Kaynaklı Şönt Aktif Güç Filtresi Uygulaması. ELECO, 6, 06-10.
- Koçak, Ç., “Doğrusal Olmayan Yükleri Besleyen Rüzgar Türbinlerinde Harmoniklerin Filtrelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 35-36 (2018).
- Kolsan, Ö. (2014). Güç Sistemlerinde Bilgisayar Destekli Harmonik Yük Akışı Uygulaması. (Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kulu M, 2020. Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim Yöntemleri ve Performans Analizleri. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuşdoğan, Ş. (2017). Akıllı Şebekelere Elektrikli Araçların Entegrasyonu Ve Taşıttan Şebekeye V2g Uygulamaları. V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, III. Güç ve Enerji Sistemleri Sempozyumu, Türkiye, 18 - 21 Ekim 2017.

- Kürker F. (2022). Lineer Olmayan Yüklerin Sebep Olduğu Harmoniklerin ve Fazlar Arası Güç Dengesizliğinin Nötr Akımına Etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3): 1456 - 1467.
- Kürker, F. (2017). Enerji Sistemlerinde Harmonik Analizi ve Harmonik Azaltma Teknikleri. (Doktora Tezi). Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kürker, F., Taşaltın, R. (2016). Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Adıyaman, 21-38.
- Kütt, L., Saarijärvi, E., Lehtonen, M. & Molder, H. & Niitsoo, J. (2013). A review of the harmonic and unbalance effects in electrical distribution networks due to EV charging. 556-561. 10.1109/EEEIC.2013.6549577.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- Lee, C.S.; Lin, H.C.; Lai, S.-Y. (2013). Development of fast large lead-acid battery charging system using multi-state strategy. *Int. J. Comput. Consum. Control*, 2, 56–65.
- Li, D., & Tian, J. (2008). A novel active power filter for the voltage-source type harmonic source. In 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems (pp. 2077-2080). IEEE.
- Li, S.; Zhang, C.; Xie, S. (2009). Research on fast charge method for lead-acid electric vehicle batteries. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Systems and Applications ISA 2009*, Wuhan, China, 23–24 May 2009; pp. 1–5.
- Linden, D.; Reddy, T.B. (2002). *Handbook of Batteries*, 3rd ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA.
- Liou, C. Y., Cheng, W. C., Liou, J. W., & Liou, D. R. (2014). Autoencoder for words. *Neurocomputing*, 139, 84-96.
- Lucas, A., Bonavitacola, F., Kotsakis, E., & Fulli, G. (2015). Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging. *Electric Power Systems Research*, 127, 13-21.
- Manias, S. N. (2016). *Power Electronics and Motor Drive Systems*. Elsevier.
- Melo, N., Mira, F., de Almeida, A., & Delgado, J. (2011). Integration of PEV in Portuguese distribution grid: Analysis of harmonic current emissions in charging points. In 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (pp. 1-6). IEEE..
- Mikolov, T., Karafiát, M., Burget, L., Cernocký, J., & Khudanpur, S. (2010). Recurrent neural network based language model. In *Interspeech* (Vol. 2, No. 3, pp. 1045-1048).
- Muslimin, S., Maulidda, R., Nawawi, M., Rahman, A., & Kurnia, P. M. (2023). The Method of Constant Current-Constant Voltage (CC–CV) for SECA Electric Car

- Battery Charging with Fuzzy Logic Controller. In 6th FIRST 2022 International Conference (FIRST-ESCSI-22) (pp. 14-23). Atlantis Press.
- Naik, N., Madhu, G. M., & Vyjayanthi, C. (2021). Research on Electric Vehicle Charging System: Key Technologies, Communication Techniques, Control Strategies and Standards. In 2021 IEEE 2nd International Conference On Electrical Power and Energy Systems (ICEPES) (pp. 1-6). IEEE.
- Nasser, K. (2017). Negative Pulse Charging: Myths and Facts. http://www.batterypoweronline.com/images/PDFs_articles_whitepaper_appros/powerdesigners.pdf.
- Orucu, E. (2020). Endüstriyel Tesislerde Aktif Harmonik Filtre Uygulaması İle Elektrik Güç Kalitesinin Düzenlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özcan, M. E., & Oral, B. (2018). Elektrikli Araçların Elektrik Dağıtım Şebekesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. In International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018).
- Özel, F. (2022). Güç Sistemlerinde Harmonik Kaynak Tespiti İçin Kullanılan Yöntemlerin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özer, P. Ö. (2023). Adaptif Harmonik Enjeksiyonu Yöntemiyle Seri Aktif Güç Filtresinin Benzetimi. (Yüksek Lisans Tezi). Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Rüstemli, S., Cengiz, M. S., & Dinçer, F. (2013). Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), 30-38.
- Sadeq, J. M. (2014). Comparative Study of Passive, Series and Shunt Active Filter with Hybrid Filters on Nonlinear Loads. Yüksek Lisans Tezi, Near East University Graduate School of Applied Science. Nicosia.
- Salakhutdinov, R., & Hinton, G. (2009). Deep boltzmann machines. In Artificial intelligence and statistics (pp. 448-455). PMLR.
- Selvabharathi, D., Saha, M., Haldar, R., Palanisamy, R., & Karthikeyan, D. (2020). Inspection of power quality issues in electric vehicles and its mitigation. International Journal of Electrical Engineering and Technology, 11(3).
- Sandeep, A. (2014). Study of Hybrid Active Power Filter for Power Quality Improvement. Yüksek Lisans Tezi, National Institute of Technology Rourkela. Rourkela-India.
- Satish, G., K, R., B, D., K., J., Chaudhary, S., & Singh, N. (2023). Non-Linear Controller Based 3- ϕ Shunt Active Filter for Improvement of Power Quality in Non-Linear Load. 2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS), 1-4.

- Serhan, H. A., & Ahmed, E. M. (2018). Effect of the different charging techniques on battery life-time. In 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE) (pp. 421-426). IEEE.
- Sezer, M. (2006). Üç Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Filtre. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Singh, B., Verma, V. Chandra, A. and Al-Haddad, K. (2005). Hybrid filters for power quality improvement, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-152, 365–378.
- Sucu, Ö. (2003). Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- Suryoatmojo, H. (2020, July). Design Li-Po battery charger with buck converter under partially CC-CV method. In 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) (pp. 101-106). IEEE..
- Şahin, M., Oğuz, Y., Tuğcu H., Z. (2014). Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi”, Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Erzincan, 212.
- Şeker, A., Diri, B., & Balık, H. H. (2017). Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(3), 47-64.
- Şerbetçi, M. B. (2019). Harmonik Problemi Olan Tesislerde Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Tedeschi, E. (2009). Cooperative Control of Distributed Compensation Systems in Electric Networks Under Non-Sinusoidal Operations. Doktora Tezi, Università Degli Studi Di Padova. Padova.
- Tekev, S. (2021). Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin ve Araharmiklerin Bilgisayar Destekli Modellemesi ve Simülasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Uzan, O. (2013). Alçak Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Güç Kalitesi. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yin, Y. (2024). Immunity of Shunt Active Power Filter Based on Improved LADRC. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 46, 326 – 333
- Monteiro, V., Pinto, J. G., Fernandes, J. C. A., & Afonso, J. L. (2017). Experimental Comparison of Single-Phase Active Rectifiers for EV Battery Chargers. In VEHITS (pp. 419-425).
- Motta, L., & Faundes, N. (2016). Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends. 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 657-662

- Benchouia, M. T., Ghadbane, I., Golea, A., Srairi, K., & Benbouzid, M. E. H. (2015). Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter. *Applied soft computing*, 28, 125-131.
- Özdemir, Ş., & Kuşdoğan, Ş. (2005). Doğrusal olmayan yüklerde aktif güç filtresi ile harmoniklerin filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2).
- Han, B. M., Bae, B. Y., & Ovaska, S. J. (2005). Reference signal generator for active power filters using improved adaptive predictive filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(2), 576-584.
- Chauhan, S., Shah, M., Tiwari, R., & Tekwani, P. (2014). Analysis, design and digital implementation of a shunt active power filter with different schemes of reference current generation. *Iet Power Electronics*, 7, 627-639.
- Rahmani, S., Mendalek, N., & Al-Haddad, K. (2010). Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 3364-3375.
- Iqbal, M., Jawad, M., Jaffery, M., Akhtar, S., Rafiq, M., Qureshi, M., Ansari, A., & Nawaz, R. (2021). Neural Networks Based Shunt Hybrid Active Power Filter for Harmonic Elimination. *IEEE Access*, 9, 69913-69925.
- Wang, T., & Fei, J. (2016). Adaptive neural control of active power filter using fuzzy sliding mode controller. *IEEE Access*, 4, 6816-6822.
- Yarıkkaya, S. (2023). Voltaj Kaynaklı İnverterler İçin Yapay Sinir Ağları Tabanlı Öngörülü Akım Kontrolcü Tasarımı Ve Uygulanması [Yayımlanmamış doktora tezi]. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yuvaraj, T., Devabalaji, K. R., Kumar, J. A., Thanikanti, S. B., & Nwulu, N. I. (2024). A comprehensive review and analysis of the allocation of electric vehicle charging stations in distribution networks. *IEEE Access*, 12, 5404-5461.