T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ADAPTİF HARMONİK ENJEKSİYONU YÖNTEMİYLE SERİ AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN BENZETİMİ

PINAR ÖZGE ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ FARUK ERKEN

NİSAN - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Pınar Özge ÖZER tarafından hazırlanan "**Adaptif Harmonik Enjeksiyonu Yöntemiyle Seri Aktif Güç Filtresinin Benzetimi**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **10.04.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Faruk ERKEN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Erdal ŞEHİRLİ Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Ömer Ali KARAMAN Batman Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V. Doç. Dr. Osman ÇİÇEK .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Pınar Özge ÖZER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADAPTİF HARMONİK ENJEKSİYONU YÖNTEMİYLE SERİ AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN BENZETİMİ

PINAR ÖZGE ÖZER

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ FARUK ERKEN

Yarı-iletken teknolojisi son yüzyılda hızla gelişerek güç elektroniği elemanlarının sahada daha sık kullanımının önünü açmıştır. Ancak bu elemanların yüksek frekanslarda anahtarlama yapıyor olması ve doğrusal olmayan yük karakteristiklerinden dolayı güç sistemlerinde güç kalitesi problemi ortaya çıkmıştır. Güç elektroniği elemanlarını bünyesinde bulunduran ve elektrik sistemlerinde kendine sıklıkla kullanım alanı bulan bu cihazlar sistem üzerinde bazı bozucu etkilere sahiptirler. Bu etkilerden en önemlileri harmonik oluşumu ve sistemden reaktif güç çekilmesidir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için pasif filtre kullanımı geleneksel bir yaklaşım olmakla beraber; değişen yük koşullarına ayak uyduramaması, sabit kompanzasyon için uygun olması ve en önemlisi şebeke veya yük ile rezonansa girmesi gibi dezavantajları nedeniyle son zamanlarda aktif güç filtreleri harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu amacıyla daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu tez çalışmasında, kaynak tarafında yaşanan gerilim düşmesi ve yükselmesi gibi problemlerden dolayı meydana gelen harmoniklerin ve elektriğin üretimi sırasında kaynakta oluşabilecek harmonik bileşenlerin yük gerilimde herhangi bir değişikliğe sebep olmadan giderilmesi için bir kontrol algoritması önerilmiştir. Bu algoritma Normalleştirilmiş En Küçük Kareler (NEKK) yöntemine dayalı Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) algoritmasıdır. Algoritma zaman alanında uygulanabilen uyarlanabilir bir referans işaret oluşturma algoritmasıdır. Algoritmanın uygulandığı devre topolojisi Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) kullanılarak oluşturulan 3 fazlı-3 telli Seri Aktif Güç Filtresi yapısıdır. Burada amaç, AHE algoritması ile elde edilen tahmini referans işaretlerinin GKE'yi anahtarlaması ve sisteme basılacak harmoniğin doğru tespit edilmesini sağlamaktır. GKE girişindeki anahtarlama işaretlerinin elde edilmesinde Uzay Vektör DGM (UVDGM) kullanılmış ve sistemin benzetimi Matlab2021a/Simulink ara yüzü kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre THB (Toplam Harmonik Bozulma) değerlerinin kabul edilebilir sınırlarda olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar göstermektedir ki önerilen AHE algoritması, gerilim harmoniklerinin giderilmesi konusunda oldukça başarılı bir yöntemdir.

ANAHTAR KELİMELER: Seri aktif güç filtresi, gerilim düşmesi ve yükselmesi, güç kalitesi, adaptif harmonik enjeksiyonu

Nisan 2023, 75 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

SIMULATION OF SERIES ACTIVE POWER FILTER WITH ADAPTIVE HARMONIC INJECTION METHOD

PINAR ÖZGE ÖZER

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIT. PROF. DR. FARUK ERKEN

Semiconductor technology has developed rapidly in the last century, paving the way for more frequent use of power electronics elements in the field. However, due to the high frequency switching and non-linear load characteristics of these elements, power quality problems have arisen in power systems. These devices, which contain power electronics elements and are frequently used in electrical systems, have some disruptive effects on the system. The most important of these effects are harmonic generation and reactive power draw from the system. Although the use of passive filters is a traditional approach to overcome these problems; recently, active power filters have been used more frequently for harmonic filtering and reactive power compensation due to their disadvantages such as not being able to keep up with changing load conditions, being suitable for fixed compensation and most importantly resonating with the mains or load. In this thesis, a control algorithm has been proposed for the elimination of harmonics caused by problems such as voltage sag and swell on the source side and harmonic components that may occur in the source during the generation of electricity without causing any change in the load voltage. This algorithm is an Adaptive Harmonic Injection (AHI) algorithm based on the Normalized Least Squares (NLS) method. The algorithm is an adaptive reference mark generation algorithm that can be implemented in the time domain. The circuit topology in which the algorithm is applied is a 3-phase, 3-wire Series Active Power Filter structure created using a Voltage Source Inverter (VSI). The aim here is to switch the VSI of the estimated reference signals obtained by the AHI algorithm and to ensure that the harmonic to be printed on the system is detected correctly. Space Vector PWM (SVPWM) is used to obtain the switching signals at the VSI input and the system is simulated using the Matlab2021a/Simulink interface. According to the results obtained, it is evaluated whether the THD (Total Harmonic Distortion) values are within acceptable limits. The results obtained from this study show that the proposed AHI algorithm is a very successful method in eliminating voltage harmonics.

KEYWORDS: Series active power filter, voltage sag and swell, power quality, adaptive harmonic injection

April 2023, 75 Page

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında bana yol gösteren, değerli bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen ve her konuda desteğini almaktan çekinmediğim değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Faruk ERKEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu zorlu süreçte hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve her zaman desteğini yanımda hissettiğim canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.

PINAR ÖZGE ÖZER

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Genel Bilgiler 1
1.2 Literatür İncelemesi 4
1.3 Tezin Amacı 9
1.4 Tezin İçeriği 10
2. HARMONİK TANIMI, KAYNAKLARI VE ETKİLERİ **12**
2.1 Harmonik Tanımı ve Standartları 12
2.2 Harmonik Kaynakları 16
2.2.1 Transformatörler 17
2.2.2 Statik Dönüştürücüler 18
2.2.3 Generatörler 18
2.2.4 Ark Fırınları 19
2.2.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma 19
2.2.6 Statik VAR Kompanzatörler 19
2.2.7 Fotovoltaik Sistemler 20
2.2.8 Kesintisiz Güç Kaynakları 20
2.2.9 Doğru Akımla Enerji İletimi 20
2.2.10 Motor Sürücüler 20
2.3 Harmonik Etkileri 21
3. HARMONİKLERİ ÖNLEME YÖNTEMLERİ **23**
3.1 Giriş 23
3.2 Filtrelerin Sınıflandırılması 23
3.2.1 Pasif Filtreler 24
3.2.1.1 Alçak geçiren filtre 25
3.2.1.2 Yüksek geçiren filtre 25
3.2.2 Aktif Güç Filtreleri 27
3.2.2.1 Topolojik yapılarına göre aktif güç filtreleri 29
3.2.2.1.1 Seri aktif güç filtresi 29
3.2.2.1.2 Paralel aktif güç filtresi 30
3.2.2.1.3 Birleşik güç kalite düzenleyici 31
3.2.2.2 Evirici yapısına göre aktif güç filtreleri 32
3.2.2.2.1 Akım kaynaklı evirici 32
3.2.2.2.2 Gerilim kaynaklı evirici 33
3.2.2.3 Faz sayısına göre aktif güç filtreleri 33
3.2.3 Karma (Hibrit) Filtreler 35

3.2.3.1 PAGF+PPF 35
3.2.3.2 SAGF+PPF 35
3.2.3.3 Paralel pasif filtre ile seri bağlı AGF 36
4. REFERANS İŞARET TAHMİN YÖNTEMLERİ 38
4.1 Frekans Domeni Teknikleri 39
4.2 Zaman Domeni Teknikleri 39
4.2.1 Anlık Reaktif Güç Teoremi 40
4.2.2 Senkron Referans Çerçeve Yöntemi 43
5. ADAPTİF HARMONİK ENJEKSİYONU ALGORİTMASI İLE SAGF KONTROLÜ 44
5.1 Giriş 44
5.2 Adaptif Harmonik Enjeksiyonu Algoritması 45
5.3 Ağırlıkları Güncelleme Algoritması 47
5.4 Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu ile Evirici Anahtarlama İşaretlerinin Elde Edilmesi 48
5.5 SAGF'nin AHE Algoritmasıyla Matlab/Simulink Benzetim Modeli 53
5.6 AHE Algoritmasının SAGF Üzerindeki Başarımı 57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 68
KAYNAKLAR 70
ÖZGEÇMİŞ 75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Harmonik bileşenler 12
Şekil 2.2 Harmonik kaynakları 17
Şekil 3.1 Harmonik filtrelerin sınıflandırılması 23
Şekil 3.2 Akım harmoniklerinin giderilmesindeki pasif filtre kombinasyonu 24
Şekil 3.3 Tek ayarlı filtre ve ikinci mertebeden yüksek geçiren filtre yapıları 25
Şekil 3.4 Seri aktif güç filtresi devre şeması 29
Şekil 3.5 Paralel aktif güç filtresi devre şeması 31
Şekil 3.6 Birleşik güç kalite düzenleyicisi devre şeması 31
Şekil 3.7 Akım kaynaklı evirici ile SAGF 32
Şekil 3.8 Gerilim kaynaklı evirici ile PAGF 33
Şekil 3.9 Faz sayısına göre aktif güç filtreleri a) Tek fazlı-iki telli b) Üç fazlı-üç telli c) Üç fazlı-dört telli 34
Şekil 3.10 PAGF+PPF karma filtre devre şeması 36
Şekil 3.11 SAGF+PPF karma filtre devre şeması 36
Şekil 3.12 PPF ile seri bağlı AGF Karma filtre devre şeması 37
Şekil 4.1 Referans işaret tahmin teknikleri 38
Şekil 4.2 Referans gerilimlerin üretilmesinde kullanılan kontrol bloğu 42
Şekil 4.3 Senkron referans çerçeve yönteminde gerilim referansının oluşturulması 43
Şekil 5.1 AHE algoritması uygulama bloğu 46
Şekil 5.2 Temel anahtarlama vektörleri ve sektörleri 49
Şekil 5.3 Üç fazlı DGM üreteci 50
Şekil 5.4 Uzay Vektör DGM ile 8 farklı evirici konfigürasyonu 51
Şekil 5.5 Gerilim uzay vektörleri ve dq bileşenleri 52
Şekil 5.6 AHE algoritması kullanılarak oluşturulan SAGF'nin benzetim modeli 54
Şekil 5.7 RL ve RC yüküne ait Matlab/Simulink benzetim modeli 55
Şekil 5.8 Referans işaret tahmin bloğu 55
Şekil 5.9 Tahmin bloğunun Matlab/Simulink benzetim modeli 55
Şekil 5.10 Adaptif harmonik enjeksiyonu bloğunun Matlab/Simulink benzetimi 56
Şekil 5.11 Teta açısının elde edilmesine ait model 56
Şekil 5.12 Harmonikli kaynak geriliminin düşmesi ve yükselmesi durumunda yük geriliminin davranışı (filtresiz) 58
Şekil 5.13 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki düşme 58
Şekil 5.14 Harmonikli kaynak geriliminin düşmesi sonucu sisteme enjekte edilen gerilim 59
Şekil 5.15 Harmonikli kaynak gerilimindeki düşme sırasında yük gerilimi 59
Şekil 5.16 Harmonikli kaynak geriliminde düşme sonrası kararlı hal 60
Şekil 5.17 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki yükselme 60
Şekil 5.18 Harmonikli kaynak geriliminin yükselmesi sonucu sisteme enjekte edilen gerilim 61
Şekil 5.19 Harmonikli kaynak gerilimindeki yükselme sırasında yük gerilimi 61
Şekil 5.20 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki yükselme sonrası kararlı hal 62

Şekil 5.21 Harmonikli kaynak, yük ve filtre gerilimlerinin değişimleri 62
Şekil 5.22 Filtresiz durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB 63
Şekil 5.23 Filtresiz durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB 63
Şekil 5.24 Filtreli durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB 64
Şekil 5.25 Filtreli durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB 64
Şekil 5.26 Filtresiz durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş) 65
Şekil 5.27 Filtresiz durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş) 65
Şekil 5.28 Filtreli durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş) 66
Şekil 5.29 Filtreli durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş) 66

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 IEEE 519-2014 Gerilim Bozulma Limitleri 16
Tablo 3.1 Belirli Uygulama Hususları için AGF Seçimi 37
Tablo 5.1 Anahtarlama vektörleri ve çıkıştaki faz-nötr, faz-faz gerilimleri 51
Tablo 5.2 Her bir sektördeki anahtarlama süreleri..... 53
Tablo 5.3 AHE algoritması sonucu %THB değerleri 67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$\mathbf{I_1}$	**:** Akımın temel bileşeni
$\mathbf{V_1}$	**:** Gerilimin temel bileşeni
$\mathbf{I_n}$	**:** Akımın n. harmonik bileşeni
$\mathbf{V_n}$	**:** Gerilimin n. harmonik bileşeni
kV	**:** Kilovolt
L	**:** Endüktans
R	**:** Direnç
C	**:** Kapasitans
$\mathbf{R_k}$	**:** Kaynak direnci
$\mathbf{R_y}$	**:** Yük direnci
$\mathbf{R_f}$	**:** Filtre direnci
$\mathbf{L_k}$	**:** Kaynak endüktansı
$\mathbf{L_y}$	**:** Yük endüktansı
$\mathbf{L_f}$	**:** Filtre endüktansı
$\mathbf{C_{dc}}$	**:** DC bağ kapasitansı
$\mathbf{V_f}$	**:** Filtre gerilimi
$\mathbf{V_\alpha, V_\beta}$	**:** α ve β eksen gerilimleri
$\mathbf{I_\alpha, I_\beta}$	**:** α ve β eksen akımları
$\mathbf{V_d, V_q}$	**:** d ve q eksen gerilimleri
$\mathbf{I_d, I_q}$	**:** d ve q eksen akımları
$\mathbf{V_a, V_b, V_c}$	**:** 3 fazlı eksen gerilimleri
$\mathbf{V_{\alpha p}}$	**:** α eksenin anlık aktif gerilimi
$\mathbf{V_{\alpha q}}$	**:** α eksenin anlık reaktif gerilimi
$\mathbf{V_{\beta p}}$	**:** β eksenin anlık aktif gerilimi
$\mathbf{V_{\beta q}}$	**:** β eksenin anlık reaktif gerilimi
λ	**:** Dalga boyu
μ	**:** Güncelleme parametresi
fs	**:** Temel frekans

Kısaltmalar

AA	**:** Alternatif Akım
AHE	**:** Adaptif Harmonik Enjeksiyonu
AKE	**:** Akım Kaynaklı Evirici
ARGT	**:** Anlık Reaktif Güç Teoremi
BGKD	**:** Birleşik Güç Kalite Düzenleyici
DA	**:** Doğru Akım
DGM	**:** Darbe Genişlik Modülasyonu
FKD	**:** Faz Kilitlemeli Döngü
GKE	**:** Gerilim Kaynaklı Evirici

IEC	**:** Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (The International Electrotechnical Commission)
IEEE	**:** Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institude of Electrical and Electronics Engineers)
NEKK	**:** Normalize Edilmiş En Küçük Kareler
OBN	**:** Ortak Bağlantı Noktası
PAGF	**:** Paralel Aktif Güç Filtresi
PF	**:** Paralel Filtre
PPF	**:** Paralel Pasif Filtre
SAGF	**:** Seri Aktif Güç Filtresi
SRÇ	**:** Senkron Referans Çerçeve
THB	**:** Toplam Harmonik Bozulma
UVDGM	**:** Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Dünya üzerinde bulunan tüm enerji formları göz önünde bulundurulduğunda en popüler ve en verimli enerjinin elektrik enerjisi olduğunu söylemek pek de yanlış bir yaklaşım olmayacaktır. Özellikle son zamanlarda sanayi ve teknolojide meydana gelen gelişmeler sistemlerin elektriksel güç gereksinimini artırmış ve elektrik enerjisinin olmadığı bir yaşamın düşünülmesini neredeyse imkânsız hale getirmiştir. Modern toplumlar büyük ölçüde elektrik arzına bağımlı olarak yaşamaktadır.

Yarı iletken teknolojisi alanında yaşanan önemli gelişmeler hayatın birçok alanında kullanılan ve sistemlerin kontrolünü kolaylaştırmaya yardımcı olan güç elektroniği elemanlarının kullanımını giderek yaygınlaştırmaktadır. Ancak, bu sayede kullanımı artan *kesintisiz güç kaynakları, elektronik balastlar, floresanlar, anahtarlamalı güç kaynakları, ark ve pota ocakları, elektrikli motor sürücüleri, AA/DA dönüştürücüler, indüksiyon sistemleri vb.* sistemler aslında doğrusal olmayan yüklerdir ve enerji sistemlerinde temel frekansın dışında harmoniklerin oluşmasına neden olurlar. Bu da elektriğin üretiminden dağıtımına kadar tüm aşamalarında güç kalitesinin düşmesinden kaynaklı sorunlar meydana getirir.

Güç kalitesi, elektrik enerjisinin sürekliliği ve elektriksel gücü oluşturan temel parametrelerin durumuyla ilgili bir kavramdır. Güç kalitesinin iyi olduğundan bahsedebilmek için akım ve gerilimin temel frekansta sinüzoidal dalga formunda olması, sistemin sinüzoidal bir kaynaktan beslenmesi ve sisteme bağlı yüklerin doğrusal olması gerekmekte olup kaynak geriliminde ve frekansında ani düşüş ve yükselişlere, dalgalanmalara, fazlar arası dengesizliklere, reaktif güce, kısa ve uzun süreli kesintilere ve standartların öngördüğü sınır değerler üzerinde harmoniklere rastlanılmamalıdır. Bu bahsedilen ideal durumdur ve tabii ki bu şartlarda bir elektrik enerjisi sağlamak mümkün değildir.

Güç kalitesinde meydana gelen olumsuzlukların temelde iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan biri güç şebekesinde meydana gelen arızalardan kaynaklı güç kalitesi

problemleri, bir diğeri ise son kullanıcı kademesinde doğrusal olmayan yüklerden kaynaklı güç kalitesi problemleridir (Doğan, 2016; Karaman, 2018).

Güç şebekesinde; altyapının yetersiz olması, trafoların bakımlarının düzenli olarak yapılmaması, tesisatların eski olması, doğal afetler gibi nedenlerden ötürü meydana gelen arızalar tüm sistemde kesintilere, kısa süreli durumlara, gerilim düşmesi ve yükselmesi problemlerine ve harmoniklere neden olur. Bu durumda son kullanıcıların sistemdeki problemlere karşı önlem olarak jeneratör veya kesintisiz güç kaynağı gibi cihazları kullanması gerekmektedir (Doğan, 2016).

Büyük güçlü motorların ilk kalkış anında sistemden çok yüksek demeraj akımı çekerek şebekede anlık gerilim düşmesi meydana getirmesi; doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yüklerin sistemden çektiği harmonikli akımlar, reaktif güç kompanzasyonu sırasında büyük kondansatörlerin devreye girmesi esnasında oluşan aşırı gerilimler son kullanıcılardan kaynaklı oluşabilecek arızalardan birkaçıdır. Ülkeler dağıtım sistemlerinde bu sebeple meydana gelen güç kalitesi problemlerinin şebekeye ve dolayısıyla diğer kullanıcılara vereceği zararları engellemek için yönetmelikler ve standartlar çerçevesinde bazı sınırlamalar uygulamaktadır (Doğan, 2016).

Güç sistemindeki akım ve gerilim harmoniklerinin kabul edilebilir değerlerini belirleyen ulusal ve uluslararası kabul görmüş standartlar bulunmaktadır. Sisteme ait büyüklüklerin bu standart değerler içinde tutulması gerekir. Aksi takdirde bu harmonikler sisteme ve sistemde bulunan diğer yüklere ciddi zararlar vererek; kayıpların artmasına, sistemin güç faktörünün ve veriminin düşmesine, koruma ve ölçüm cihazlarının arızalanmasına, ölçü hatalarının artmasına, devre elemanlarının aşırı ısınmasına, haberleşme sistemlerinde parazit oluşmasına sebep olur.

Doğrusal olmayan yüklerin kullanımı sistemde oluşan harmonikler dışında reaktif güç tüketimine de yol açar. Bu yüklerin çalışma prensipleri şebekeden aktif gücün yanı sıra reaktif güç kullanımını da gerekli kılar. Ancak bu durum hattın empedansına bağlı olarak ısı kayıpları, üretilen elektriğin verimli kullanılamaması, iletim sistemlerinde verim düşüklüğü ve maliyetlerin artması gibi bazı olumsuzluklara neden olmaktadır. Sistemin reaktif güç ihtiyacı iki şekilde karşılanabilmektedir. Bunlardan ilki reaktif

gücün aktif güç gibi santrallerde senkron generatörler tarafından üretilmesidir ki bu durumda elektrik sistemleri aktif güç kapasitelerini düşürerek kapasitelerinin bir kısmını gereksiz yere reaktif güç için kullanmak durumunda kalmaktadır. Bu hem verimli hem de ekonomik bir çözüm değildir. İkinci yöntem ise kullanıcı tarafında reaktif güç kompanzasyonu yöntemi ile karşılanmasıdır. Bu yöntem hem şebeke hem de kullanıcılar açısından daha mantıklı bir yöntemdir (Anwar, 2009; Karaman, 2018). Böylece şebekenin güç kapasitesi artar, ısıl kayıplar, gerilim düşümü, iletken kesitleri, faz gerilim dengesizlikleri, gerilim dalgalanmaları ve harmonikler azalır. Tüketiciler ise kurdukları kompanzasyon sistemleri sayesinde işletme maliyetlerini azaltır, güç faktörünü düzelttiklerinden daha az reaktif güç çeker, elektrik maliyetini düşürür ve güç kalitesinde iyileşme meydana geldiğinden elektriksel açıdan daha sağlıklı işletme koşullarında çalışma imkânı olur (Anwar, 2009).

Harmoniklerin sistem üzerindeki olumsuz etkilerini minimuma indirmek ve güç kalitesini artırmak iki farklı yöntemle mümkün olabilir. Bunlardan biri, üretim aşamasında cihazların harmonik oluşturmayacak yahut harmonik oluşumunu minimum düzeyde tutacak şekilde tasarlanması; bir diğeri ise harmonikler üretildikten sonra güç şebekesinde var olan bozulmuş işaretlerin filtreleme yoluyla giderilmesidir (Bilge, 2008). Bu sayede hem harmoniklerin süzülmesi hem de güç faktörünün iyileştirilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu mümkün olabilmektedir. Bu amaçla kullanılan devre elemanlarına filtre denilmektedir.

Harmoniklerin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonunun yapılmasında geleneksel olarak pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak son zamanlarda yük karakteristiklerinde meydana gelen değişiklikler karşısında pasif filtreler yetersiz kalmış ve bu nedenle daha esnek çözümler sunabilen, filtreleme performansları daha iyi olan ve değişken yük koşullarına cevap verebilen aktif güç filtrelerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Aktif güç filtreleri, Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF), Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF) ve Birleşik Güç Kalite Düzenleyici (BGKD) olmak üzere 3 grupta incelenebilir. Ayrıca hem aktif hem de pasif filtreyi aynı devre üzerinde birleştirerek her iki yapının da avantajlarını kullanan Karma (Hibrit) Güç Filtreleri de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2 Literatür İncelemesi

Güç kalitesi problemleri karşısında çözüm olarak sunulan Aktif Güç Filtresi ile ilgili çalışmalar literatürde oldukça fazla yer tutmaktadır.

Bird vd. (1969), tarafından yayımlanan makale, aktif güç filtresi kavramının temellerini oluşturan çalışmalardan biri olup, çok katmanlı eviricilerde akım harmoniklerinin azaltılması için eviriciye 3. harmonik enjekte edilerek girişteki akım dalga formunun düzeltilmesi üzerinde çalışılmıştır.

Sasaki ve Machida (1971), aktif güç filtresi fikrinin oluşumunda önemli yere sahip bir diğer çalışmayı gerçekleştirmiş ve AC akım harmoniklerini ortadan kaldırmak için transformatörün çekirdeğindeki akının kompanzasyonuna dayalı yeni bir yöntem önermiştir. Burada akım harmoniklerinin giderilmesi için yine sistemdeki mevcut harmonikleri kullanmışlardır. Yani aslında aktif güç filtresi terim olarak kullanılmamış olsa da uygulanan yapı bir paralel aktif güç filtresidir.

Gyugyi ve Strycula (1976), tarafından yapılan çalışma, aktif güç filtresi tasarımının ilk örneklerindendir ve çalışmada "aktif güç filtresi" terim olarak kullanılmıştır. Bu makalede seri aktif güç filtresi ve paralel aktif güç filtresinin temel çalışma ilkeleri gösterilmiştir. Burada güç transistörleri kullanan PWM eviricilerinden oluşan AGF'ler sunulmuştur. Ancak, o dönemde yüksek güçlü, yüksek hızlı anahtarlama cihazları bulunmadığından, gerçek güç sistemlerinde yaygın olarak uygulanma imkânı bulamamıştır.

Bu döneme kadar yavaş ilerleyen AGF ile ilgili araştırmalar, güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ve pasif filtrelerin harmonik filtrelemede artık cevap veremez olduğu noktada; 1980'li yılların başlarından itibaren hızlanmaya ve endüstriyel tesislerde daha yaygın kullanılmaya başlanılmıştır. Bu sayede alçak ve orta gerilim sistemlerinde pasif filtrelere oldukça güçlü bir alternatif oluşturmuşlardır.

Akagi vd. (1984), çalışmasında 3-fazlı sistemler için anlık reaktif güç kavramı ve bu kavramdan doğan ani reaktif güç teorisini (p-q teorisini) tanıtmıştır. Bu yöntemde anlık gerilimler ve akımlar a-b-c koordinat düzleminde anlık uzay vektörleri olarak

gösterilir. Bu vektörler alfa-beta koordinat düzlemine dönüştürülerek bu düzlemde anlık aktif ve reaktif güç değerleri elde edilir. Bu güç değerlerinin AC ve DC bileşenleri bulunmaktadır. AC bileşen (harmonik) uygun bir filtre ile çıkarılır. Sonrasında anahtarlama yapabilmek için referans işaretler alfa-beta düzleminden tekrar a-b-c düzlemine dönüştürülür. Bu yöntem harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu üzerinde oldukça etkili bir yöntemdir. Bu nedenle referans işaretleri üretmek için yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak kavramsal olarak sıfır bileşen akımları olmayan üç fazlı sistemlerle sınırlıdır.

Peng vd. (1990, 1993), çalışmasında güç sistemlerindeki harmonikleri yok etmek için seri aktif güç filtresi ve paralel pasif güç filtresinin birleşimiyle oluşan bir güç filtresi kombinasyonu incelemiştir. Bu yöntemle hem daha pratik hem de daha ekonomik bir sistem amaçlanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak daha iyi filtreleme performansı ve daha düşük kurulum ve işletme maliyeti elde edilmiştir. İlk çalışmayı yayımladıktan üç yıl sonra aynı sistem daha da geliştirilmek üzere ele alınmış, sistemin geçici kompanzasyon karakteristikleri ve kararlılığı teorik ve deneysel açıdan ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca bu kombine sistemin, siklo dönüştürücülerin kompanzasyonu için uygulanmasını sağlayan yeni bir kontrol metodu önerilmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar gösterilmiştir.

Depenbrock (1993), sinüzoidal olmayan koşullar altında simetrik olmayan yüklere sahip m-telli dengesiz çok fazlı sistemlerin, FBD (Fryze-Bucholz-Depenbrock) yöntemi kullanılarak akımlar, gerilimler ve güç miktarları arasındaki ilişkilerin zaman alanında nasıl analiz edilebileceği göstermiştir.

Bhatttacharya ve Divan (1995), çalışmasında New England Electric kuruluşunun 750 kVA 4160V/480V düşürücü transformatörün beslediği şebekeye bağlı Beverly Pompa İstasyonu için tasarlanarak inşası yapılan ve ayarlanabilir hızlı sürücü yüklerinin IEEE 519 tarafından tavsiye edilen harmonik standartlarını karşılaması için önerilen senkron referans çerçeve kontrollü bir hibrit seri aktif filtre sistemini incelemektedir.

Peng ve Lai (1996), çalışmasında sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, dengeli veya dengesiz, sıfır bileşen akımları ve/veya gerilimleri olan veya olmayan üç fazlı güç sistemleri için geçerli olan genelleştirilmiş bir anlık reaktif güç teorisi önermiştir.

Fujita vd. (1997), SAGF ve bir çift seri diyot doğrultucudan oluşan sinüzoidal giriş akımına sahip bir doğrultma sisteminin teorik ve deneysel bir çalışmasını yapmıştır.

Singh vd. (1999), güç kalitesi problemleriyle ilgilenen araştırmacılara ve uygulama mühendislerine aktif güç filtresi teknolojisinin durumu hakkında geniş bir bakış açısı sağlamak amacıyla aktif güç filtresi konfigürasyonları, kontrol stratejileri, komponent seçimi, diğer ilgili ekonomik ve teknik hususlar ve bunların belirli uygulamalar için seçimi hakkında kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. Ayrıca 200'den fazla yayınının listelendiği bir başvuru kaynağı olarak hazırlanmıştır.

El-Habrouk vd. (2000), hem güç kalitesi alanındaki araştırmacılar hem de güç kalitesi problemleriyle başa çıkma düşüncesi olan kendi sistemlerinde kullanmak amacıyla aktif filtreler kurmayı düşünen elektrik enerjisi üreticileri, tedarikçileri ve tüketicileri için mevcut yaklaşımlar çerçevesinde bir bakış açısı sunmak amacıyla literatürdeki çalışmaları sınıflandırmış ve değerlendirmiştir.

Srianthumrong vd. (2000), bir çift seri diyot doğrultucu ile bir seri aktif filtrenin birleşiminden oluşan AC/DC güç dönüştürme sisteminin harmonik akım çıkarma devresindeki gecikme süresi hesaba katıldığındaki kararlılığı üzerine çalışmıştır.

Xiangning vd. (2000), çalışmada hayali üç fazlı gerilimler ve gerilim dönüşümü aracılığıyla, gerilim çökmesinin büyüklüğünü, süresini ve faz açısı sıçramasını anında ölçmek için kullanılabilecek yeni bir yöntem önermiştir.

Lee ve Lee (2001), bu çalışmada, kaynak gerilim dengesizliğini ve akım harmoniklerini dengeleyen hibrit aktif güç filtreleri için yeni bir kontrol şeması önermiştir. Kompanzasyon performansının geçerliliği, TMS320C31DSP yongası tarafından kontrol edilen 3kVA prototip aktif güç filtresi için deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Perez vd. (2003), tek fazlı sistemlerde gerilim harmoniklerini süzmek için kullanılan, düşük dereceli ve basit denetleyicili bir seri aktif filtre önermiştir. Sunulan teorinin uygulanması sonucunda THB %11'den %4'e düştüğü gösterilmiştir.

Hasan ve Romlie (2007), bu çalışmada, hibrit seri aktif ve paralel pasif güç filtresinin anlık aktif ve reaktif güç (p-q) ve anlık aktif ve reaktif akım bileşeni (id-iq) yöntemini kullanarak karşılaştırmalı performanslarını incelemektedir. Dengeli sinüzoidal kaynak, dengesiz sinüzoidal kaynak ve dengeli sinüzoidal olmayan kaynak durumları için lineer olmayan yüke sahip bir enerji hattının Matlab/Simulink SimPower Sistemi ile modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır.

Pinto vd. (2007), tarafından yapılan bu çalışmada 3-fazlı 3-telli bir sistem için SAGF ve PPF kombinasyonundan oluşan bir karma filtre, PSCAD/EMTDC'de modellenmiş ve simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Filtrenin kontrol stratejisi, PLL (Faz-Kilitli-Döngü) ile birlikte alfa-beta referans çerçevesindeki anlık güç teorisine dayanmaktadır.

Tong vd. (2008), 10 kVA'lık SAGF (Seri Aktif Güç Filtresi) ve PPF (paralel pasif filtre)'den oluşan yeni bir karma (hibrit) filtre önermiştir. Simülasyonlar ve deneysel sonuçlar, önerilen filtrenin paralel pasif filtrelerin verimliliğini artırabileceğini, invertörün derecesini azaltabileceğini ve sistem filtreleme performansını ve güvenilirliğini iyileştirebileceğini doğrulamıştır.

Yusof ve Rahim (2009), kapasitif yüklere sahip üç fazlı bir diyot doğrultucu tarafından üretilen akım kaynağı harmoniklerini azaltmak için kullanılan seri aktif güç filtresi ve pasif güç filtresinden oluşan bir üç fazlı karma (hibrit) filtre önermiştir. Bunun için senkron referans çerçeve (SRF) yöntemine dayalı bir kontrol yöntemi uygulanmış ve simülasyonlar Matlab/Simulink Power System Blockset (PSB) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Akçay (2010), tarafından yapılan bu çalışmada 3-fazlı 3-telli sistemlerde seri aktif güç filtre (SAGF) ve 3. Ve 5. harmonikler için paralel pasif filtre (PPF) tasarımı, kontrolü, kontrol yöntemleri, simülasyonları ve performansları; dengeli gerilim, dengesiz gerilim ve dengesiz yük durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Filtrenin performansı

filtresiz durumdaki THB değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. SAGF ile hem harmonik gerilim kompanzasyonu hem de gerilim regülasyonu yapılmıştır. Kontrol metodu olarak anlık reaktif güç teorisi kullanılmış ve Matlab R2008a versiyonu Simulink ara yüzü ile simule edilmiştir.

Islam vd. (2012), çalışmada güç kalitesini iyileştirmek için p-q teorisinin kullanıldığı 3 fazlı seri aktif güç filtresi önermiştir. THB ve güç faktörü değerlerine göre filtre performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, AVR mikro kontrolörler ve güç elektroniği devreleri kullanılarak donanım uygulaması için simülasyonları yapılmıştır.

Chaudhari ve Chandraprakash (2012) ve Kumar ve Ilango (2014), tarafından yapılan çalışmalarda, güç kalitesi düzenleyici olarak kullanılan üç fazlı Seri Aktif Güç Filtresinin (SAPF) basitleştirilmiş bir kontrol algoritması sunulmaktadır. SAGF, üç fazlı, üç bacaklı bir VSI olarak gerçekleştirilmiştir. Chaudhari ve Chandraprakash (2012), tarafından histerezis kontrol yöntemiyle Kumar ve Ilango (2014), tarafından ise sinüs PWM tekniğiyle Matlab/Simulink ortamında SAGF'nin dinamik bir modeli geliştirilerek ve sistemin güç kalitesindeki iyileşmeyi gösteren simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Erken vd. (2016), çalışmasında sabit mıknatıslı senkron motorun tork dalgalanmasını azaltmak için adaptif harmonik enjeksiyonu yöntemini kullanarak motora uygun akım harmoniklerinin enjeksiyonunu sağlamaktadır. Bu motorlarda moment ve hız dalgalanmaları periyodik olduğundan yöntem kolaylıkla uygulanabilmiştir. q ekseni akımına (akım kompanzasyonuna dayalı yöntem), q ekseni gerilimine (gerilim kompanzasyonuna dayalı yöntem) ve q ekseni akımının referans değerine (referans akım kompanzasyonuna dayalı yöntem) bağlı olarak enjekte edilecek harmonik belirlenir. Yapılan çalışmanın sonucunda, basit, ekonomik ve uygulanabilir olan bu yöntemin farklı hız ve yük durumları üzerinde etkili olduğu, tahrik sisteminden kaynaklı titreşimleri de bastırabildiği gösterilmiştir.

Demirdelen (2016), çalışmasında üç fazlı şebekeye bağlı büyük ölçekli PV sistemleri için modüler kaskat çok seviyeli dönüştürücü tabanlı bir şönt melez aktif güç filtresi önermiştir. Sistemin benzetimi PSCAD/EMTDC ile yapılmıştır.

Annapoorani vd. (2017), çalışmasında dağıtılmış üretim sisteminde (burada fotovoltaik sistem kullanılmıştır) gerilimde düşüş ve artışlar olması durumunda güç kalitesini iyileştirmek için senkron referans çerçeve (SRÇ) yöntemini kullanan seri aktif güç filtresi önermiştir. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır.

Ilamkar ve Joshi (2018), çoğunlukla dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim düşüşünü kompanze etmek için histerezis gerilim kontrollü Dinamik Voltaj Düzeltici (DVR) kullanmıştır. Referans gerilimler senkron referans çerçeve teorisi kullanılarak elde edilmiş, modelinin simülasyonu Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır.

Karaman (2018), çalışmasında akım harmoniklerinin giderilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için adaptif harmonik enjekte (AHE) yöntemini kullanan 3 fazlı paralel aktif güç filtresi önermiştir. Anahtarlama kapı işaretleri histerezis bant akım denetleyiciler tarafından üretilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar senkron referans çatı teoremi, anlık reaktif güç teoremi ve hızlı fourier dönüşüm yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Farooqi vd. (2019), enerji depolama sistemi ve mini hidro türbin sistemi ile bağlantılı bir dağıtım şebekesindeki gerilim düşüşünü ve artışını kompanze etmek için Dinamik Voltaj Düzeltici (DVR) üzerinde çalışmıştır.

Gothane vd. (2019), bu makalede gerilim düşüşünü azaltmak için AC-AC dönüştürücü kullanan üç fazlı seri aktif filtre sunmaktadır. Önerilen topoloji, geleneksel topolojilere kıyasla enerji depolama cihazlarının bulunmaması ve DA bağ yapısının ortadan kaldırılması avantajına sahiptir. Performans analizi, Matlab/Simulink'te elde edilen ayrıntılı simülasyon sonuçlarıyla yapılmıştır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tez çalışması, yeni bir kontrol yöntemi olan Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) algoritması ile kontrol edilen Seri Aktif Güç Filtresinin gerilim düşüş ve yükselişi sırasında oluşan harmonikleri gidermek hususundaki performansını incelemektir.

Aktif güç filtreleri hakkında yapılan bilimsel araştırmalar incelendiğinde harmonik filtreleme topolojisi olarak paralel aktif güç filtresine nazaran hakkında daha az çalışmaya rastlanan seri aktif güç filtresi çalışma konusu olarak tercih edilmiştir. Değişen yük koşullarında dahi harmoniklerin filtrelenmesi sonucunda uluslararası standartların belirlediği sınır değerler içerisinde bir Toplam Harmonik Bozulma (THB) değeri hedeflenmiştir.

Çalışmada üç fazlı-üç telli bir sisteme uygulanan SAGF'nin Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) algoritmasıyla kontrolünün benzetim çalışması Matlab 2021a/Simulink ara yüzü kullanılarak oluşturulmuştur.

1.4 Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasında Seri Aktif Güç Filtresinin Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) yöntemiyle kontrol edilerek gerilim çökme ve yükselme durumlarında sağladığı harmonik kompanzasyonu incelenmiş olup, çalışma toplamda altı bölümden oluşmuştur.

Birinci bölümde, özellikle yarı-iletken teknolojisinde meydana gelen gelişmeler sonucu anahtarlamalı güç devresi elemanlarının kullanımının artması sonucu elektrik güç şebekelerinde meydana gelen harmonik oluşumu ve sistemden reaktif güç çekilmesi gibi güç kalitesini olumsuz etkileyen kavramlardan bahsedilmiştir. Güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılan geleneksel filtreleme yöntemlerinden ve bu yöntemlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için kullanılan, günümüzde çalışma konusu olarak popülerliği devam eden Aktif Güç Filtre (AGF) sistemleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Literatür incelemesi yapılarak AGF alanında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

İkinci bölümde, harmonik kavramı üzerinde detaylı bir şekilde durularak, harmonik üreten kaynaklar ve üretilen harmoniklerin hem yük hem kaynak tarafındaki etkileri açıklanmıştır. Harmoniklerin ulusal ve uluslararası standartlardaki sınır değerleri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, şebekedeki bozucu etkilerin kaynağı harmoniklerin süzülebilmesi, azaltılabilmesi ve olumsuz etkilerinin minimuma indirilebilmesi için kullanılan pasif, aktif ve hibrit filtrelerin yapıları, avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, aktif güç filtrelerinin doğru bir şekilde anahtarlanabilmesi için gerekli olan ve literatürde bulunan referans işaret tahmin etme yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Ayrıca çalışmalarda sıklıkla kullanılan Anlık Reaktif Güç Teoremi (ARGT) ve Senkron Referans Çerçeve (SRÇ) yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, bu çalışmada referans gerilim işaretlerinin tespiti için önerilen AHE algoritması detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca tespit edilen referans gerilimler aracılığıyla elde edilecek olan filtre anahtarlama sinyallerinin üretimi için seçilen UVDGM'nin çalışma prensibinden bahsedilmiştir. SAGF'nin AHE algoritması kullanılarak benzetimi Matlab2021a/Simulink ara yüzü ile yapılmış, değişken yük durumlarındaki THB değerleri kıyaslanmıştır.

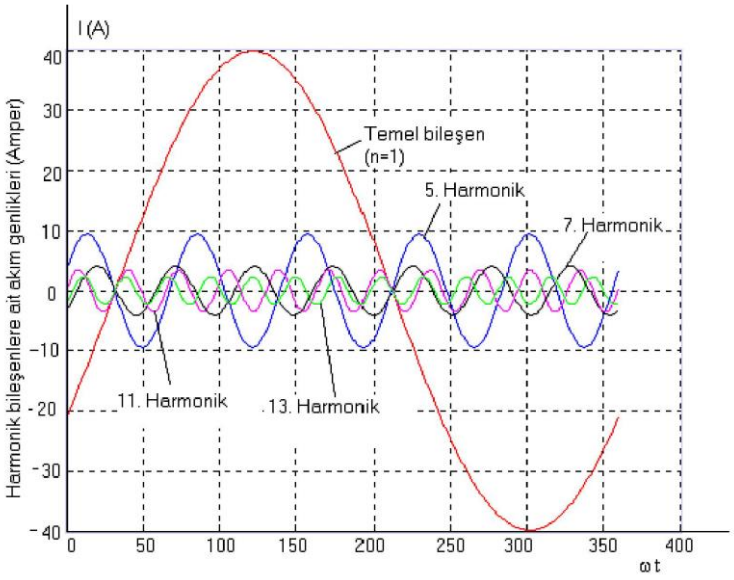
Altıncı ve son bölümde, çalışma sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve ileriye dönük çalışmalarla ilgili öneride bulunulmuştur.

2. HARMONİK TANIMI, KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

2.1 Harmonik Tanımı ve Standartları

Elektriksel güç sistemlerinde meydana gelen gerilim düşmesi/yükselmesi, gürültü, dalgalanma gibi çeşitli sorunlar ve lineer olmayan yüklerin sistemde varlığı son kullanıcıya iletilen gücün kalitesini olumsuz etkilemekte, sistemde reaktif güç oluşmasına ve harmonik bozulmaya neden olmaktadır. İdeal durumda, bir sistemde var olan akım ve gerilime ait dalga şekillerinin temel frekansta tam sinüzoidal formda olması beklenir. Ancak harmonik bozulmalar neticesinde, sistemde temel bileşen dışında ama temel güç frekansının tam katlarındaki frekansa sahip sinüzoidal dalga şekilleri meydana gelir. Oluşan bu sinüzoidal dalgalar "harmonik bileşen" olarak adlandırılır. Buradan yola çıkarak bozulmuş akım ve gerilim dalga şekilleri temel frekans bileşeni ve temel frekans bileşeninin tam katlarına sahip çeşitli büyüklükteki tüm harmonik bileşenlerin toplamı olarak ifade edilebilir.

Güç sistemindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11, ... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Yıldız bağlı elektrik motorlarında ise 3 ve 3'ün katı harmonikler de bulunmaz. Şekil 2.1'de yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir (Adak, 2003).



Şekil 2.1 Harmonik bileşenler (Adak, 2003)

Harmonik bileşenlerin analizi Fransız fizikçi ve matematikçi Joseph Fourier tarafından bulunan "Fourier Serisi" aracılığıyla yapılabilmektedir. Fouirer Serisinin temelinde sinüzoidal olmayan periyodik işaretlerin farklı genlik ve frekanslardaki sinyallere ayrıştırılabileceği düşüncesi bulunmaktadır. Yani bozulmuş akım ve gerilim dalga şekilleri temel frekans bileşeni ve temel frekans bileşeninin tam katlarına sahip çeşitli büyüklükteki tüm harmonik bileşenlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Ancak bir işaretin Fourier Serisine açılabilmesi için periyodik olması ve Dirichlet Koşulları olarak bilinen; fonksiyonun sonlu sayıda süreksizlik noktası bulundurması, ortalama değerinin bir sonlu değer olması ve sonlu sayıda minimum ve maksimum tepe değerlerinin bulunması şartlarını sağlaması gerekmektedir (Anwar, 2009).

Bu tanımdan hareketle T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası Fourier'e göre denklem (2.1)'teki gibi hesaplanır.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (2.1)$$

Denklemin seriye açılmış şekilde gösterimi denklem (2.2) de gösterildiği gibidir:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \ldots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \ldots + B_n \sin nt \quad (2.2)$$

Burada; t bağımsız değişkeni (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olmaktadır), A_0 (sabit) fonksiyonun ortalama değerini göstermektedir. Bu denklemde n=1 alındığında temel bileşen elde edilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüzoidal dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler. "2, 3, 4, ..., n" indisi ile gösterilen bileşenlere ise harmonik adı verilmektedir (Anwar, 2009; Gündüz, 2020).

(A_0, A_n, B_n) fourier katsayıları sırasıyla denklem (2.3), (2.4) ve (2.5) eşitlikleri aracılığıyla bulunabilir:

$$A_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t)dt \tag{2.3}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\cos nt\, dt \tag{2.4}$$

$$B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\sin nt\, dt \tag{2.5}$$

Harmoniklerin analizinde kullanılan bazı terimler bulunmaktadır. Analiz sırasında sinyalin saf sinüzoidal formdan ne kadar uzaklaştığının tespit edilmesini sağlayan kavramlardan biri "Toplam Harmonik Bozulma (THB) (Total Harmonic Distortion-THD)"dir. Hem tüketici hem de hizmet sağlayıcı için önemli olan harmonik indekslerin ölçülebildiği ve karşılıklı olarak kabul edilebilir yöntemlerle tahmin edilebildiği nokta ise Ortak Bağlantı Noktası (OBN, Point of Common Coupling - PCC) olarak tanımlanır (Das, 2015). THB, OBN'deki harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının temel bileşenin efektif değerine oranı olarak tanımlanmaktadır (Bozabalı, 2009). Buna göre gerilimin ve akımın THB değerleri sırasıyla denklem (2.6) ve (2.7)'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$\%THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} x100 \tag{2.6}$$

$$\%THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} x100 \tag{2.7}$$

Burada;

I_1: Akımın temel bileşeni

V_1: Gerilimin temel bileşeni

I_n: Akımın n. harmonik bileşeni

V_n: Gerilimin n. harmonik bileşeni

Toplam harmonik bozulma (THB) dışında gerilim/akım sinyallerinin harmonik bozulma miktarını belirleyen diğer kavramlar ise Bireysel Harmonik Bozulma (Individual Harmonic Distortion - IHD) ve Toplam Talep Bozulması (Total Demand Distortion TDD) olarak karşımıza çıkar.

Bireysel harmonik bozulma, bireysel harmoniklerin efektif değerlerinin temel bileşenin efektif değerine oranı olarak açıklanır. Gerilimin ve akımın IHD değerleri sırasıyla denklem (2.8) ve (2.9)'daki gibi hesaplanmaktadır;

$$\%IHD_V = \frac{V_n}{V_1} x100 \tag{2.8}$$

$$\%IHD_I = \frac{I_n}{V_1} x100 \tag{2.9}$$

Toplam Talep Bozulması, harmonik sinyallerin efektif değerleri toplamının yükün maksimum talep akımının efektif değerine oranı olarak belirlenir. Yük akımı için TDD'nin hesaplanması denklem (2.10)'daki gibidir.

$$\%TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} x100 \tag{2.10}$$

Elektrik enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi adına güç kalitesi problemlerinin olumsuz etkilerinden korunmak ve temiz ve sürdürülebilir elektrik enerjisi sağlamak için IEEE ve IEC tarafından bazı uluslararası standartlar önerilmektedir. Bu standartlardan bazıları IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-12, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, IEC 61000-3-6, IEC 61000-3-12, IEEE Std. 519-2014 ve EN50160 standartlarıdır.

Güç şebekelerindeki, harmonik bileşenlerin kabul edilebilir oranını belirleyen standartlardan biri olan IEEE-519-2014 standardına göre gerilim için belirlenen THB sınır değerler Tablo 2.1'de akım için belirlenen TDD sınır değerler Tablo 2.2'de gösterilmiştir (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014).

Tablo 2.1 IEEE 519-2014 Gerilim Bozulma Limitleri

Ortak Bağlantı Noktasındaki Bara Gerilimi	Bireysel Harmonik Bozulma (%)	Toplam Harmonik Bozulma THB (%)
$V \leq 1.0\ kV$	5,0	8,0
$1\ kV < V \leq 69\ kV$	3,0	5,0
$69\ kV < V \leq 161\ kV$	1,5	2,5
$161\ kV < V$	1,0	1,5[a]

[a]Yüksek voltajlı sistemler, nedeninin ağda gelecekteki kullanıcıların bağlanabileceği noktalarda etkileri azalmış olacak bir HVDC terminali olduğu durumlarda %2,0'ye kadar THB'ye sahip olabilir.

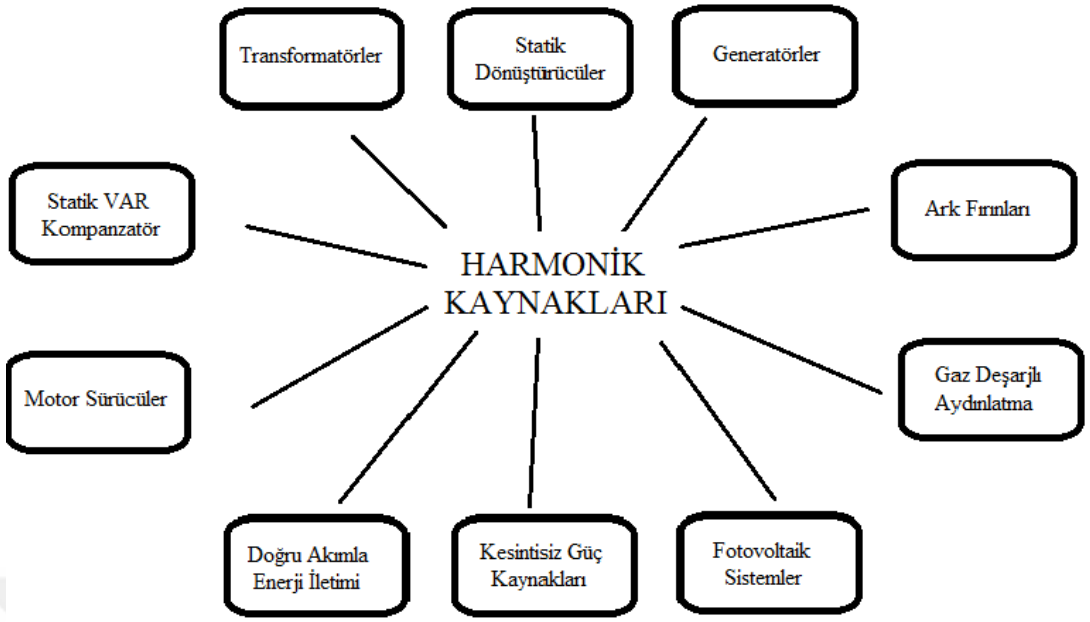
Tablo 2.2 IEEE 519-2014 Akım Bozulma Limitleri

Maksimum Harmonik Akım Bozulması (I_y yüzdesi olarak)						
	Bireysel Harmonik Derecesi (Tek Harmonikler)[a,b]					
I_{kd}/I_y	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20[c]	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	6,0	6,0	2,5	1,4	20,0

[a] Çift harmonikler, yukarıdaki tek harmonik limitlerinin %25'i ile sınırlıdır.
[b] Yarım dalga dönüştürücüler gibi bir DA ofseti ile sonuçlanan akım bozulmalarına izin verilmez.
[c] Tüm güç üretim ekipmanları, gerçek I_{kd}/I_y değerinden bağımsız olarak bu akım bozulma değerleri ile sınırlıdır.
I_{kd} : OBN'deki maksimum kısa devre akımı
I_y: normal yük çalışma koşulları altında OBN'deki maksimum talep yük akımı (temel frekans bileşeni)

2.2 Harmonik Kaynakları

Güç şebekesinde arıza meydana gelmesi ve/veya sistemdeki son kullanıcı kademesinde lineer olmayan yüklerin bulunması halinde sistemde harmoniklerin oluşması beklenen ancak istenmeyen bir durumdur. Sistemde harmoniklerin bulunması sistemin güç kalitesini düşürmekte ve OBN'de sisteme bağlı olan tüm yüklerin olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle öncelikle bu harmonik kaynaklarını iyi tanıyor olmak, sonrasında bu harmoniklerin sebep olduğu olumsuzluklara karşı doğru önlemler alabilmek açısından oldukça önemlidir. Harmonik üreten kaynakların bazıları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Harmonik kaynakları

2.2.1 Transformatörler

Transformatörler, elektriğin iletiminden dağıtımına kadar her aşamada elektromanyetik indüksiyon yoluyla elektrik enerjisinin aktarımını yapmaktadır. Ayrıca transformatörler kuplaj amacıyla, yükselteçlerin hoparlör çıkışlarında, empedans uygunluğunun sağlanması için, güç kaynaklarında değişik gerilimler elde etmek için kullanılır (Akçay, 2010).

Ancak transformatörlerin yapısında bulunan demir nüvenin mıknatıslanma karakteristiği doğrusal değildir ve bu da harmonik oluşmasına neden olur. Dahası transformatörler nominal değerleri dışında çalıştığı durumda demir nüve daha çok doyuma ulaşır ve oluşan harmoniklerin seviyesi hızla artmaya başlar (Bozabalı, 2009).

3 fazlı transformatörlerde mıknatıslanma akımının şebekeye geçip geçmeyeceği transformatör bağlama şekline ve manyetik devresinin yapısına bağlı olarak değişir. Bağlantı şekillerine bağlı olarak üç ve üç'ün katı harmonikler elenebilir. Üçüncü ve yedinci harmoniklerin etkileri soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saclar kullanılarak azaltılabilir.

Transformatörlerde oluşan harmonikler, akım ve gerilim harmonikleri olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Akım harmonikleri ilave ısıl (I^2. R'den) kayıpları oluşturur, demir nüve kayıplarını artırır. Haberleşme devreleri üzerinde manyetik etkiler yapar. Gerilim harmonikleri ise transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasitesi arasında rezonansa girmeye neden olur. Dielektrik zorlanmayı artırır. Haberleşme devrelerine elektrostatik etki meydana gelir. Bu da transformatör empedansı ile son kullanıcılar arasında rezonans olayının meydana gelmesine neden olur (Adak, 2003).

2.2.2 Statik Dönüştürücüler

Güç elektroniği elemanlarının kullanıldığı doğrultucu, evirici, frekans konvertörü gibi cihazların tamamı aynı zamanda güçlü bir harmonik kaynağıdır. Bu cihazların her birinin çalışma prensibi anahtarlama yapmak olduğundan bu sırada oluşan darbe akımları sistemin lineer yapısını bozmakta ve harmonik üretilmesine sebep olmaktadır.

2.2.3 Generatörler

Dönen makineler, makine endüvi oluk sayılarına göre harmonik üretmektedirler. Generatörler de dönen makineler kategorisinde bulunduğundan, doğal bir harmonik kaynağı olarak değerlendirilebilirler. Manyetik alanın şekli, manyetik devrenin doyuma ulaşıp ulaşmadığı ve manyetik direncin değişimi, oluşacak harmoniklerin derecesini etkileyen faktörlerdir (Akçay, 2010).

Generatörde stator sargılarının yıldız bağlanması durumunda, faz-nötr arası gerilimlerde üç ve üçün katı harmonikler görülür, ancak faz-faz arası gerilimlerde bu harmoniklere rastlanmaz. Bu yüzden sargılarının yıldız bağlı olması ve yıldız noktasının yalıtılması daha uygundur. Generatör dört iletkenli bir şebekeyi besliyor ise, nötr hattı, bobinlerin zigzag olarak bağlanması ile meydana getirilen yapay yıldız noktasına bağlanır (Arrillaga vd. 1985). Generatördeki sargıların üçgen bağlı olması durumunda ise, nötr hattı bulunmadığından sargılar üzerinden üçün katı frekanslarda harmonikli bir akım geçer. Bu akım yükten bağımsızdır ve generatör sargılarında büyük kayıplar meydana getirir.

2.2.4 Ark Fırınları

Ark fırınları, özellikle demir çelik endüstrisinde kullanılan hurda malzemenin elektriksel ark aracılığıyla eritildiği yüksek kapasiteli fırınlar olarak tanımlanmaktadır. Bu fırınların çalışması sırasında oluşan ark direncinin doğrusal olmamasından kaynaklı olarak akım ve gerilim karakteristiğinin de doğrusal olmaması güç sistemlerinde harmonik oluşmasına sebep olmaktadır.

2.2.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma

İçerisinde gaz bulunan bir cam tüpün iki ucundan elektrotlar vasıtasıyla elektrik enerjisi verilerek ışık oluşması prensibiyle çalışan gaz deşarjlı aydınlatma ürünleri (floresanlar, sodyum ve civa buharlı lambalar vb.) sistemde harmonik kaynağı olarak bulunmaktadır. Ayrıca gaz deşarjlı lambaların elektrik arkı oluşturabilmesi için ilk anda yüksek gerilime gereksinimi vardır. Ancak daha sonrasında oluşan ark ile birlikte meydana gelen ışık akısının kararlı hale gelmesi gerekmektedir. Bu da lambanın girişindeki akımın sınırlanması ile olur. Aksi halde lambada aşırı ısınma meydana gelerek lambanın ömrünün kısalmasına neden olur. Elektronik balastlar gaz deşarjlı lambaların ateşlenmesi ve akımlarının sınırlanması amacıyla aydınlatma sistemlerinde kullanılan ekipmanlardır. Ancak balastlar birer anahtarlama elemanı olmaları ve yüksek frekansta çalışmaları nedeniyle sistemde harmonik oluşmasına sebep olmaktadır.

2.2.6 Statik VAR Kompanzatörler

Anlık olarak devreye girip çıkarak değişken bir yük karakteristiği sergileyen sistemlerde reaktif güç kompanzasyonu yapılması için hızlı anahtarlama elemanlarına ihtiyaç vardır. Statik VAR kompanzatörler bu elemanlar vasıtasıyla reaktif güç kompanzasyonu yaparlar. Anahtarlama sürecinde meydana gelen anlık kesintiler ile L ve C elemanlar üzerinden reaktif gücün ayarlanması prensibine göre çalışır. Ancak bu durum sinüzoidal dalga formunda bozulmalara ve dolayısıyla harmonik oluşumuna neden olur (Bilge, 2008; Bozabalı, 2009).

2.2.7 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler ürettikleri elektrik enerjisinin DA formunda olmasından dolayı sistemde kullanılacak enerji formuna dönüştürme ihtiyacı duymaktadır. Bu dönüşüm konvertörler aracılığıyla yapılır ve konvertörlerin anahtarlama elemanı olmalarından kaynaklı olarak harmonikler meydana getirir (Bilge, 2008; Bozabalı, 2009).

2.2.8 Kesintisiz Güç Kaynakları

Kesintisiz güç kaynakları, bağlı oldukları cihazları şebeke gerilimindeki bozulmalara, frekans değişikliklerine ve kesintilere karşı korumak amacıyla kullanılır. Ancak koruma görevini yerine getirmek için enerjinin AA ve DA formları arasında değişimini yapması gerekmektedir. Cihazın girişindeki şebekeden sağlanan alternatif gerilim depolanabilmesi amacıyla doğru gerilim formuna dönüştürülür. Sonrasında bağlı olduğu cihazları besleyebilmesi için tekrar alternatif gerilime çevrilir. Bu dönüşümler sırasında güç elektroniği elemanları ile anahtarlama yaptığından sistemde harmonikler oluşturur (Adak, 2003).

2.2.9 Doğru Akımla Enerji İletimi

Doğru akımla elektrik enerjisi iletilirken AA formunda üretilen elektrik DA formuna dönüştürülür ve hat beslenir. Hat boyunca bu şekilde iletim sağlanır ve kullanıcı tarafında tekrar AA formuna dönüştürülür. Bu dönüşümleri sağlamak için kullanılan konvertörler ise harmonik üreten birer güç elektroniği elemanıdır (Akçay, 2010).

2.2.10 Motor Sürücüler

Motor sürücüler, bir motorun çalışmasını kontrol eden ve içinde IGBT, GTO, tristör gibi anahtarlama elemanları barındıran güç dönüştürücülerinden meydana gelir. Bu sebeple doğrusal olmayan bir yük gibi davranır ve harmonik üretir (Akçay, 2010).

2.3 Harmonik Etkileri

Harmonik kavramı, elektrik güç sistemlerinde hem kaynak sağlayıcılar hem de son kullanıcılar açısından son derece önem arz eden bir kavramdır. Harmoniklerin bir kısmı cihazların tasarımı ve üretimi aşamasında iyileştirilebiliyor olsa da çok büyük bir kısmı güç şebekesi üzerinden sisteme bağlı olan tüm yükleri olumsuz etkilemektedir. Özellikle sanayi ve tıp alanında kullanılan ve şebeke gerilimindeki değişikliklere duyarlılığı olan cihazlar fazlaca etkilenmektedir.

Aslında ideal koşullarda tam sinüzoidal olması beklenen akım ve gerilim dalga şekillerinin sistemde var olan harmonikler nedeniyle bozularak güç şebekesine bağlı ekipmanlar ve sistemler üzerinde meydana getirdiği etkiler şu şekilde sıralanabilir:

- Şebekede gerilimde ani artış-azalış, dalgalanma gibi olaylar sonucu gerilim dalga şeklinin bozulması,
- İletim hatlarında meydana gelen kayıplar nedeniyle oluşan gerilim düşümü,
- Kompanzasyon sistemindeki kondansatörlerin aşırı ısınması ve yüklenmesi sonucu kondansatörlerin dielektrik yapılarının bozulması, ömürlerinin azalması,
- İzolasyon (yalıtım) malzemelerinde delinme,
- Senkron, asenkron motor ve generatörlerde demir ve bakır kayıplarının artması, aşırı ısınma, verimin düşmesi, moment salınımı ve gürültülü çalışma problemleri,
- Şebekedeki seri ve paralel rezonans olaylarına bağlı olarak oluşan aşırı akım ve gerilimler,
- Transformatörlerde aşırı ısınma ve kayıpların oluşması,
- Ölçü aletlerinden elde edilen sonuçlarda meydana gelen hatalar, yanlış ölçüm sonuçları,
- Kesici, röle sigorta gibi koruma elemanlarında hatalı çalışmalar (akımda meydana gelen harmoniklerin cihazların akım kesme yeteneklerini etkilemesi),
- Elektrikli cihazların zarar görmesi ve kullanım ömrünün azalması,
- Güvenlik kamerası ve haberleşme araçlarında gürültülü ve anormal çalışma durumu,
- Güç faktörünün değişmesi sebebiyle meydana gelen reaktif güç kullanımı sonucu oluşan kayıpların enerji maliyetlerini artırması.

Elektrik şebekelerini sistemde bulunan akım ve gerilim harmoniklerinin tüm bu olumsuz etkilerinden korumak ve harmonik değerleri ulusal ve uluslararası standartlarla belirlenen sınırlar içerinde tutmak için bazı önlemler alınması gerekmektedir. Bu da harmoniklerin filtrelenmesi ile mümkün olabilir.

Harmonik bulunduran sistemlerde çoğunlukla 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniğe rastlanmaktadır. Ancak 11. ve 13. harmonikler genlik bakımından temel bileşenle karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Bu nedenle bu harmonik dereceleri genellikle ihmal edilir ve 3., 5. ve 7. harmoniğin giderilmesi ile ilgili önlemler öne sürülür (Kocatepe vd. 2003).

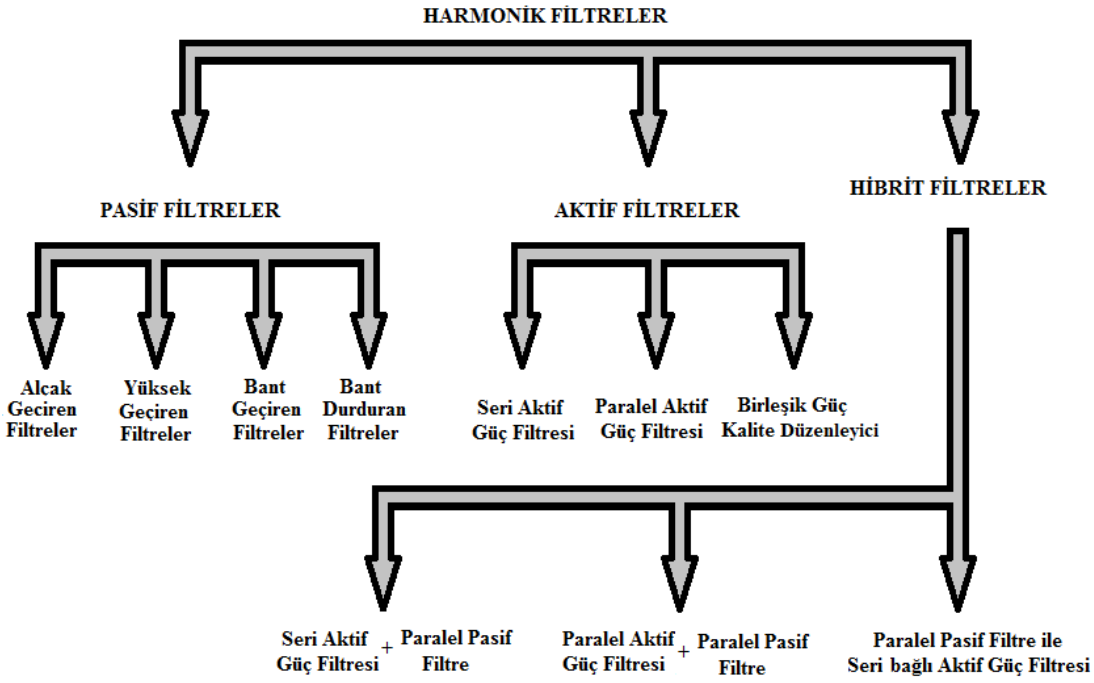
3. HARMONİKLERİ ÖNLEME YÖNTEMLERİ

3.1 Giriş

Harmoniklerin sistem üzerindeki bozucu etkilerini azaltmak ve güç kalitesini artırmak amacıyla sistemdeki dalga şekli bozulmuş akım ve gerilimlerinin düzeltilmesi yani harmonik kompanzasyonu yapılması zorunluluk haline gelmiştir. Bunun için sisteme OBN'de bazı devre elemanlarının eklenmesine ihtiyaç vardır (Sandeep, 2014). Ana devreye eklenen ve istenen harmonik değerlerinin süzülmesini sağlayan bu devreler harmonik filtre adını alır (Kocatepe vd. 2003). Literatürde bu amaçla kullanılan farklı topolojilerde filtreler bulunmaktadır. Bu bölümde bu filtre topolojileri ve özellikleri detaylı olarak incelenecektir.

3.2 Filtrelerin Sınıflandırılması

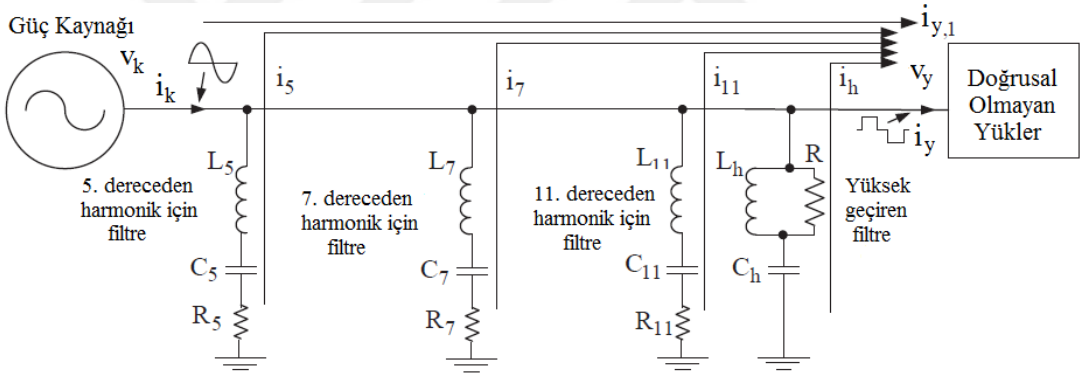
Sistemde bozucu etkilere neden olan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan filtreler genel olarak Şekil 3.1 'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.1 Harmonik filtrelerin sınıflandırılması

3.2.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler (PF), yapısının basit, kurulum maliyetinin düşük ve veriminin yüksek olması nedeniyle geleneksel olarak dağıtım şebekelerinde düşük veya orta gerilim seviyesinde akım harmoniklerinin filtrelenmesinde kullanılmaktadır (Bhatttacharya ve Divan, 1995). Kaynak ile yük arasında bulunan bu filtrenin görevi ayarlandığı frekanstaki harmonikleri bastırmaktır (Karaman, 2018). Güç sistemlerinde reaktif gücün artması veya devrede akım/gerilim harmoniklerinin oluşması halinde sıkıntının giderilmesinde pasif devre elemanları olan kondansatör (C), direnç (R) ve endüktansın (L) farklı bağlantı şekillerinde bağlanarak oluşturduğu pasif filtre topolojileri bulunmaktadır (Tedeschi, 2009). Şekil 3.2'de pasif filtre kombinasyonlarından oluşan ve akım harmoniklerinin bastırılmasında kullanılan bir sistem şeması gösterilmiştir (Manias, 2016).



Şekil 3.2 Akım harmoniklerinin giderilmesindeki pasif filtre kombinasyonu

Pasif filtrelerde devre parametreleri ve topolojileri sisteme özgü olarak ayarlanmakta ve söz konusu sistem üzerindeki istenmeyen harmonik etkiler, düşük ayarlı bir empedans üzerinden toprağa verilmektedir. Ancak pasif filtreler dinamik bir yapıya sahip olmadığından koşullar değiştiğinde filtrenin tekrar tasarlanması gerekir (Akçay, 2010).

Pasif filtrenin kompanzasyon karakteristikleri çok güçlü oranda sistem empedansına bağlıdır ve kaynak ile seri veya paralel rezonans durumlarının oluşmasına karşı hassastır (Bhatttacharya ve Divan, 1995).

Harmonik filtrelemede daha sık kullanılan pasif filtre çeşitleri alçak geçiren filtre ve yüksek geçiren filtrelerdir.

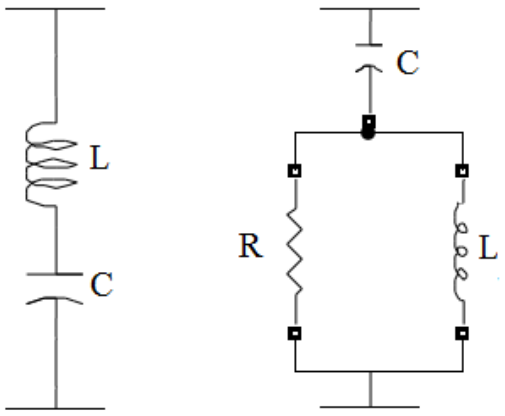
3.2.1.1 Alçak geçiren filtre

Alçak geçiren filtreler, belirli bir kesme frekansından daha küçük harmonik akımlar için düşük empedans sağlamak üzere tasarlanmış bir ayarlı-LC devresidir.

3.2.1.2 Yüksek geçiren filtre

Yüksek geçiren filtreler, belirli bir köşe frekansının üzerindeki harmonik akımlar için düşük empedans gösterir. Bu filtre kullanılarak o köşe frekansının üzerinde bulunan tüm harmonikler filtrelenir. Bu filtre de yine içinde kullanılan pasif filtrelerin sayısına göre tek ayarlı filtre, ikici mertebe sönümlü filtre, üçüncü mertebe filtre vb. şekillerde adlandırılmaktadır (Sandeep, 2014).

Şekil 3.3'de tek ayarlı filtre ve ikinci mertebe yüksek geçiren filtre yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Tek ayarlı filtre ve ikinci mertebeden yüksek geçiren filtre yapıları

Pasif filtrelerin aşağıda listelenen birçok avantajından dolayı harmonik kompanzasyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Bhatttacharya ve Divan, 1995;Das, 2004; El-Saadany, 2001; Turunen, 2009).

- Uygulama kolaylığı,
- Aktif güç filtrelerine göre daha ekonomik uygulama,
- Yüksek verim,
- Az miktarda bakım gerektirmesi,
- Elektromanyetik girişim ve bozulmalara karşı duyarsızlığı,
- Orta güç seviyelerinde uygulanmasının mümkün olması,
- Tek bir pasif filtrenin hem harmonik filtrelemesi hem reaktif güç kompanzasyonu için kullanılabilmesi.

Ancak pasif filtre kullanımının tüm bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Bhatttacharya ve Divan, 1995; Das, 2004; El-Saadany, 2001; Sandeep, 2014).

- Boyutlarının büyük olması,
- Kompanzayon karakteristiklerinin sabit olması,
- Filtre karakteristiklerinin büyük oranda sistem empedansına bağlı olması,
- Bileşenlerin eskimesi, bozulması ve sıcaklık değişimleri nedeniyle ayar frekansı değişmesi,
- Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik akım sirkülasyonu nedeniyle pasif filtrede aşırı yüklenme olasılığı.
- Yük empedansındaki değişiklikler filtreyi bozabileceğinden değişken yükler için uygun olmaması,
- Kaynak veya diğer kompanzasyon elemanları ile girebileceği seri ve / veya paralel rezonans sonucu kararsız çalışma durumunun ortaya çıkma olasılığı.

Pasif filtrelerin kullanımı sırasında oluşan dezavantajları ortadan kaldırabilmek ve daha iyi bir performans elde edebilmek için son zamanlarda daha dinamik filtreleme çözümleri sunan aktif güç filtreleri önerilmiştir.

3.2.2 Aktif Güç Filtreleri

Aktif filtre terimi genel bir terimdir ve güç anahtarlama cihazlarını ve indüktörler ve kapasitörler gibi pasif enerji depolama devre elemanlarını içeren bir grup güç elektroniği devresini ifade eder (El-Habrouk vd. 2000).

İdeal koşullar göz önünde bulundurulduğunda saf sinüzoidal bir kaynaktan beslenen doğrusal yükler şebekeden kaynak gerilimi ile aynı faz ve frekansta ayrıca aynı dalga formunda akım çekmelidir. Eğer böyle bir durum sağlanabilseydi güç faktörü ve THB değeri 0'a yakınsayacağından sistemde reaktif güç kavramından hiç bahsetmezdik. Ancak mevcut durumda sistemlerdeki yüklerin lineer olmamasından kaynaklı olarak yük akımının dalga şeklinde bozulmalar ve buna bağlı olarak harmonik bileşenler meydana gelir. Endüktif ve kapasitif yüklerden dolayı yük geriliminde faz farkı ve böylece kaynaktan reaktif güç çekilmesi sık karşılaşılan bir durumdur. Bazı durumlarda hem harmonik oluşumu hem de reaktif güç çekilmesi aynı anda meydana gelir. Aynı şekilde kaynak geriliminin de genlik ve frekansının sürekli ve sabit olması, sinüzoidal formunun bozulmaması gerekmektedir. Fakat büyük yükteki kullanıcıların sistemden harmonikli akım çekmesi kaynak empedansında büyük değişimler meydana getirmekte bu nedenle de kaynak geriliminde aşırı düşüş ve artışlar yaşanmaktadır (Doğan, 2016).

Aktif güç filtreleri temelde DA güç kaynağı, güç devresi, AA filtresi ve kontrol devresi olmak üzere dört kısımdan meydana gelmektedir. Güç devresi, filtre akımı veya gerilimini oluşturmak için anahtarlama yapan MOSFET, IGBT gibi elemanlardan oluşur. Sistemin farklı noktalarından alınan akım veya gerilim bilgileri aracılığıyla bu elemanların anahtarlamasının kontrol edilmesi gerekir. DA güç kaynağı filtrenin doğru bir şekilde kompanzasyon yapması için gerekli besleme geriliminin elde edilmesinde kullanılır. Burada aktif güç filtresinin temel amacı, şebekeye enjekte edilecek kontrol edilebilir tek veya üç fazlı akım veya gerilimleri sağlamaktır (Sadeq, 2014).

Aktif Güç Filtreleri (AGF) genellikle düşük ve orta gerilim güç kaynaklarındaki akım harmoniklerini kontrol etmek ya da yüksek gerilim dağıtım seviyelerinde reaktif güç ve gerilim kontrolü için kullanılırlar (Gali vd. 2017).

AGF'nin amacı, sistemdeki harmonikleri yok etmektir ancak bunu yaparken aslında bir harmonik kaynağı olarak çalışır. Aktif güç filtrelerinde, çeşitli kontrol algoritmaları kullanılarak şebeke akım veya gerilim dalgalarının saf sinüzodidal yapısında, sistemdeki harmoniğin sebep olduğu sapma tespit edilir ve belirlenen miktarda harmonik akım veya gerilimler, eşit büyüklükte ve ters fazda olacak şekilde kaynak ile yük arasında ortak bağlantı noktasında sisteme entegre edilir (Akçay, 2010).

Bu filtreler sistemde harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, nötr hattı akımı kompanzasyonu, gerilim harmoniklerinin eliminasyonu, gerilim dalgalarını bastırmak, ani gerilim yükselmelerini kompanze etmek, üç fazlı sistemleri dengelemek gibi birçok amaçla kullanılabilmektedir (Akmaz, 2012).

Aktif güç filtreleri pasif filtrelerle karşılaştırıldığında bazı avantajları ön plana çıkmaktadır ancak buna karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Manias, 2016; Sadeq, 2014).

Aktif güç filtresi kullanmanın avantajları;

- Güç sistemini, harmonik bileşenin değerine ve frekansına otomatik olarak ayarlama imkanı bulunmaktadır.
- Güç sistemini aşırı yükleme veya rezonans etkisi yaratma tehlikesi yoktur.
- Yük değişimlerine karşı otomatik olarak ayarlanabilmektedir.
- Aynı filtre ile seçilen farklı harmonik bileşenler ortadan kaldırılabilir.
- Güç sistemine bağlantısı kolaydır.
- Reaktif güç kompanzasyonu yapabilir.
- Esnek yapısı sayesinde kolaylıkla genişleme imkanı vardır.
- Fiziksel boyutları daha küçüktür.

Dezavantajları;

- Uygulamaları daha karmaşıktır.
- Maliyetleri daha yüksektir

- Daha yüksek güç kayıplarına neden olurlar.

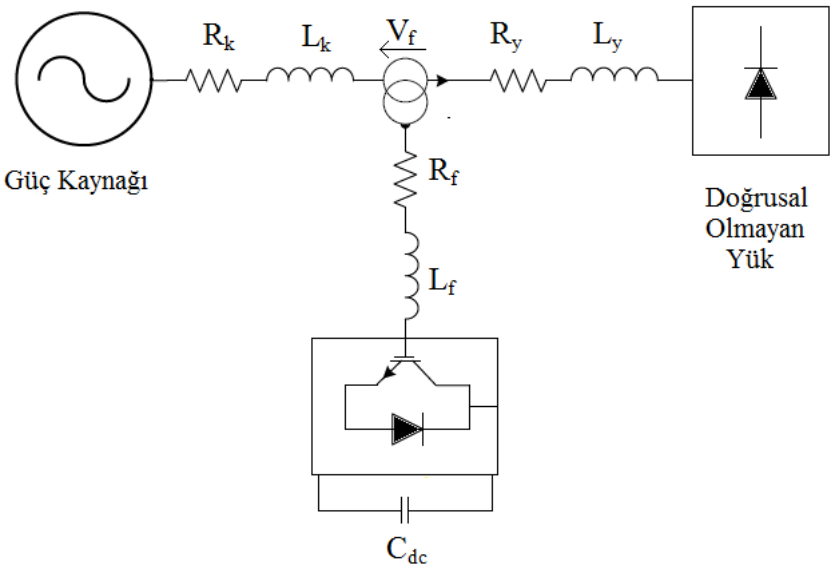
AGF'ler topolojik yapılarına göre, evirici yapısına ve faz sayısına göre gruplandırılabilir (Singh vd. 1999).

3.2.2.1 Topolojik yapılarına göre aktif güç filtreleri

Aktif güç filtreleri topolojik yapılarına göre Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF), Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF) ve Birleşik Güç Kalite Düzenleyici (BGKD) olmak üzere üç grupta incelenebilir:

3.2.2.1.1 Seri aktif güç filtresi

Seri aktif güç filtreleri (SAGF), genellikle şebekede meydana gelen ve yükü etkileyen daha çok gerilim kaynaklı güç kalitesi sorunlarının giderilmesinde, gerilim harmoniklerinin filtrelenmesinde kullanılmaktadır. Seri aktif güç filtresinin devre şeması gösterimi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Seri aktif güç filtresi devre şeması

Seri aktif güç filtrelerinde güç devresinin sisteme seri olarak bağlanabilmesi için kuplaj trafosu kullanılır. Bu konfigürasyondaki aktif filtre, yük tarafında saf sinüzoidal gerilim dalga formunu sağlamak için kaynak geriliminden anlık olarak alınan bilgileri

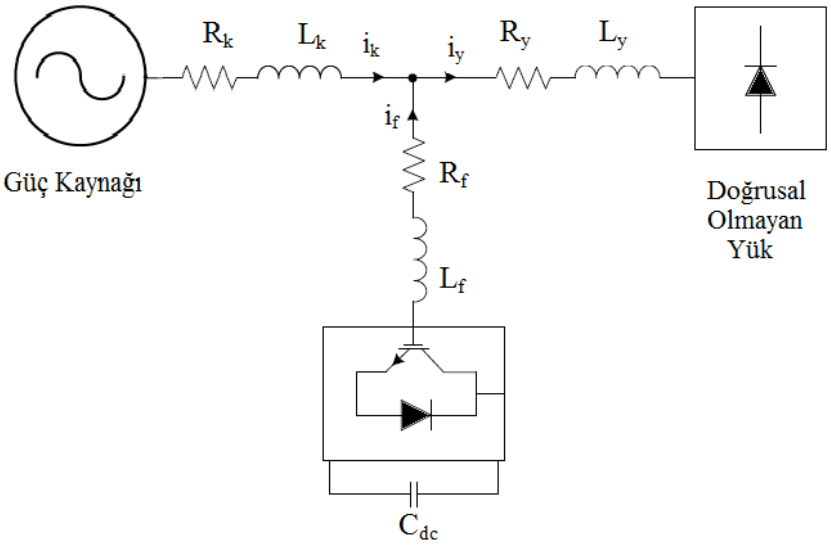
işler ve bir anahtarlama işareti üretir (El-Habrouk vd. 2000; Fujita vd. 1997). Böylece sisteme bağlandığı noktadaki gerilimi tespit ederek buradaki dalga formu ile eşit büyüklükte fakat ters fazda bir harmoniği seri kuplaj trafosu vasıtasıyla sisteme enjekte eder. Ayrıca, SAGF yük ile kaynak arasına seri bağlandığı için harmonik akımlarına karşı yüksek empedans göstererek kaynak ile yük arasında harmonik izolasyon oluşturur (Akçay, 2010; Karaman, 2018). Kuplaj trafosu bir akım trafosu olarak kabul edilebilir ve yük tarafındaki arızalara karşı filtrenin korunmasında da pay sahibidir (Sadeq, 2014).

Elektrik şebekesi ile doğrusal olmayan yükler arasına bir seri aktif güç filtresi yerleştirilerek kaynak geriliminde meydana gelen gerilim çökmesi, sıçraması, kısa süreli kesintiler, gerilim dalgalanması ve gerilim dengesizlikleri gibi olumsuzluklar kompanze edilebilmektedir (Akçay, 2010; Manias, 2016). Bu sayede özellikle sanayide ve tıp alanında kullanılan ve kaynak gerilimde meydana gelecek bozulmalara karşı aşırı duyarlı olan yüklerin korunması sağlanabilmektedir.

3.2.2.1.2 Paralel aktif güç filtresi

Paralel aktif güç filtreleri (PAGF), genellikle yükte oluşan akım harmoniklerinin şebeke üzerinde bozucu yarattığı bozucu etkilerin filtrelenmesinde kullanılmaktadır.

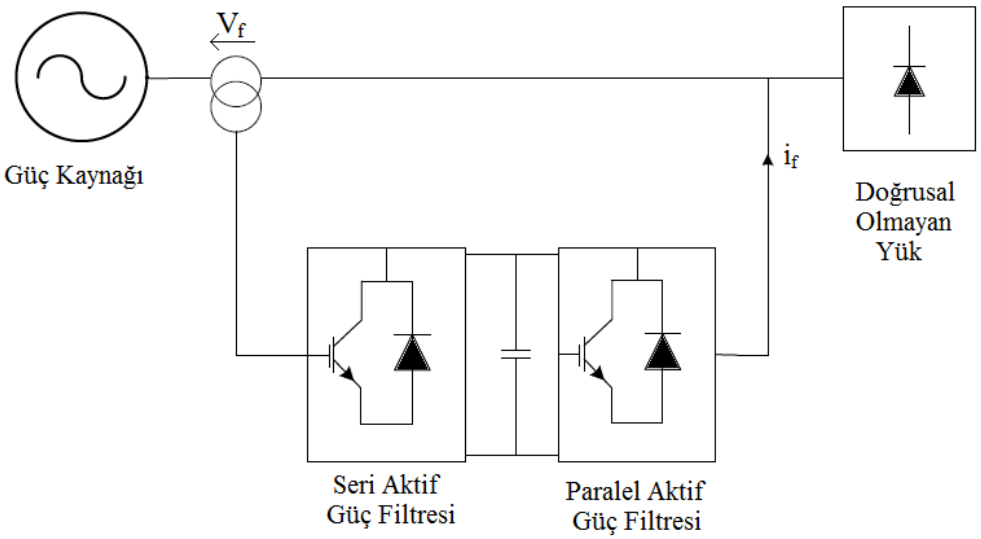
Paralel aktif güç filtreleri OBN'de sisteme paralel olarak bağlanarak, sisteme doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akıma eşit büyüklükte fakat ters fazda bir harmonik akım enjekte eder. Bu sırada kontrollü bir akım kaynağı olarak davranır. (Manias, 2016). Bu sayede yük akımında meydana gelen harmoniklerin kaynak tarafını etkilememesi için hem harmonik akım hem de reaktif güç kompanzasyonu yapmayı hedefler. Paralel aktif güç filtresinin devre şeması gösterimi Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Paralel aktif güç filtresi devre şeması

3.2.2.1.3 Birleşik güç kalite düzenleyici

Birleşik Güç Kalite Düzenleyicileri (BGKD, Unified Power Quality Conditioner-UPQC), hem seri hem de paralel aktif güç filtresi topolojilerini bir arada kullanarak her iki filtrenin harmonikler üzerindeki etkileri üzerinden faydalanmak ve hem sinüzoidal akım hem de sinüzoidal gerilim elde etmek için oluşturulan yapıdır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi devre şeması Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Birleşik güç kalite düzenleyicisi devre şeması

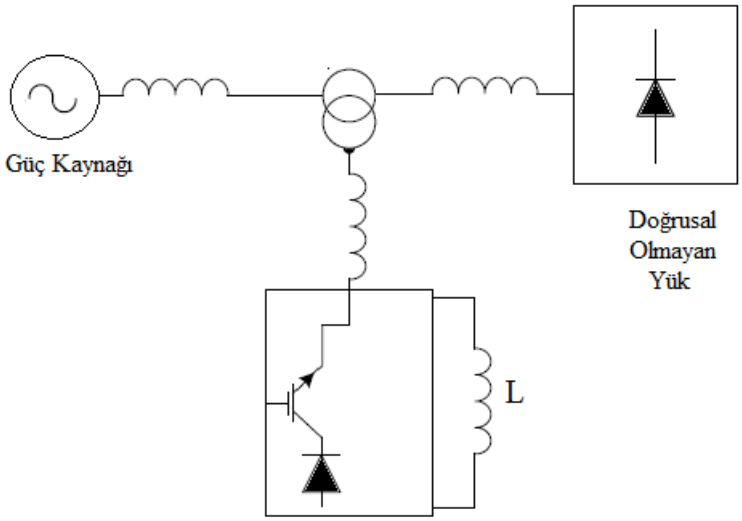
Genel olarak bilgisayar, tıbbi cihazlar gibi hassas yükler için idealdir. Ancak maliyeti yüksektir ve içerdiği yarıiletkenlerin fazla olmasından kaynaklı olarak kontrol edilmesi daha zordur.

3.2.2.2 Evirici yapısına göre aktif güç filtreleri

Aktif güç filtrelerinin yapısında kullanılan eviriciler Akım Kaynaklı Evirici (Current Source Inverter - CSI) ve Gerilim Kaynaklı Evirici (Voltage Source Inverter - VSI) olmak üzere iki grupta incelenebilir.

3.2.2.2.1 Akım kaynaklı evirici

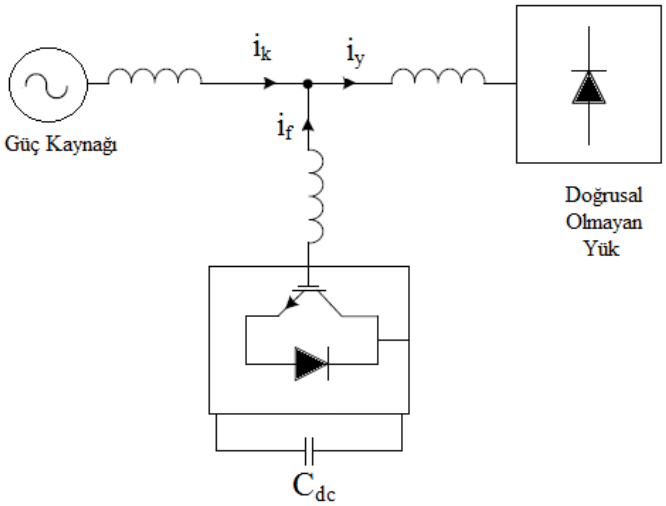
Akım kaynaklı eviricilerde (AKE) DA bağ tarafında enerji depolama elemanı olarak bobin bulunmaktadır. Ekonomik olmaması, kontrolünün zor olması ve kayıplarının fazla olması nedeniyle çok sıklıkla kullanılmamaktadır. Ancak; doğrudan doğruya akımı anahtarladıkları için tepki sürelerinin hızlı olması ve endüktansın akımını sınırlayıp kısa devre koruması sağlaması gibi avantajları da bulunmaktadır (Bozabalı, 2009; Karaman, 2018). Şekil 3.7'de akım kaynaklı evirici yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Akım kaynaklı evirici ile SAGF

3.2.2.2.2 Gerilim kaynaklı evirici

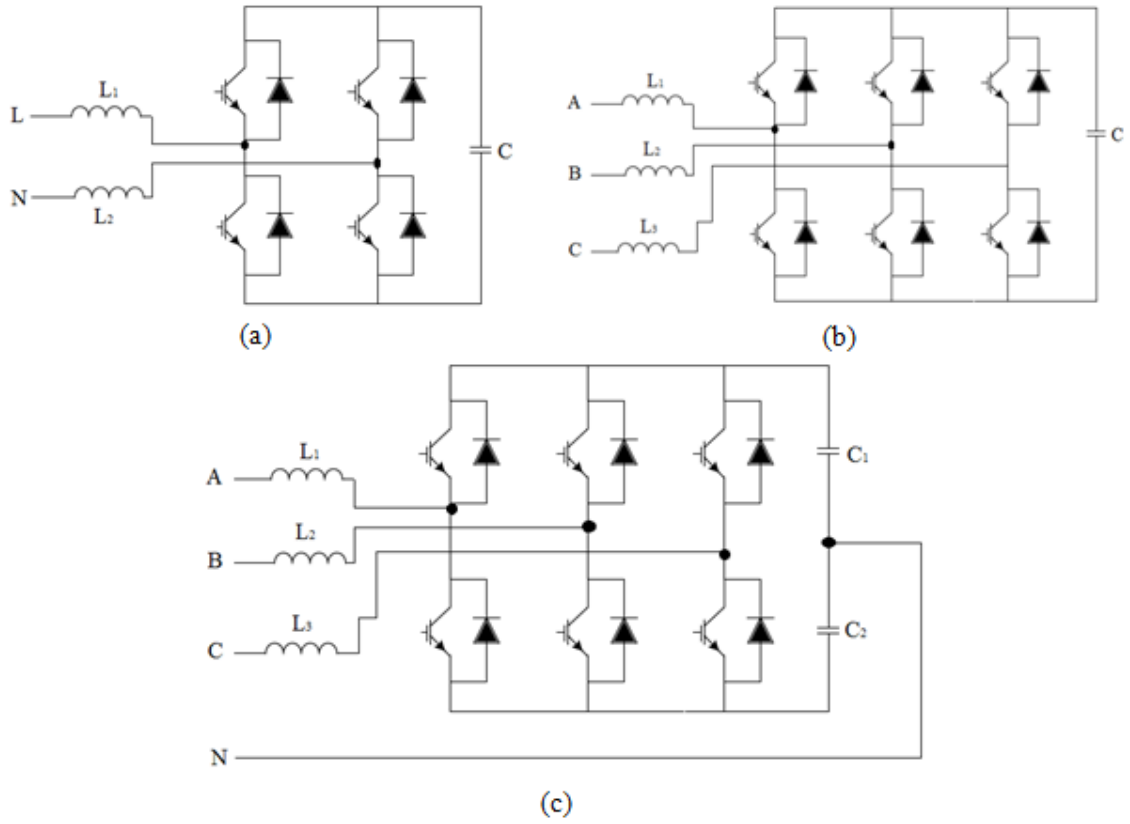
Gerilim kaynaklı eviricilerde ise DA bağ tarafında enerji depolama elemanı olarak kondansatör bulunur. Akım kaynaklı eviricilerle karşılaştırıldığında, bu yapıdaki aktif güç filtrelerinin veriminin daha yüksek, kuruluş maliyetinin daha düşük ve denetiminin daha kolay olması gibi üstünlüklerinden dolayı aktif güç filtresi uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir (Bozabalı, 2009; Karaman, 2018; Singh vd. 1999). Şekil 3.8'da gerilim kaynaklı evirici gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Gerilim kaynaklı evirici ile PAGF

3.2.2.3 Faz sayısına göre aktif güç filtreleri

Yükün beslendiği kaynak veya yük sisteminin tek fazlı ve üç fazlı olmasına bağlı olarak farklı AGF yapıları ve kontrol stratejileri belirlenir. Üç fazlı sistemler ise AGF'nin kullanacağı nötr hattının olup olmadığına bağlı olarak üç fazlı-üç telli veya üç fazlı-dört telli sistemler olarak gruplandırılabilir. Ancak üç faz-dört telli sistemler nötr akım kompanzasyonu gereksinimi duyduğundan dolayı büyük güç kalitesi sorunları oluşturmaktadır (Singh vd. 1999; Tedeschi, 2009). Şekil 3.9'da tek fazlı (iki telli), üç fazlı-üç telli ve üç fazlı-dört telli evirici konfigürasyonları gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Faz sayısına göre aktif güç filtreleri
a) Tek fazlı-iki telli b) Üç fazlı-üç telli c) Üç fazlı-dört telli

Evlerde kullandığımız floresan lambalar ve fırınlar, TV'ler, bilgisayar güç kaynakları, klimalar, lazer yazıcılar ve fotokopi makineleri gibi tek fazlı yükler doğrusal olmayan yüklerdir ve güç kalitesi sorunlarına neden olur. Bu tip yükler nedeniyle meydana gelen harmonikler tek fazlı eviriciye sahip aktif güç filtreleri aracılığıyla filtrelenir.

Üç fazlı ayarlanabilir hız sürücüleri gibi nötr iletkeni bulunmayan yükler şebekeden harmonikli akım ve reaktif güç çekmektedir. Ancak nötr hattı bulunmadığından nötr akımı ile ilgili bir sorun oluşmamakta, faz akımları dengeli dağılmaktadır. Bu tip yüklerin oluşturduğu bozucu etkiler ve harmoniklerin filtrelenmesinde üç fazlı-üç telli eviricili aktif güç filtreleri kullanılır.

Özellikle bilgisayar güç kaynakları, floresan aydınlatma vb. gibi doğrusal olmayan dengesiz yüklerin üç fazlı-dört telli şebekeden beslendiği durumlarda harmonik oluşumu ve reaktif güç tüketimi haricinde sistemde akım dengesizliği ve aşırı nötr akım sorunu ortaya çıkmaktadır. Tek fazlı yüklerin neden olduğu bu sorunların

giderilmesinde tek fazlı aktif güç filtrelerinin kullanılamadığı durumlarda OBN'de üç fazlı-dört telli eviriciden oluşan aktif güç filtresi kullanılmalıdır (Doğan, 2016).

3.2.3 Karma (Hibrit) Filtreler

Aktif güç filtreleri (AGF) ile pasif filtrelerin (PF) birlikte kullanıldığı yapılar karma (hibrit) filtre olarak adlandırılırlar. Bu yapılar hem aktif hem de pasif filtrenin sahip olduğu avantajları birleştirerek hem ekonomik bir çözüm sunmakta hem de filtre boyutlarını önemli oranda düşürmektedir. Pasif filtre hem devrenin reaktif güç ihtiyacını karşılamakta hem de düşük dereceli harmonikleri (genellikle 3., 5. veya 7.) baskılayarak aktif güç filtresinin maliyetini ve derecesini azaltmaktadır (Karaman, 2018). Literatürde karma filtre üzerine yapılmış çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu çalışmalarda ortaya çıkan karma filtre yapılarından bazıları aşağıda incelenmiştir.

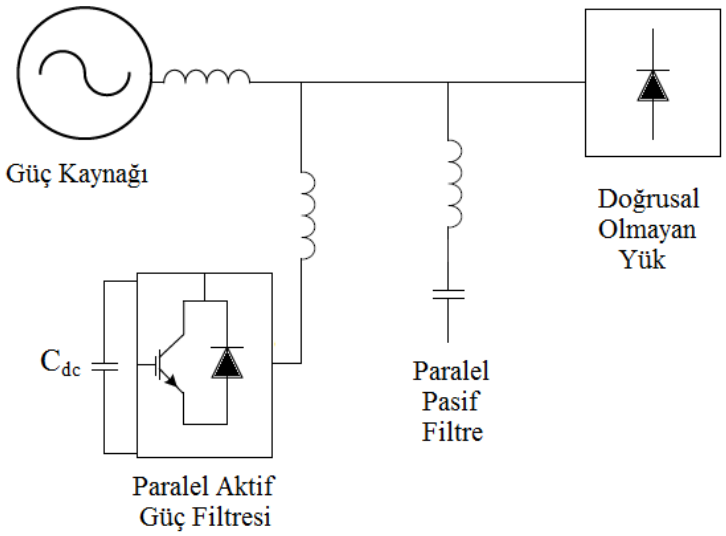
3.2.3.1 PAGF+PPF

Aktif güç filtrelerinin güç derecesi, boyutlarının azaltılması ve maliyetinin düşmesi filtrelediği harmoniklerin derecesine bağlıdır. Bu nedenle, bu topolojide kullanılan pasif filtreler ayarlandıkları yüksek dereceli harmonikleri filtrelerken aktif güç filtresi daha düşük dereceli harmonikleri filtreleme görevini üstlenecek ve böylece aktif güç filtresinin güç seviyesi, boyutu ve maliyeti azalacaktır. Harmoniklerin filtrelenmesinde paralel aktif güç filtresi ile birlikte paralel pasif güç filtrelerinin de kullanılmasıyla oluşturulan karma filtre yapısı Şekil 3.10'da gösterilmektedir (Durna, 2018; Sandeep, 2014).

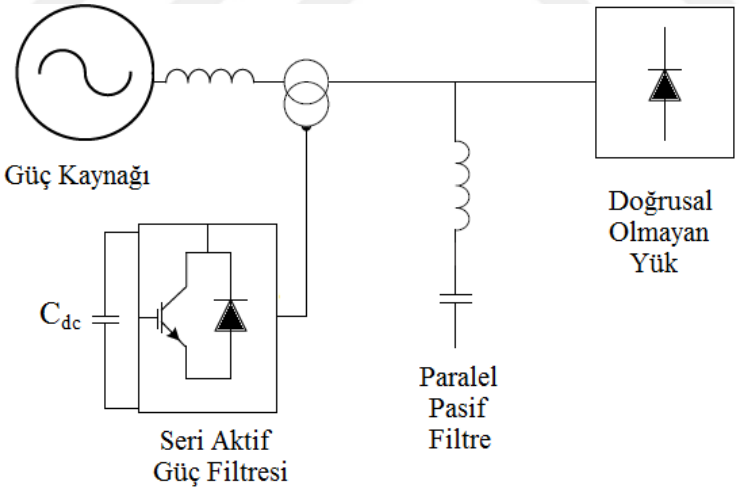
3.2.3.2 SAGF+PPF

Bu topolojide AGF, gerilim harmoniklerini bastırmak ve kuplaj trafosunun her iki tarafındaki gerilimi düzenlemek için kullanılırken, paralel pasif filtre akım harmoniklerini bastırmak için tasarlanır. Sadece SAGF kullanılan devre topolojisi ile karşılaştırıldığında aktif güç filtresinin güç seviyesi, boyutu ve maliyeti azalmış olacaktır (Durna, 2018).

Konfigürasyon, ne kadar cazip olursa olsun, seri aktif filtrelere olan ilginin azlığı nedeniyle henüz kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir (El-Habrouk vd. 2000). Şekil 3.11'de seri aktif güç filtresi ile paralel pasif filtreden oluşan devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.10 PAGF+PPF karma filtre devre şeması

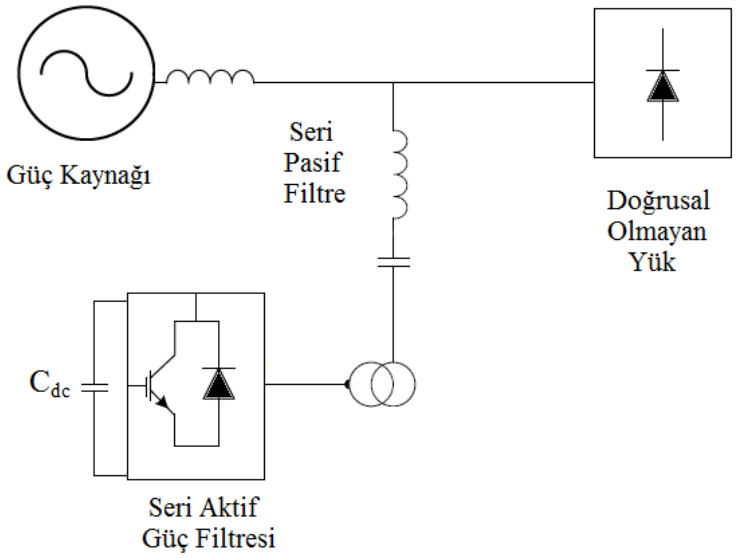


Şekil 3.11 SAGF+PPF karma filtre devre şeması

3.2.3.3 Paralel pasif filtre ile seri bağlı AGF

Paralel pasif filtre ile seri bağlı bir aktif güç filtresinden oluşan bu konfigürasyonun avantajı, pasif filtrenin aktif güç filtresinde bulunan güç elektroniği anahtarları üzerindeki baskıyı azaltmasıdır. Bu filtre daha çok orta ila yüksek gerilim

seviyelerinde uygulanır (Sandeep, 2014). Bu filtre konfigürasyonun devre şeması Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 PPF ile seri bağlı AGF Karma filtre devre şeması

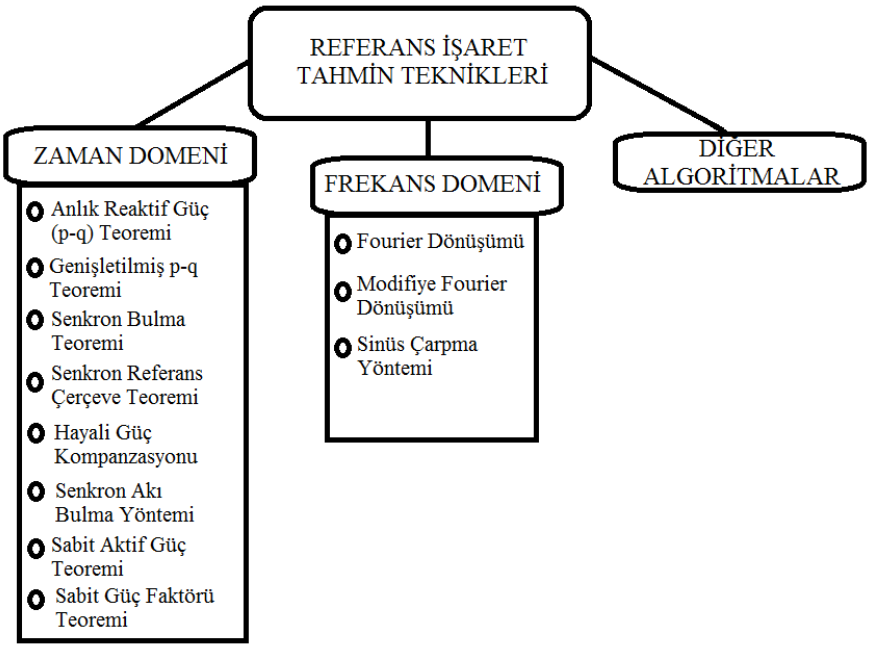
Hangi durumlarda hangi filtre yapısını kullanmak gerektiği konusu bu çalışma alanında en önemli hususu teşkil etmektedir. Dolayısıyla harmonik filtreleme alanında çalışan veya bu konuya ilgi gösteren kişilere yol gösterici olması bakımından Tablo 3.1'de belirli uygulama hususları için AGF seçimi ile ilgili özet bilgi gösterilmiştir. Burada * sayısı filtrenin devre üzerindeki etki derecesini göstermektedir (Karaman, 2018; Manias, 2016; Singh vd. 1999).

Tablo 3.1 Belirli Uygulama Hususları için AGF Seçimi

Kompanzasyon Uygulanacak Durumlar	SAGF	PAGF	SAGF+PPF	PAGF+SPF
Akım Harmonikleri		**	***	*
Reaktif Güç		***	**	*
Yük Dengeleme		*		
Nötr Akımı		**	*	
Gerilim Harmonikleri	***		**	*
Gerilim Düzenlemesi	***	*	**	*
Gerilim Dengelemesi	***		**	*
Gerilim Dalgalanması	**	***	**	*
Gerilim Çökmesi ve Sıçraması	***	*		

4. REFERANS İŞARET TAHMİN YÖNTEMLERİ

Aktif güç filtrelerinin kontrolü üç aşamada gerçekleşir. Kontrolör tarafından işlenecek referans işaretin belirlenmesi, AGF'nin performansını belirleyen ve sistemin doğru çalışmasını sağlayan temel bileşendir. Burada ilk aşama doğru sistem değişkenleri bilgilerini toplamak için güç transformatörleri, hall sensörleri ve izolasyon amplifikatörleri kullanılarak gerekli gerilim/akım sinyallerinin saptanmasıdır (Singh vd. 1999). Bu aşamada belirlenecek olan veriler; gerilim değişkenleri için AC kaynak gerilimi, AGF'nin DC bağ gerilimi ve kuplaj trafosu boyunca gerilim; akım değişkenleri için AGF'nin yük akımı, AC kaynak akımı, kompanzasyon akımı ve DC-bağ akımıdır. İkinci aşamada, kontrol yöntemlerine ve AGF topolojisine bağlı olarak akım veya gerilim seviyeleri açısından referans işaretler türetilir. Kontrolün üçüncü aşamasında ise anahtarlama sinyalleri PWM, histerezis, kayan mod veya bulanık mantık tabanlı kontrol teknikleri kullanılarak üretilir (Singh vd. 1999). Gerilim ve akım seviyeleri açısından referans sinyalleri belirlemek için frekans domeni veya zaman domeni yöntemleri kullanılır. Şekil 4.1'de Referans İşaret Tahmin Teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Referans işaret tahmin teknikleri

Referans işaretlerin doğru tahmin edilmesinin filtrenin performansını etkileyen en önemli faktör olduğu göz önüne alındığında doğru teknikle çalışmanın ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Referans işaretlerin yanlış tahmin edilmesi sonucu yanlış kompanzasyon ve bunun sonucu olarak da filtrenin performansında olumsuzluklar meydana gelmektedir (Karaman, 2018).

4.1 Frekans Domeni Teknikleri

Frekans domeni teknikleri uygulanırken ilk olarak sistemdeki hall sensörü, güç trafosu gibi ekipmanlar tarafından harmonikli akım ve/veya gerilimler tespit edilir. Bu harmonikler periyodik birer işaret olduğundan Fourier analizine tabi tutulur. Bu yöntemle daha önce tespit edilen harmonikli işaretin içinden temel bileşen ayrıştırılarak bozulmaya neden olan esas harmonikli işaret elde edilir. Daha sonra bu işarete Ters Fourier Dönüşümü uygulanarak AGF'nin kontrolü için gerekli referans işaretler elde edilmiş olur (Uçar, 2012).

Etkili kompanzasyon için genellikle AGF cihazının anahtarlama frekansı kompanze edilen en yüksek harmonik frekansının iki katından fazla tutulur. Fourier dönüşümünün uygulanmasında kullanılan hesaplama yoğunluğu oldukça külfetlidir ve bu da tepki süresinin uzamasına neden olur (Singh vd. 1999).

4.2 Zaman Domeni Teknikleri

Zaman domeni yaklaşımı, harmonikli gerilim ve akım sinyallerinden yola çıkarak referans sinyalin anlık olarak tahminine dayanır. Sistemde sürekli anlık veri işlendiğinden dolayı güç sistemindeki değişikliklere karşı tepki hızı yüksek, uygulanması ve hesaplaması daha kolay bir yöntemdir. Bu nedenle frekans domeni tekniklerine göre daha sık kullanım alanı vardır (Karaman, 2018).

Yapılan çalışmalar incelendiğinde sabit aktif güç teoremi, sabit güç faktörü teoremi, hayali güç kompanzasyonu, senkron akı algılama algoritması gibi farklı bir çok teknikle karşılaşılmış olsa da Anlık Reaktif Güç Teorisi (ARGT) ve Senkron Referans Çerçeve Yöntemi (SRÇY) en çok kullanılan referans işaret belirleme yöntemidir. Bu

nedenle tezin bu kısmında üç fazlı üç telli SAGF için uygulanan ARGT ve SRÇY detaylı olarak incelenecektir.

4.2.1 Anlık Reaktif Güç Teoremi

Anlık Reaktif Güç Teorisi (ARGT) bir diğer bilinen adıyla p-q teoremi ilk olarak 1980'lerin başında "Akagi" tarafından ortaya atılmıştır. Bu teorem, üç fazlı gerilimleri ve akımları iki fazlı αβ durağan yapıya dönüştüren ve eşitliği denklem (4.1)'de verilen Clarke dönüşümüne dayanmaktadır. Bu yöntem yalnızca simetrik, sinüzoidal 3-fazlı devrelere uygulanabilmektedir (Uçar, 2012).

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Burada x, akım ya da gerilimden herhangi birini temsil etmektedir. Seri aktif güç filtresinde ARGT için eşitlikler denklem (4.2) ve (4.3)'deki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ya} \\ V_{yb} \\ V_{yc} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Burada V_{ya}, V_{yb}, V_{yc} ile gösterilen büyüklükler 3-fazlı yük gerilimini, I_{ka}, I_{kb}, I_{kc} ile gösterilen büyüklükler 3-fazlı kaynak akımlarını göstermektedir.

Bu dönüşüm sonrasında oluşan parametreler ile doğrusal olmayan yükün bir DC bileşeni ve bir AC bileşeninden oluşan anlık aktif ve reaktif gücü hesaplanır. 3-fazlı sistemlerde anlık aktif ve reaktif gücün hesaplanmasında ait eşitlikler denklem (4.4), (4.5) ve (4.6)'da gösterilmiştir.

$$p = V_\alpha . I_\alpha + V_\beta . I_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \tag{4.4}$$

$$q = V_\beta . I_\alpha - V_\alpha . I_\beta = \bar{q} + \tilde{q} \tag{4.5}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_\alpha & I_\beta \\ -I_\beta & I_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

Denklem (4.4)'deki p (aktif güç) ifadesinde; $\bar{p}$ anlık aktif gücün DA bileşenini (temel bileşen), $\tilde{p}$ ise anlık aktif gücün AA bileşenini (harmonikli bileşen) gösterir. Denklem (4.5)'deki q (reaktif güç) ifadesinde ; $\bar{q}$ çekilen anlık reaktif gücün DA bileşenini (temel bileşen), $\tilde{q}$ ise anlık reaktif gücün AA bileşenini (harmonikli bileşen) gösterir. Denklemlerdeki V_α ve V_β üç fazlı yük geriliminin I_α ve I_β ise üç fazlı kaynak akımının Clarke dönüşümü sonrası elde edilen ifadelerdir.

Bu denklemden hareketle referans gerilimlerin elde edileceği matris eşitliği denklem (4.7)'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_\alpha & I_\beta \\ -I_\beta & I_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Burada anlık aktif ve reaktif gerilim parametreleri α ve β düzleminde ayrı ayrı değerleri hesaplanır.

α ekseninin anlık aktif gerilim değeri denklem (4.8)'de;

$$V_{\alpha p} = \left(I_\alpha \,/\, \left(I_\alpha^2 + \, I_\beta^2 \right) \right) p \tag{4.8}$$

α ekseninin anlık reaktif gerilim değeri denklem (4.9)'da;

$$V_{\alpha q} = \left(-I_\beta \,/\, \left(I_\alpha^2 + \, I_\beta^2 \right) \right) q \tag{4.9}$$

β ekseninin anlık aktif gerilim değeri denklem (4.10)'da;

$$V_{\beta p} = \left(I_\beta \,/\, \left(I_\alpha^2 + \, I_\beta^2 \right) \right) p \tag{4.10}$$

β ekseninin anlık reaktif gerilim değeri denklem (4.11)'de;

$$V_{\beta q} = \left(I_\alpha \,/\, \left(I_\alpha^2 + I_\beta^2\right)\right) q \tag{4.11}$$

gösterilmiştir.

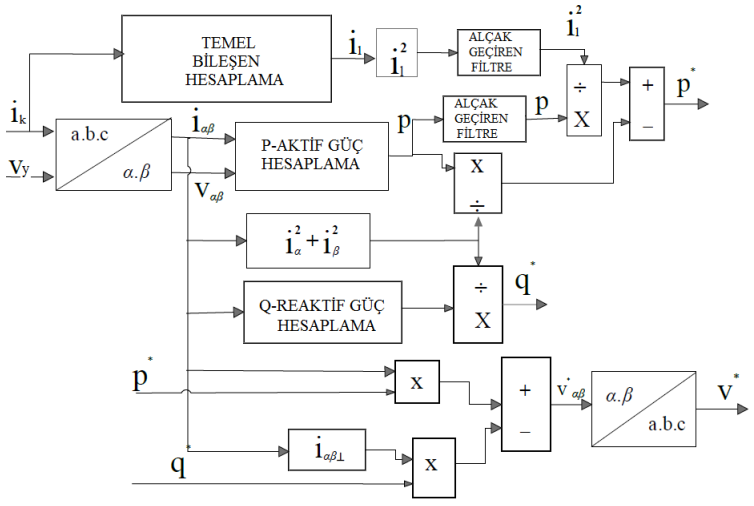
Denklem (4.4) ve (4.5)'de yer alan güç ifadelerinde harmonikli bileşenlerin uygun pasif filtreler aracılığıyla süzülmesi sonucu referans gerilimleri elde edebileceğimiz matematiksel ifade denklem (4.12)'deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha-ref} \\ V_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_\alpha^2 + I_\beta^2} \begin{bmatrix} I_\alpha & I_\beta \\ -I_\beta & I_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

Denklem (4.12) ile elde edilen α-β düzlemindeki referans işaretler Ters Clarke dönüşümü ile tekrar a-b-c eksenine tekrar dönüştürülerek denklem (4.13)'deki eşitlik elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{a-ref} \\ V_{b-ref} \\ V_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha-ref} \\ V_{\beta-ref} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Bu eşitlik sonucunda seri aktif güç filtresini tetikleyecek referans gerilimler elde edilmiş olur. SAGF'nin anlık reaktif güç teorisi kullanılarak oluşturulan kontrol stratejisine ait akış şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



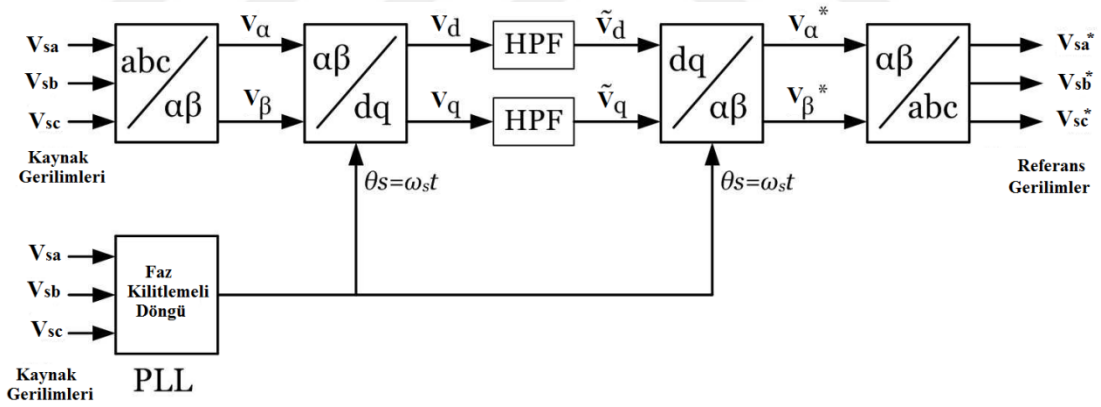
Şekil 4.2 Referans gerilimlerin üretilmesinde kullanılan kontrol bloğu

4.2.2 Senkron Referans Çerçeve Yöntemi

SRÇY ile referans gerilimlerin oluşturulmasına ait diyagram Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi gerilimlerin fazı, üç fazlı bir Faz Kilitlemeli Döngü (FKD, Phase Loop Lock-PLL) kullanılarak bulunur. FKD, gerilim vektörünün tam açısal konumunun belirlenmesi için çok önemlidir. FKD'deki herhangi bir hata, referans işaretlerin oluşturulmasında hatalara yol açar (Sadeq, 2014).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Bu yöntemde, üç fazlı gerilimler, denklem (4.14)'te verilen Park dönüşümü kullanılarak d-q dönen referans yapı bileşenlerine dönüştürülür. Sonrasında bu sonuçlar filtrelenir ve gerilimin temel frekans bileşenleri ile harmonik bileşenleri ayrıştırılır (Uçar, 2012).



Şekil 4.3 Senkron referans çerçeve yönteminde gerilim referansının oluşturulması

Gerilimin harmonik bileşenleri elde edildikten sonra ters park dönüşümü uygulanarak referans gerilimler üretilerek filtrenin girişine gönderilir. Burada uygun kontrol yöntemleri uygulanarak sisteme enjekte edilecek harmonikli gerilimler oluşturulur ve ortak bağlantı noktasında enjekte edilir.

5. ADAPTİF HARMONİK ENJEKSİYONU ALGORİTMASI İLE SAGF KONTROLÜ

5.1 Giriş

Referans işaretlerin doğru tespit edilmesi ve bu referans işaretlere göre doğru anahtarlama sinyallerinin üretilmesi aktif güç filtrelerinin filtre performansını büyük ölçüde etkiler. Aktif filtrelerin kontrolü için referans işaretlerin üretilmesi hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde zaman ve frekans domeninde algoritmalarına sıklıkla rastlanmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında önerilen algoritma adaptif çevrimiçi tahminler yapabilen ve Normalize Edilmiş En Küçük Kareler (NEKK, Normalized Least Mean Square - NLMS) yöntemine dayanan Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) algoritmasıdır.

AHE algoritma kullanılarak, seri aktif güç filtresinin doğru anahtarlanabilmesi için gerekli referans işaretlerinin uygun faz ve genlik değerlerinde çevrimiçi ve anlık olarak tahmin edilerek üretilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için herhangi bir frekanstaki harmoniğin açısının sinüs ve kosinüs değerleri uygun ağırlık parametreleri ile çarpılarak istenilen genlik ve faza sahip bir harmonik işaret elde edilmektedir. Daha sonrasında elde edilen bu referans işaretlerin eşit genlik ve ters fazda sisteme entegre edilebilmesi için seri aktif filtre yapısındaki eviriciyi tetikleyecek olan uygun anahtarlama işaretlerinin üretilmesi gerekmektedir. Bunun için filtrenin topolojisine ve evirici yapısına uygun denetleme yöntemleri kullanılmalıdır (Karaman, 2018). Bu tez çalışmasında bu amaçla, Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM-Space Vector Pulse Width Modulation - SVPWM) kullanılmıştır.

Tezin bu kısmında Adaptif Harmonik Enjeksiyonu algoritması ve bu algoritmaya bağlı diğer alt algoritmalar ve Uzay Vektör DGM üzerinde durulmuştur. Ayrıca AHE algoritması kullanılan bir SAGF'nin Matlab R2021a versiyonuyla Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır.

5.2 Adaptif Harmonik Enjeksiyonu Algoritması

Sisteme enjekte edilecek olan gerilim harmoniğinin genlik-faz ifadeleriyle gösterimi denklem (5.1)'de gösterildiği gibidir.

$$V_h = V_m \sin(h\omega t + \varphi) \tag{5.1}$$

Burada, V_h harmonikli gerilimin derecesini, V_m harmonikli gerilimin genliğini, φ harmoniğin fazını, ω açısal frekansı göstermektedir. Trigonometrik toplam ve fark formülleri denklem (5.1)'de verilen gerilim harmoniğinin matemetiksel ifadesi üzerinde uygulanırsa denklem (5.2) elde edilir.

$$V_h = V_m \sin(h\omega t + \varphi) = V_m[\sin(h\omega t)\cos(\varphi) + \cos(h\omega t)\sin(\varphi)] \tag{5.2}$$

Bu denklemde harmonikli gerilimin genlik ve fazına ait ifadeler için

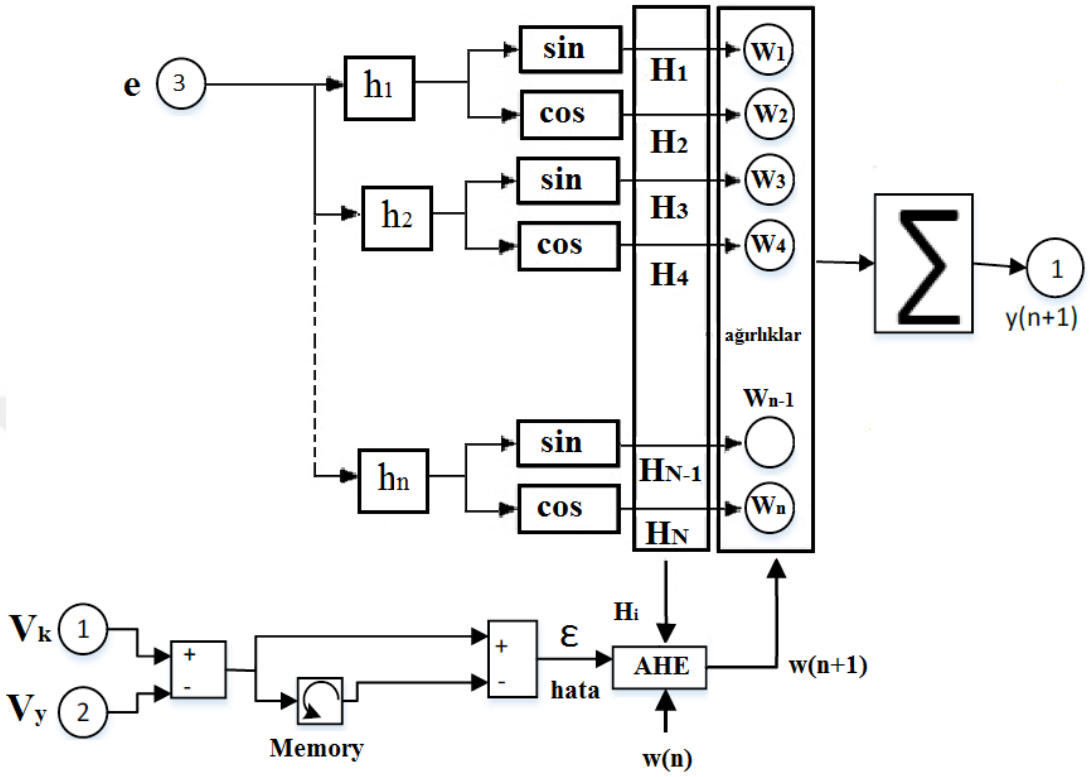
$V_m \cos(\varphi) = w_1$ ve $V_m \sin(\varphi) = w_2$ yazılırsa, yeni eşitlik denklem (5.3)'teki gibi düzenlenebilir.

$$V_h = V_m \sin(h\omega t + \varphi) = w_1 \sin(h\omega t) + w_2 \cos(h\omega t) \tag{5.3}$$

Buradan da görülmektedir ki herhangi bir frekanstaki harmoniğin açısının sinüs ve kosinüs değerleri uygun ağırlık parametreleri (w_1 ve w_2 gibi) ile çarpılarak istenilen genlik ve faza sahip bir harmonik işaret elde edilebilir. Ağırlık parametreleri w ile gösterilmektedir. Bu parametreler AHE algoritması aracılığıyla belirlenir (Erken vd. 2016; Karaman, 2018).

AHE algoritması Normalize Edilmiş En Küçük Kareler (NEKK, Normalized Least Mean Square - NLMS) yöntemine dayanan, birden çok alt algoritmanın karar değerlerinin doğrusal olarak bir araya getirilmesiyle ortaya çıkan, özel bir amaca yönelik oluşturulmuş özgün bir algoritmadır. Bu karar değerler, bu değerleri tanımlayan konveks kümeler üzerinde ortogonal izdüşümler gerçekleştirmeye dayalı aktif bir birleştirme yöntemine göre çevrimiçi olarak güncellenen ağırlıklar kullanılarak doğrusal olarak birleştirilir. Bu algoritma ilk başlarda bilgisayarların

görme problemi için kullanılmış sonrasında çeşitli görüntü işleme ve kablosuz iletişim uygulamalarına başarı elde edilmiştir.



Şekil 5.1 AHE algoritması uygulama bloğu

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi h_1, h_2, …, h_n özel harmonik derecelerinin genliği ve fazı, bu harmonik derecelerinin sinüs ve kosinüs bileşenlerinin AHE algoritmaları kullanılarak uygun değerlerle (ağırlıklar) çarpılmasıyla belirlenir. AHE algoritmasında enjekte edilen harmonik bileşenler $H_i(x, n)$ faz açısı θ'ya göre değiştiği için her an için farklı değerlere sahiptir. Hata terimini elde etmek için saf sinüzoidal referans gerilimden yük gerilimi çıkarılır. Her adımda güncel hata ile bir önceki hata teriminin farkı alınarak algoritmaya işlenir. Böylece harmonik bileşenlerin ağırlıkları, hata terimindeki artış veya azalmanın katkısına göre güncellenir. Yani algoritmanın üretmiş olduğu ağırlıklar her an çevrimiçi olarak güncellenmekte ve sisteme entegre edilecek olan harmoniklerin genlik ve fazları doğru tahmin edilmektedir. Bu yöntemde, algoritma ile sisteme istenilen değerlerde harmonik enjekte ederek güç sisteminin genel harmonik seviyesini azaltmak amaçlanmaktadır (Erken vd. 2016).

5.3 Ağırlıkları Güncelleme Algoritması

Bileşik algoritmanın, farklı harmoniklere karşılık gelen N-tane alt değerden (H_1, H_2, ... H_n) oluştuğu düşünüldüğünde, n zaman adımında her alt giriş, örnek bir x girdisi için, sıfır ortalamalı bir giriş değeri ($H(x, n) \in \mathbb{R}$) oluşturur.

$H(x,n) = [H_1(x,n) \dots H_N(x,n)]^T$, n zaman adımındaki harmoniklerin vektörü ve $w(x,n) = [w_1(x,n) \dots w_M(x,n)]^T$ o andaki mevcut ağırlık vektörü olsun.

n zaman adımındaki herhangi bir harmoniğin tahmini y(x, n) bileşik değeri denklem (5.4)'te gösterilmiştir.

$$\hat{y}(x,n) = H^T(x,n)w(n) = \sum_i w_i(n)H_i(x,n) \tag{5.4}$$

Olması gereken değer ile tahmini değer arasındaki fark ile ifade edilen hata değeri denklem (5.5)'te verilmiştir.

$$e(x,n) = y(x,n) - \hat{y}(x,n) \tag{5.5}$$

E, beklenti operatörü ve $i = 1,2, \dots N$ olmak üzere Ortalama Karesel Hata'nın minimize edilmesi ile güncellenen ağırlık değerleri;

$$min_{wi} E[y(x,n) - \hat{y}(x,n)]^2 , \tag{5.6}$$

Ağırlığa göre denklem (5.6)'nın türevi alınacak olursa denklem (5.7)'deki eşitlik elde edilir,

$$\frac{\partial \mathrm{E}}{\partial \mathrm{w}} = -2E\big[\big(y(x,n) - \hat{y}(x,n)\big)H_i(x,n)\big] = -2E\left(e(x,n)H_i(x,n)\right), \tag{5.7}$$

Denklem (5.7) sıfıra eşitlendiğinde N adet eşitlikten oluşan bir denklem seti elde edilir;

$$-2E\left(e(x,n)H_i(x,n)\right) = 0, \tag{5.8}$$

Bu denklem setinin çözümüne Wiener çözümü denir. Denklem (5.7)'deki gradyan, (5.6)'daki minimizasyon problemine yinelemeli bir çözüm elde etmek için denklem (5.9)'daki gibi en dik iniş algoritmasında kullanılabilir.

$$w(n+1) = w(n) + \lambda E[e(x,n)H_i(x,n)]\,, \qquad i = 1, \dots N \tag{5.9}$$

Bu denklemde λ, dalga boyunu ifade eder. Algoritmada anlık değerler daha kolay hesaplanabildiğinden denklem (5.9)'da beklenti operatörü E yerine anlık değerler konularak denklem (5.10) elde edilir.

$$w(n+1) = w(n) + \lambda\, e(x,n)H_i(x,n) \tag{5.10}$$

Dalga boyu λ ifadesi için $\frac{\mu}{\|Hx,n\|^2}$, eşitliği denklem (5.10)'da yerine yazıldığında,

Normalize edilmiş En Küçük Kareler (NEKK) yönteminde olduğu gibi denklem (5.11)'deki şekliyle ifade edilebilir.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \frac{e(x,n)}{\|Hx,n\|^2} H(x,n) \tag{5.11}$$

burada μ güncelleme parametresidir ve NEKK algoritması $0 < \mu < 2$ aralığında Wiener çözümüne yakınsar. Bu algoritmanın diğer yöntemlere göre en büyük avantajı, hata terimine dayalı kontrollü geri besleme sağlaması ve bu sayede harmoniklerin ağırlıklarının denklem (5.11)'e göre çevrim içi, kontrollü ve hızlı bir şekilde uyarlamalı olarak güncellenmesidir.

5.4 Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu ile Evirici Anahtarlama İşaretlerinin Elde Edilmesi

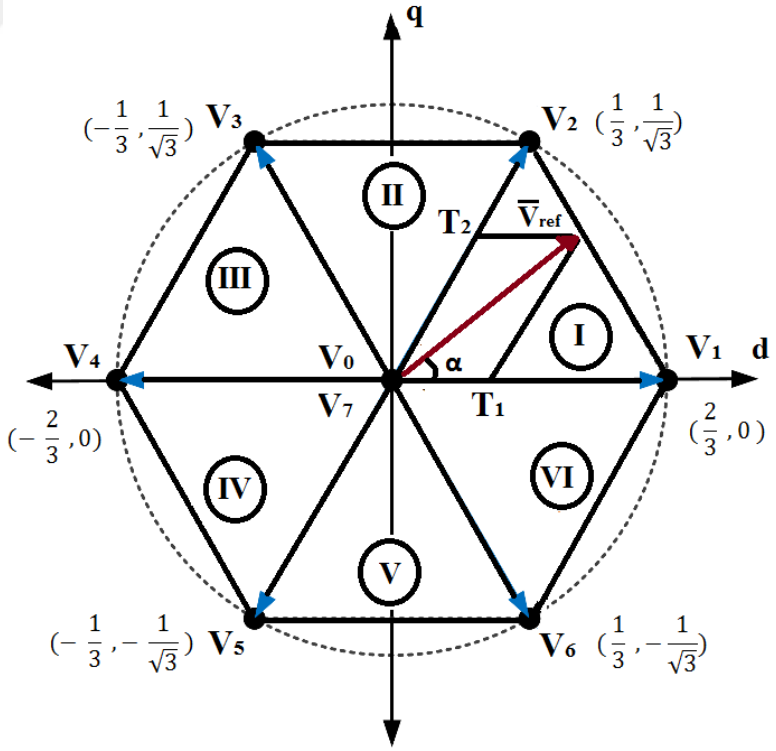
Algoritma tarafından tahmin edilen işaretlerin gerilim kaynaklı evirici girişinde anahtarlama sinyalleri üretebilmesi için DGM kontrol teknikleri kullanılır. DGM kontrol teknikleri; histerezis bant akım kontrolü DGM, Senkronize taşıyıcı modülasyonu, Sinüzoidal DGM (SDGM), Uzay vektörü DGM (UVDGM) olarak

sıralanabilir. Bu tezde histerezis kontrol yöntemine göre, sabit anahtarlama frekansı sunma avantajından dolayı uzay vektör DGM yöntemi tercih edilmiştir.

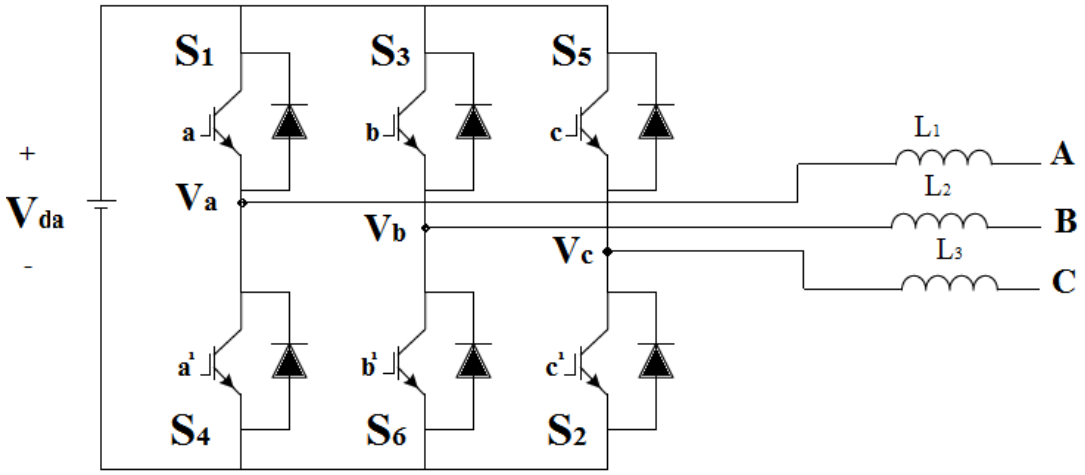
3 fazlı UVDGM yönteminin diğer avantajları şunlardır:

- Aynı DC-bağ gerilimi için çıkış voltajı Sinüs DGM'den daha yüksektir,
- Toplam harmonik bozulma (THB) değeri en aza indirilir,
- Mükemmel DC bağ gerilimi kullanımı elde edilir,
- Vektörler daha düşük anahtarlama kayıpları verecek şekilde düzenlenebilir.

Bu yöntemin amacı, belirli bir modülasyon şemasına göre uygun anahtarlama kombinasyonlarını bulmaktır. Uzay vektör DGM, güç devresindeki iletken veya iletken olmayan anahtarların bir kombinasyonu ile ayrılan altı sektöre bölünmüş karmaşık bir düzlemde çalışır. Şekil 5.2' de uzay vektör DGM'nin çalıştığı temel anahtarlama vektörleri ve sektörleri gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Temel anahtarlama vektörleri ve sektörleri



Şekil 5.3 Üç fazlı DGM üreteci

Bu yapıda, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ve S_6 anahtarları çıkıştaki geriliminin dalga şeklini meydana getiren altı adet güç transistörüdür. S_1, S_3 ve S_5 üst transistörleri; S_4, S_6 ve S_2 alt transistörleri; a,b ve c parametreleri ise anahtarlama değişken vektörlerini temsil eder.

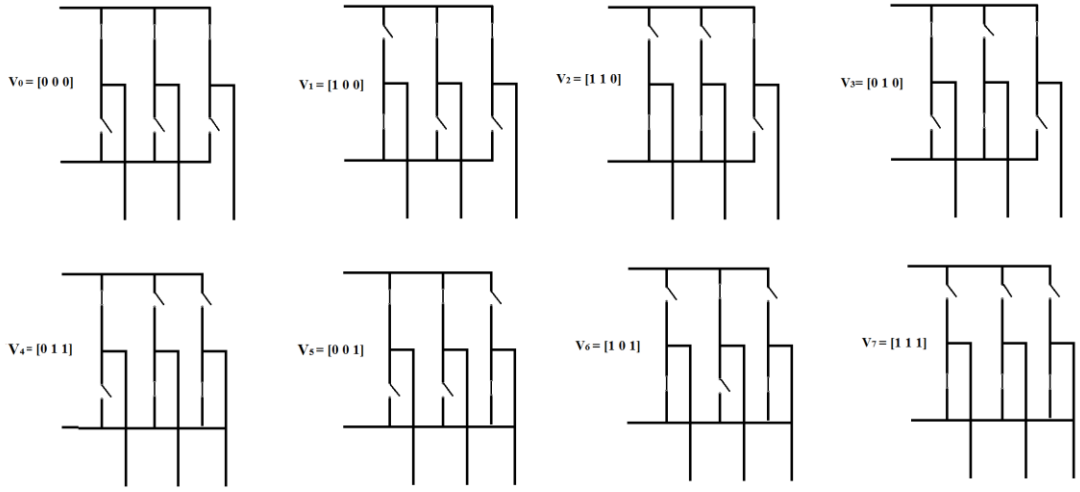
Burada, üst anahtarlar devrede (ON) iken o anahtarın karşısına denk gelen alt anahtarlar devrede değildir (OFF).

Fazlar arası gerilim vektörü $[V_{ab} \quad V_{bc} \quad V_{ca}]^t$,

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix},$$ burada anahtarlama değişken vektörü $[a \quad b \quad c]^t$

Faz-nötr gerilim vektörü $[V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn}]^t$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$



Şekil 5.4 Uzay Vektör DGM ile 8 farklı evirici konfigürasyonu

Tablo 5.1 Anahtarlama vektörleri ve çıkıştaki faz-nötr, faz-faz gerilimleri

Gerilim Vektörü	**Anahtarlama Vektörleri**			**Faz-Nötr Gerilimleri**			**Fazlar Arası Gerilimler**		
	a	**b**	**c**	$\mathbf{V_{an}}$	$\mathbf{V_{bn}}$	$\mathbf{V_{cn}}$	$\mathbf{V_{ab}}$	$\mathbf{V_{bc}}$	$\mathbf{V_{ca}}$
$\mathbf{V_0}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mathbf{V_1}$	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$\mathbf{V_2}$	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$\mathbf{V_3}$	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$\mathbf{V_4}$	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
$\mathbf{V_5}$	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$\mathbf{V_6}$	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$\mathbf{V_7}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

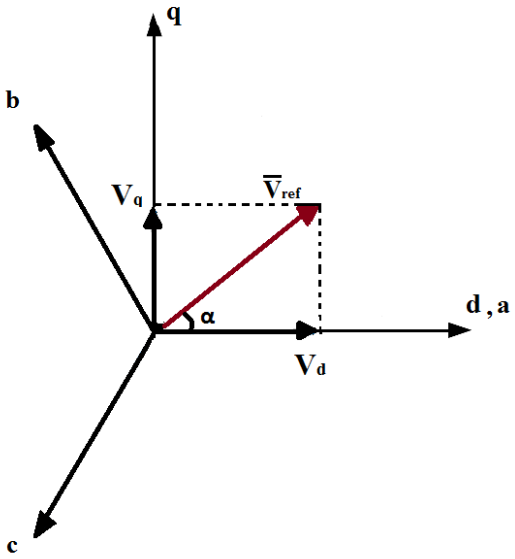
*Her bir gerilim değeri V_{da} ile çarpılacaktır.

UVDGM'nin uygulanması için üç farklı adım uygulanır. İlk olarak V_d, V_q,V_{ref} gerilimleri ve α açısı hesaplanır. Daha sonra T_1, T_2 ve T_0 anahtarlama süreleri hesaplanır. Son olarak her bir transistörün anahtarlama modeli tespit edilir.

V_d, V_q,V_{ref} gerilimleri ve α açısının hesaplanması;

abc-dq dönüşümü yapılarak elde edilen matris ile V_d, ve V_q parametreleri denklem (5.12)'deki gibi elde edilir;

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \tag{5.12}$$



Şekil 5.5 Gerilim uzay vektörleri ve dq bileşenleri

V_{ref}, referans gerilimi denklem (5.13) eşitliği ile bulunur;

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \tag{5.13}$$

α açısı ise denklem (5.14) ile hesaplanır;

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = wt = 2\pi f_s t \tag{5.14}$$

f_s, burada temel frekans değeridir.

T_1, T_2 ve T_0 anahtarlama sürelerinin hesaplanması;

Bu adımda, ilk olarak referans vektörün dönme açısı α kullanılarak referans uzay vektörünün bulunduğu sektör belirlenir. Daha sonra bu sektördeki her bir anahtarlama durum vektörünün çalışma periyodu hesaplanır.

$T_s = 1/f_s$, n sektör numarası (n=1,2...6) olmak üzere her bir sektördeki anahtarlama süresi denklem (5.15), (5.16) ve (5.17) aracılığıyla hesaplanır;

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}.T_s/2.|V_{ref}|}{V_{dc}} \sin(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3}\pi) \tag{5.15}$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}.T_s/2.|V_{ref}|}{V_{dc}} \sin(\alpha + \frac{n-1}{3}\pi) \quad (5.16)$$

$$T_0 = \frac{T_s}{2} - T_1 - T_2 \quad (5.17)$$

Her bir transistörün anahtarlama modelinin tespit edilmesi;

Her bir transistörün anahtarlama modeli, anahtarlama periyotlarına ve anahtarlama sıralarına göre belirlenir. Böylece bir örnekleme periyodu boyunca evirici çıkışında referans gerilim oluşturulur. Anahtarlama sırası, çıkış geriliminin doğruluğunu ve filtrenin anahtarlama frekansını doğrudan etkilediğinden tespiti düzgün yapılmalıdır. Tablo 5.2'de her sektör için anahtarlama sürelerinin hesaplanması gösterilmektedir.

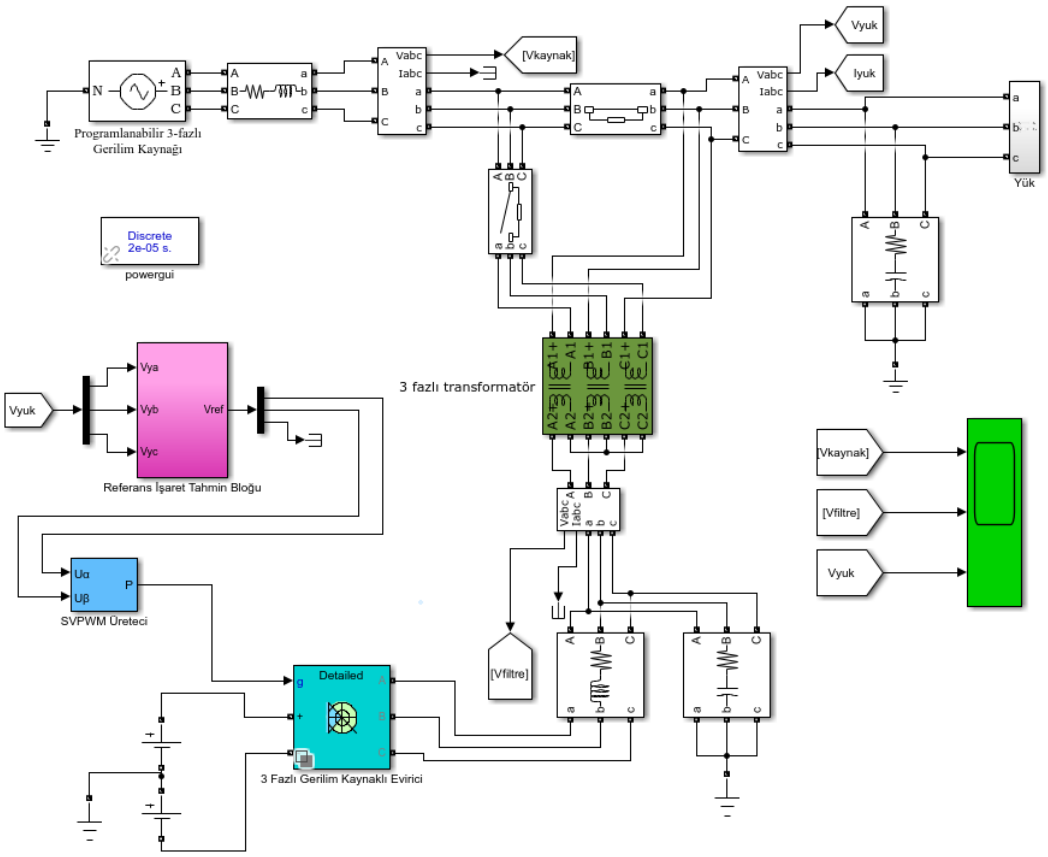
Tablo 5.2 Her bir sektördeki anahtarlama süreleri

Sektör	Üst Anahtarlar (S1, S3, S5)	Alt Anahtarlar (S4, S6, S2)
1	$S_1=T_1+T_2+T_0/2$ $S_3=T_2+T_0/2$ $S_5=T_0/2$	$S_4= T_0/2$ $S_6=T_1+T_0/2$ $S_2= T_1+T_2+T_0/2$
2	$S_1=T_1+T_0/2$ $S_3=T_1+T_2+T_0/2$ $S_5=T_0/2$	$S_4= T_2+T_0/2$ $S_6=T_0/2$ $S_2= T_1+T_2+T_0/2$
3	$S_1=T_0/2$ $S_3=T_1+T_2+T_0/2$ $S_5= T_2+T_0/2$	$S_4= T_1+T_2+T_0/2$ $S_6=T_0/2$ $S_2= T_1+T_0/2$
4	$S_1= T_0/2$ $S_3= T_1+T_0/2$ $S_5= T_1+T_2+T_0/2$	$S_4= T_1+T_2+T_0/2$ $S_6= T_2+T_0/2$ $S_2= T_0/2$
5	$S_1= T_2+T_0/2$ $S_3= T_0/2$ $S_5= T_1+T_2+T_0/2$	$S_4= T_1 +T_0/2$ $S_6= T_1+T_2+T_0/2$ $S_2= T_0/2$
6	$S_1= T_1+T_2+T_0/2$ $S_3= T_0/2$ $S_5= T_1+T_0/2$	$S_4= T_0/2$ $S_6= T_1+T_2+T_0/2$ $T_2+T_0/2$

5.5 SAGF'nin AHE Algoritmasıyla Matlab/Simulink Benzetim Modeli

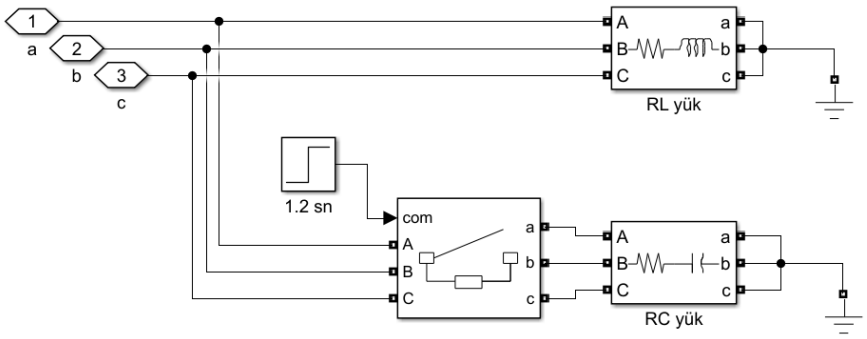
SAGF esas olarak şebeke dalga formunda oluşan harmonik gerilimlerin kompanzasyonunda kullanılır. Bu tez çalışmasında kaynak tarafında yaşanan gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesi nedeniyle meydana gelen bozulmalar ve gerilim kaynağında var olan harmonik problemlerinden kaynaklı sorunların SAGF

kullanılarak giderilmesi ve SAGF'nin değişken yükler karşısında davranışı incelenmiştir. Harmoniklerin düzeltilmesi için kullanılan algoritma Normalleştirilmiş En Küçük Kareler (NEKK) yöntemine dayalı Adaptif Harmonik Enjeksiyonu (AHE) algoritmasıdır. Algoritma zaman alanında uygulanabilen uyarlanabilir bir referans işaret oluşturma algoritmasıdır. Algoritmanın uygulandığı devre topolojisi gerilim kaynaklı evirici kullanılarak oluşturulan 3 fazlı-3 telli seri aktif güç filtresi yapısıdır. Burada amaç, AHE algoritması ile elde edilen tahmini referans işaretlerinin GKE'yi anahtarlayarak sisteme basılacak harmoniğin doğru tespit edilmesini sağlamaktır. GKE girişindeki anahtarlama işaretlerinin elde edilmesinde Uzay Vektör DGM (Space Vector PWM) kullanılmıştır. Şekil 5.6' da AHE algoritması kullanılarak oluşturulan SAGF'nin Matlab2021a/Simulink ara yüzü kullanılarak oluşturulan benzetim modeli bulunmaktadır.



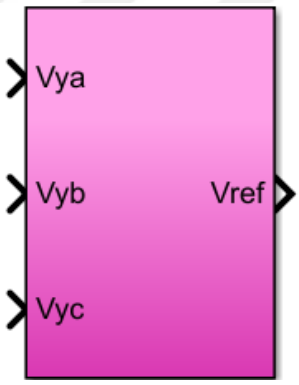
Şekil 5.6 AHE algoritması kullanılarak oluşturulan SAGF'nin benzetim modeli

Sistemde kullanılan RL (10Ω ve 10mH) yükü ve 1,2'nci saniyede devreye giren RC (10Ω ve 100μF) yüküne ait benzetim modeli Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

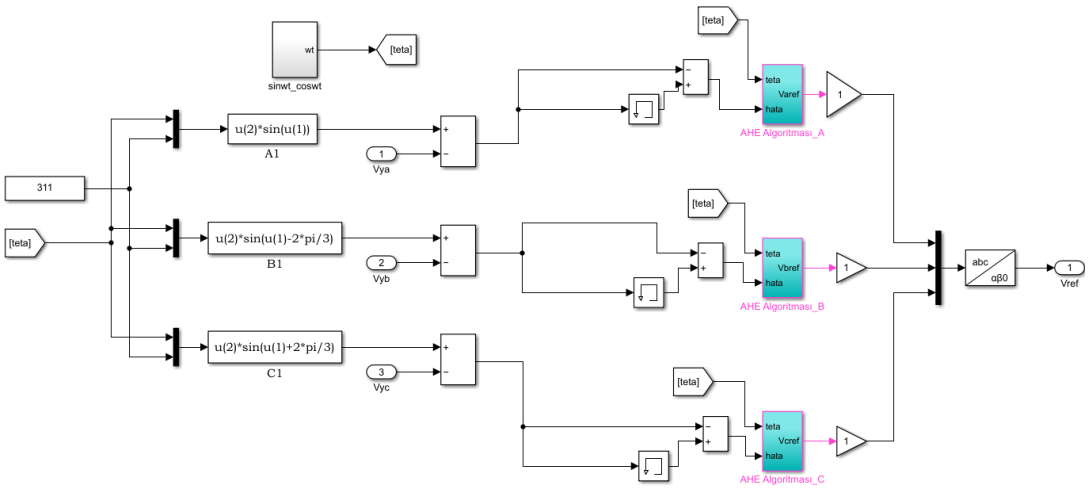


Şekil 5.7 RL ve RC yüküne ait Matlab/Simulink benzetim modeli

Önerilen algoritmayı da içeren Referans İşaret Tahmin Bloğu ve içyapısının Matlab/Simulink benzetim modelleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmektedir.

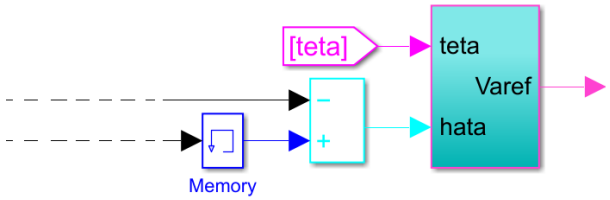


Şekil 5.8 Referans işaret tahmin bloğu



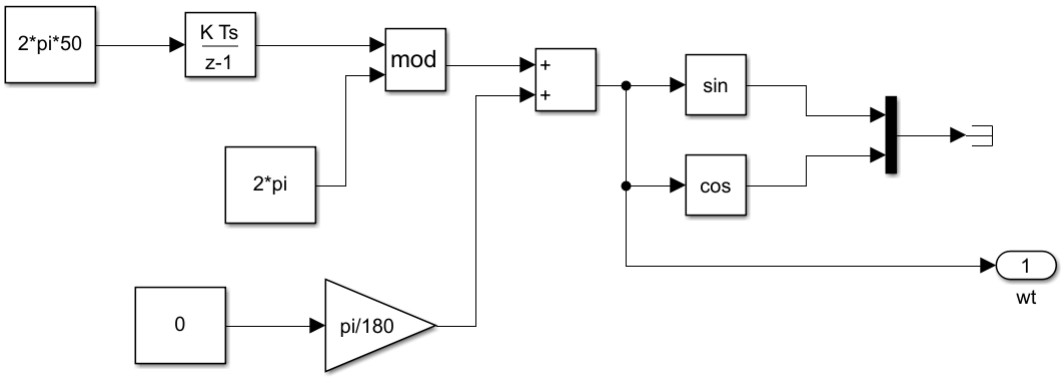
Şekil 5.9 Tahmin bloğunun Matlab/Simulink benzetim modeli

Referans işaretlerin üretilmesi AHE algoritma bloğu içinde gerçekleşir ancak, bu bloğun girişindeki parametrelerin doğruluğu yahut hatalı olması tüm sistemi temelden etkilemektedir. Şekil 5.10'da adaptif harmonik enjeksiyonu algoritmasının Matlab/Simulink benzetim bloğu verilmiştir.



Şekil 5.10 Adaptif harmonik enjeksiyonu bloğunun Matlab/Simulink benzetimi

Bloğun girişinde bulunan teta ve hata parametreleri algoritma tarafından doğru şekilde işlenerek referans gerilim değerleri üretilir. Burada teta açısı Şekil 5.11'de gösterilen blok yapısı ile tespit edilmektedir.



Şekil 5.11 Teta açısının elde edilmesine ait model

Hata parametresinin tespitinde ise yükün her bir fazının gerilim değeri ile 311V genliğe sahip saf sinüzoidal dalga formundaki işaretin farkı alınır. Bu fark değeri ile bir önceki fark değeri arasındaki değişimi anlık olarak değerlendirebilmek amacıyla 'memory bloğu' kullanılır. Böylece farkın anlık değişimleri hata parametresi olarak algoritma girişine verilir.

Ayrıca AHE algoritma bloğunun içinde algoritmanın çalışma koşullarını iyileştiren ve harmoniğin genliğini yükte meydana gelen değişikliklere göre güncelleyen μ parametresi bulunmaktadır. μ, başta sabit bir değer olarak atanır, algoritma çalıştıkça

teta açısı ve hata değerine bağlı olarak kendiliğinden güncellenir. Böylece adaptif bir çözüm imkânı sunar.

Algoritma tarafından tahmin edilen işaretlerin gerilim kaynaklı evirici girişinde anahtarlama sinyalleri üretebilmesi için UVDGM yöntemi kullanılmıştır. 3 fazlı referans gerilimler oluşturulduktan sonra abc-αβ dönüşümü yapılarak gerilimlerin αβ eksenindeki değerleri elde edilir. Bu değerler UVDGM bloğunun girişine verilerek çıkışında gerilim kaynaklı eviricinin yani aktif güç filtresinin uygun bir şeklide anahtarlanması için gerekli kapı işaretlerinin oluşması sağlanır.

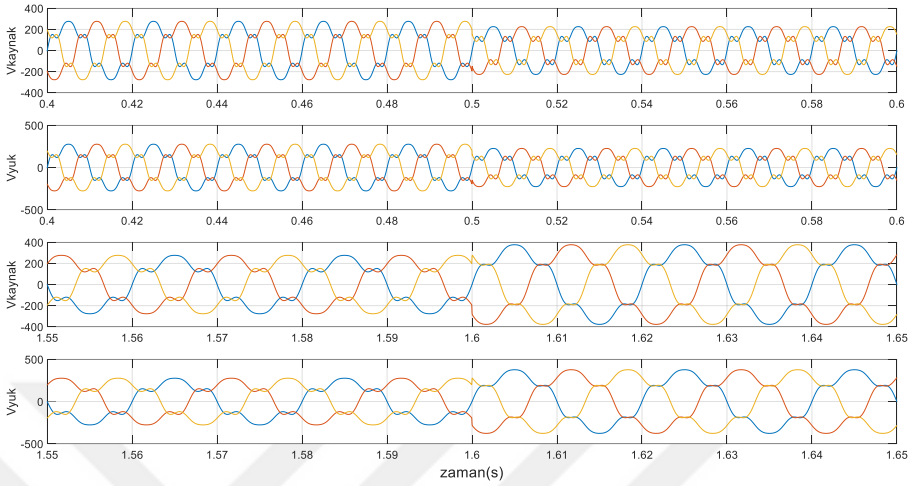
5.6 AHE Algoritmasının SAGF Üzerindeki Başarımı

Bu çalışmada, 311V, 50 Hz bir kaynaktan beslenen iki tane yük olması durumunda; algoritmanın yük gerilimi üzerindeki harmoniklere karşı davranışı incelenmektedir. İlk olarak 0-2,5 saniye aralığında kaynak geriliminde; 5. dereceden, 0,2 pu genlikli, faz açısı 0 (sıfır) olan negatif sıralı harmonik ve 7. Dereceden 0,1 pu genlikli, faz açısı 0 (sıfır) olan pozitif sıralı harmonik bulunmaktadır. Kaynak gerilimi 0,5'inci saniyede 0,8 pu (per-unit) değerine düşmüş ve 0,8'inci saniyede normale dönmüştür, daha sonra 1,6'ncı saniyede ise 1,4 pu değerine ulaşmış ve 2'nci saniyede tekrar normale dönmüştür. Ayrıca simülasyonun başında 10Ω ve 10mH değerlere sahip RL yükü devrede olup 1,2'nci saniyede 10Ω ve 100μF değerleri olan RC yükü devreye girmektedir.

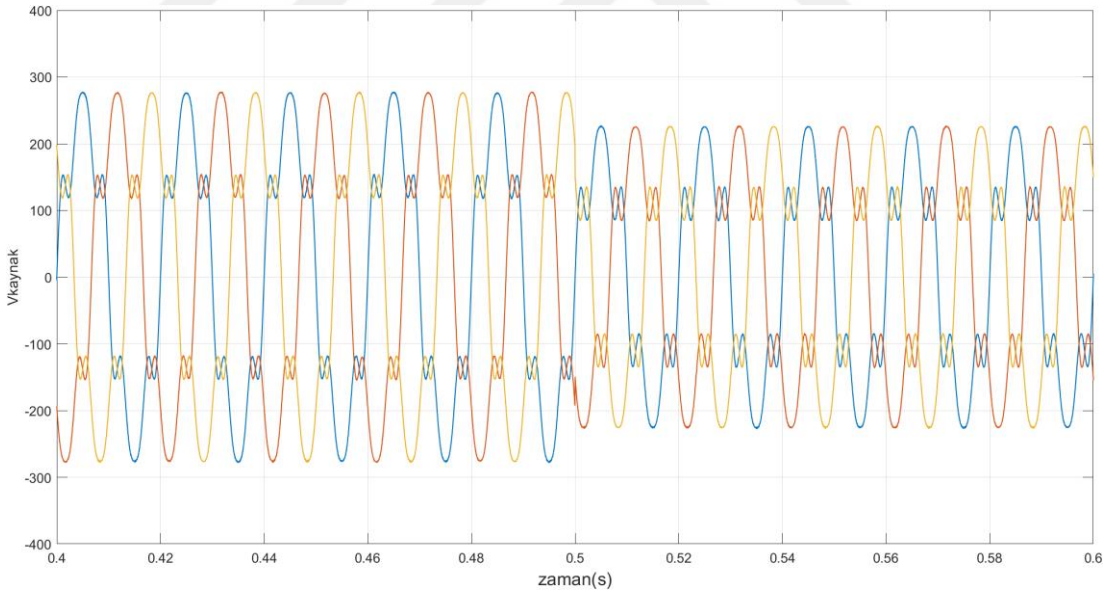
Gerilim düşme ve yükselmelerinin meydana geldiği ve kaynak tarafından harmonikli gerilimin basıldığı bu sistemin ardından ise kaynak gerilimine eklenen 5. ve 7. harmoniklerin devrede olmadığı sadece gerilim düşme ve yükselmesinin yaşandığı durum incelenmiştir.

Şekil 5.12'de harmonikli kaynakta gerilimin düşmesi ve yükselmesi durumunda filtre kullanılmazsa yük üzerinde meydana gelecek olan gerilim dalga şekli bulunmaktadır. Şekil 5.13'te filtreli durumda kaynak geriliminde 0,5'inci saniyede meydana gelen anlık düşüş gösterilmiştir. Bu düşüş sırasında meydana gelebilecek olumsuzlukları kompanze etmek ve yükün bu durumdan etkilenmesini engellemek için sisteme

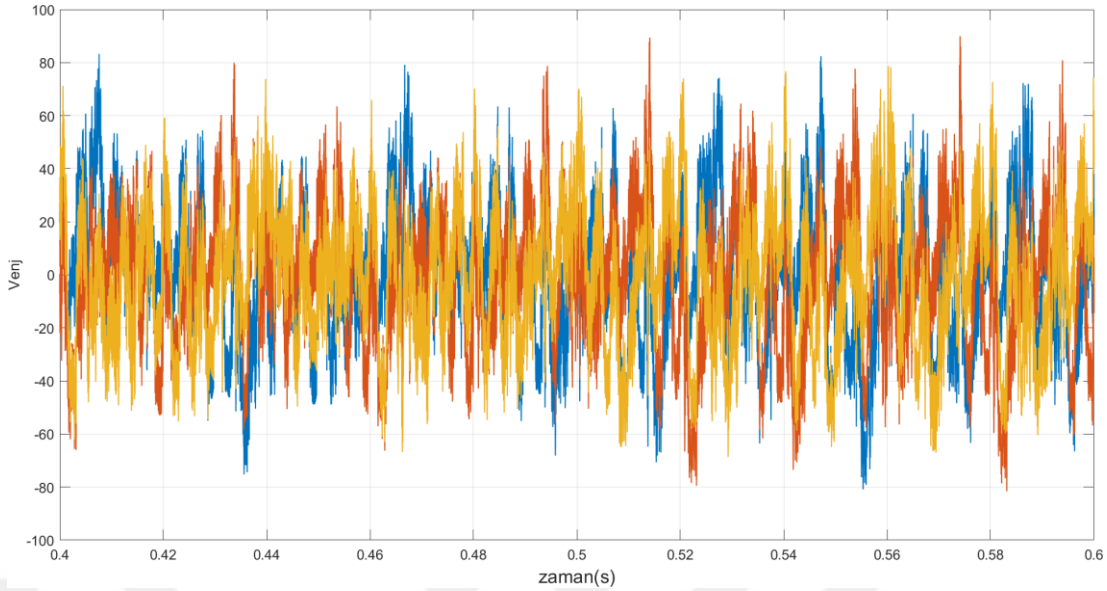
enjekte edilen gerilimin şekli ve sonuç olarak yük tarafında meydana gelen değişiklikler sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te görülmektedir.



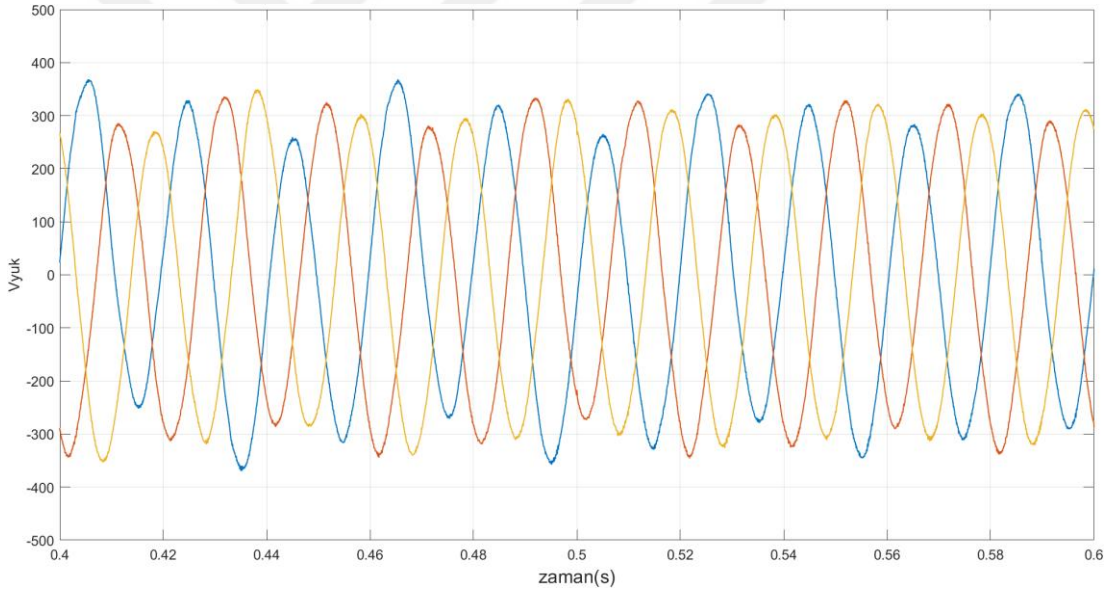
Şekil 5.12 Harmonikli kaynak geriliminin düşmesi ve yükselmesi durumunda yük geriliminin davranışı (filtresiz)



Şekil 5.13 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki düşme

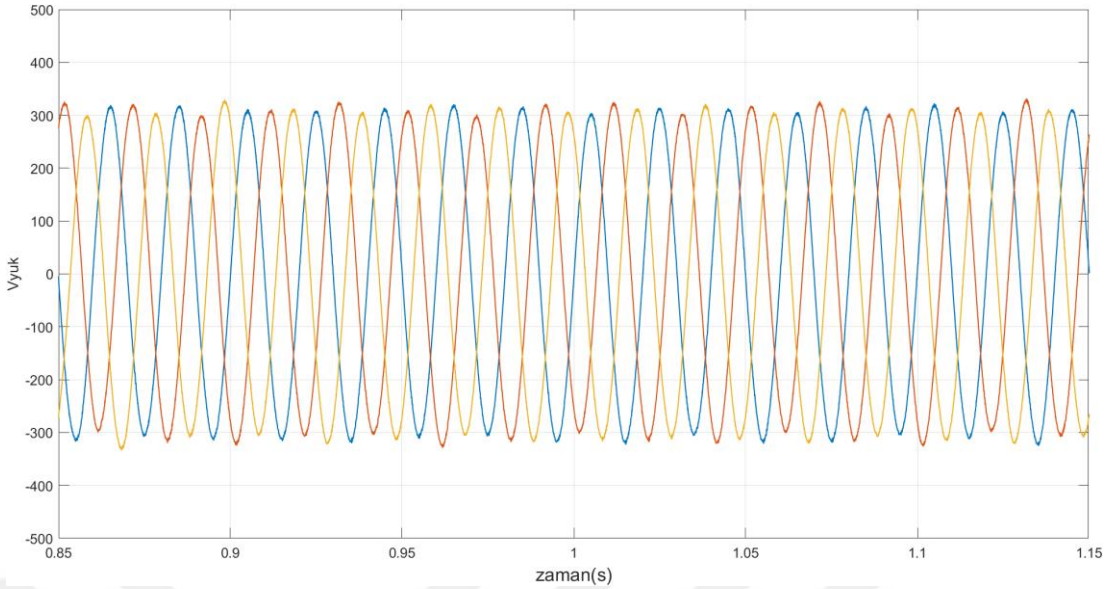


Şekil 5.14 Harmonikli kaynak geriliminin düşmesi sonucu sisteme enjekte edilen gerilim

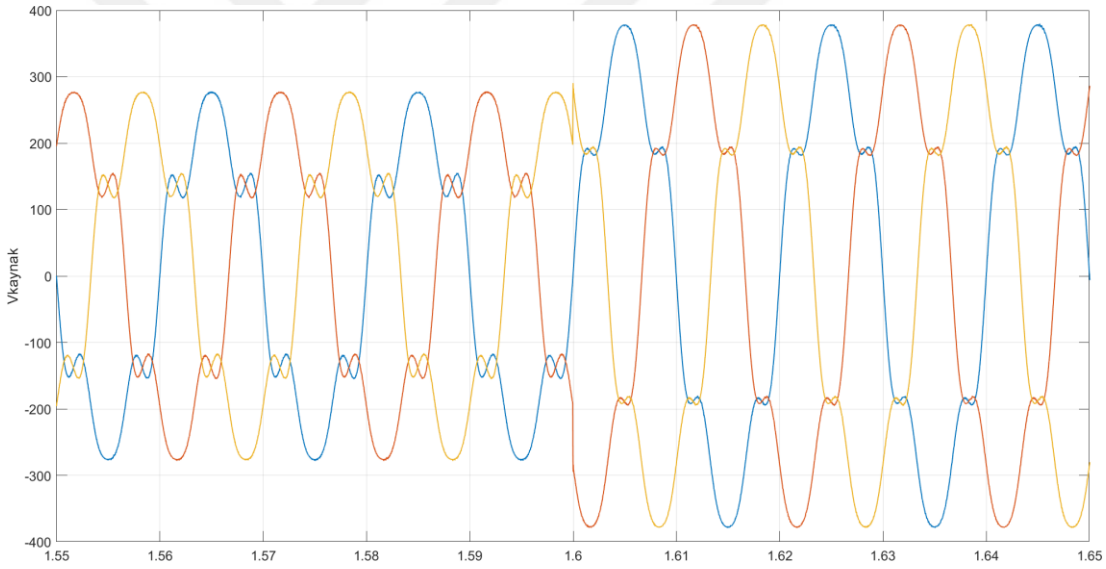


Şekil 5.15 Harmonikli kaynak gerilimindeki düşme sırasında yük gerilimi

Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten de anlaşıldığı gibi kaynak geriliminde meydana gelen düşüş AHE algoritması tarafından kompanze edilebilmiş ve yük gerilimi bu düşüşten minimum oranda etkilenmiştir. Ayrıca Şekil 5.16'da gerilim düşmesi sonrası kararlı hal durumunda kaynak gerilimine ait dalga şekli gösterilmiştir. Böylece gerilimin ilk düşmesi anında genlikte meydana gelen fazlar arası dengesizlik bir süre sonra minimum düzeye inmiştir.

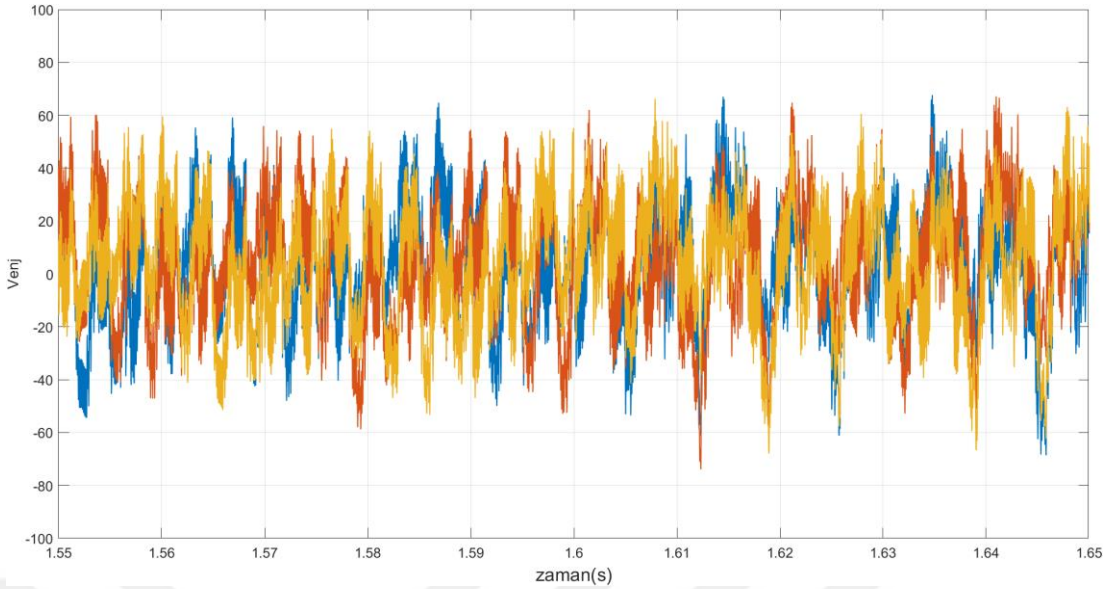


Şekil 5.16 Harmonikli kaynak geriliminde düşme sonrası kararlı hal

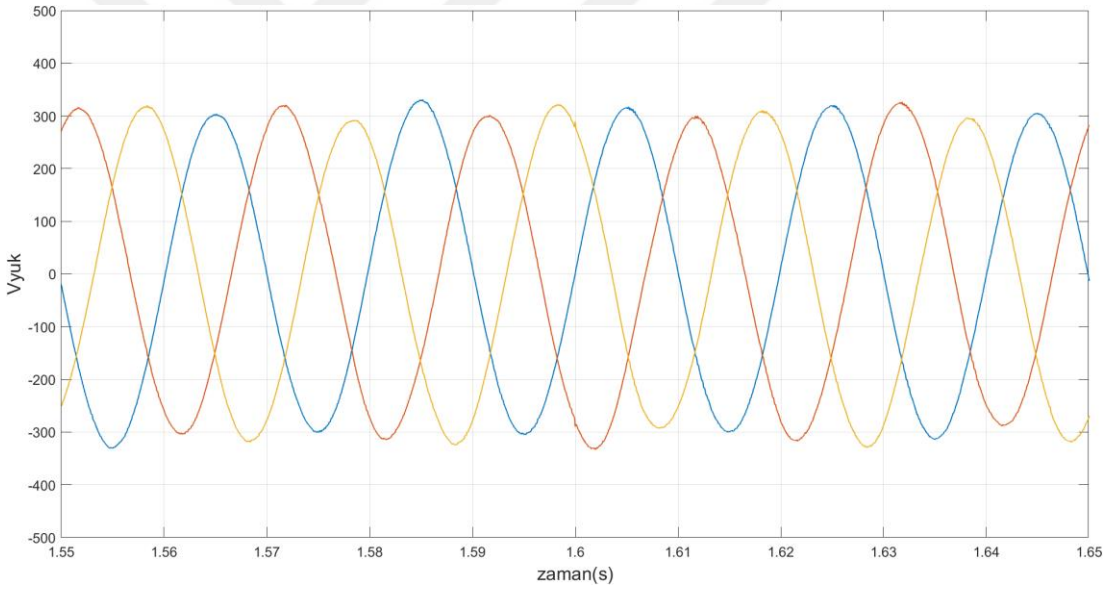


Şekil 5.17 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki yükselme

Şekil 5.17'da filtreli durumda kaynak geriliminde 1,6'ncı saniyede meydana gelen anlık artış gösterilmiştir. Bu artış sırasında meydana gelebilecek olumsuzlukları kompanze etmek ve yükün bu durumdan etkilenmesini engellemek için sisteme enjekte edilen gerilimin şekli ve sonuç olarak yük tarafında meydana gelen değişiklikler Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da görülmektedir.

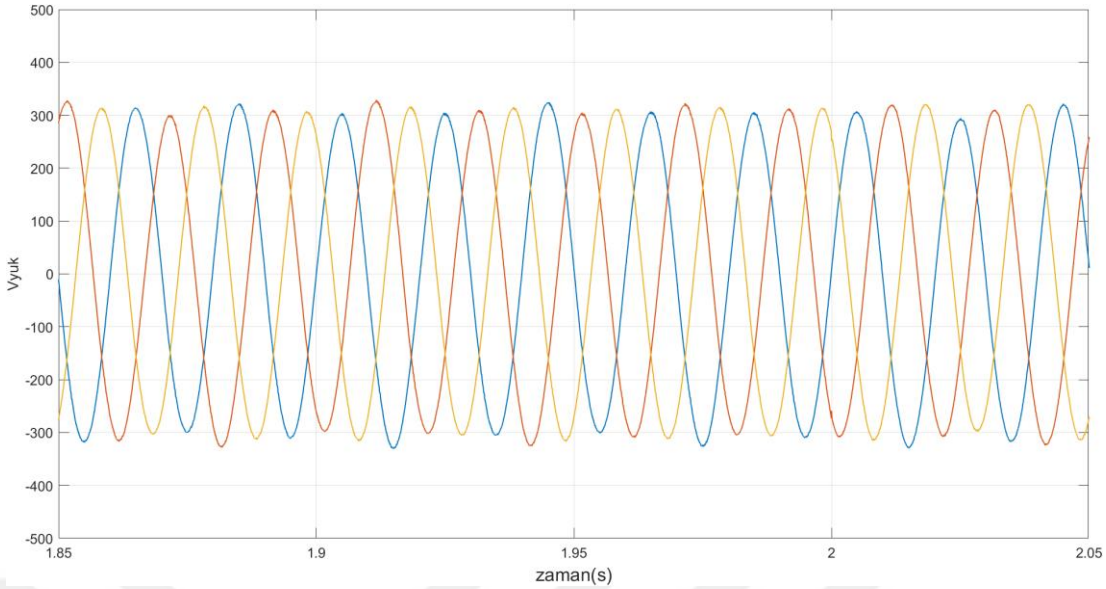


Şekil 5.18 Harmonikli kaynak geriliminin yükselmesi sonucu sisteme enjekte edilen gerilim



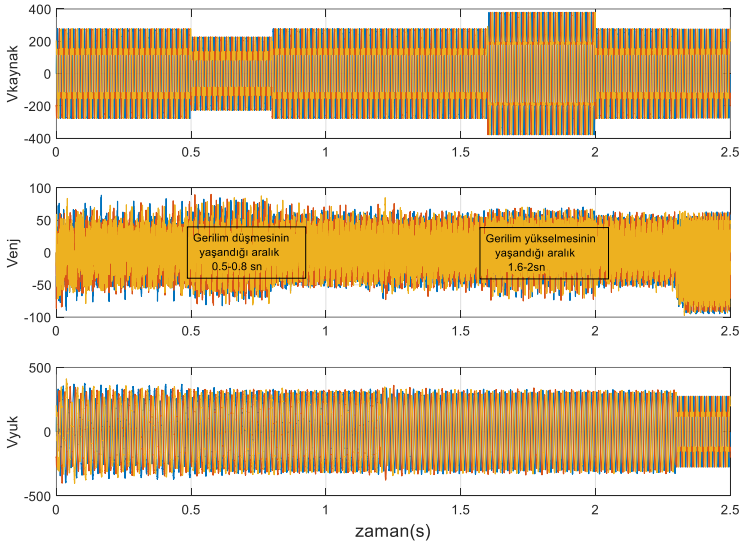
Şekil 5.19 Harmonikli kaynak gerilimindeki yükselme sırasında yük gerilimi

Kaynak geriliminin anlık yükselmesi durumunda da önerilen algoritma başarılı olmuş ve yükün kaynak gerilimindeki değişimlerden etkilenmesi önlenmiştir.



Şekil 5.20 Harmonikli kaynak geriliminin genliğindeki yükselme sonrası kararlı hal

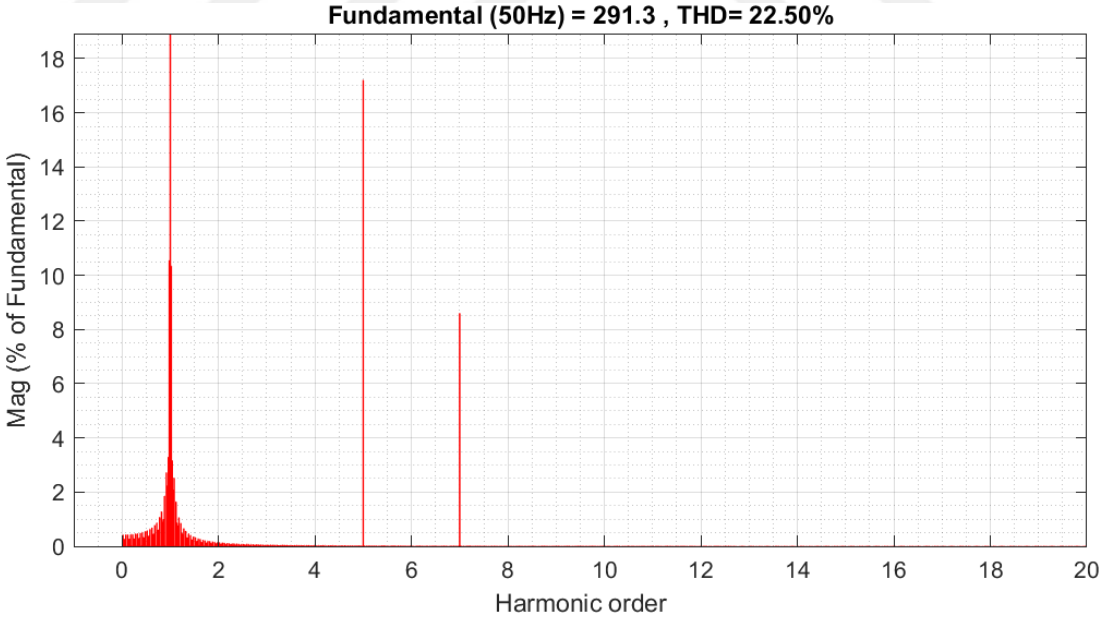
Şekil 5.20'de gerilim yükselmesi sonrası kararlı hal durumunda yük gerilimine ait dalga şekli gösterilmiştir. Gerilimin yükselmesi anında genlikte meydana gelen fazlar arası dengesizliğin sonrasında azaldığı fakat yine de devam ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca RL yükü devredeyken buna ek olarak 1,2'nci saniyede devreye giren RC yükü de algoritmanın kararlılığını bozmamış ve yük gerilimi saf sinüzoidal forma yakın bir hal almıştır. Matlab/Simulink ortamında harmonikli kaynak, yük ve filtre gerilimlerinin her biri için elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Harmonikli kaynak, yük ve filtre gerilimlerinin değişimleri

Şekil 5.22 Filtresiz durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB

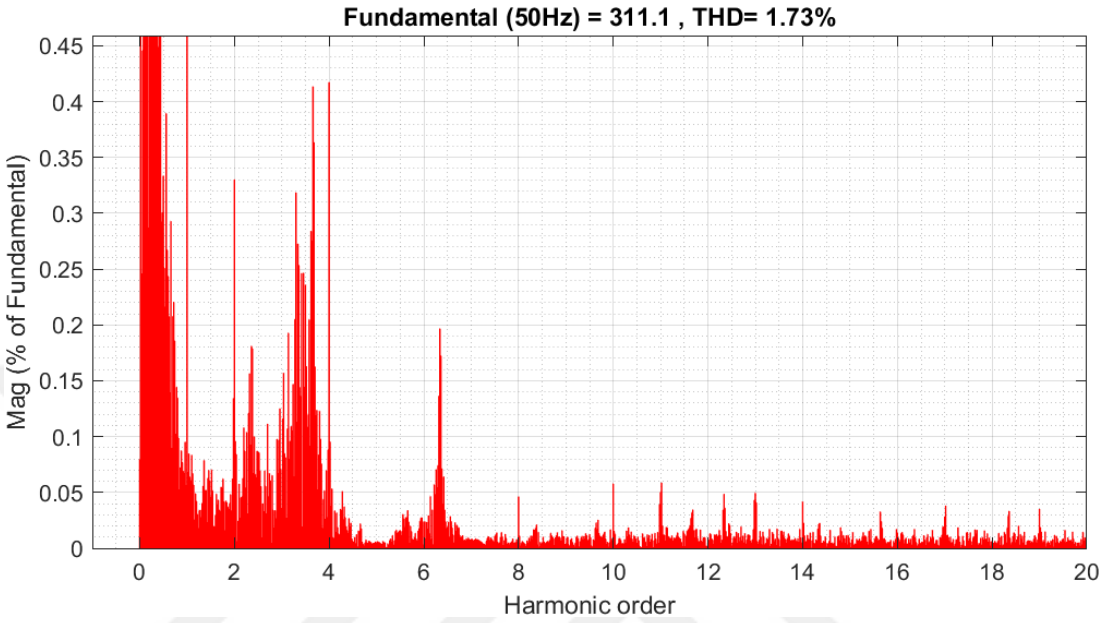
Şekil 5.22'de filtresiz durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB grafiği gösterilirken; Şekil 5.23 filtresiz durumda hem RL hem de RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB grafiği gösterilmektedir.



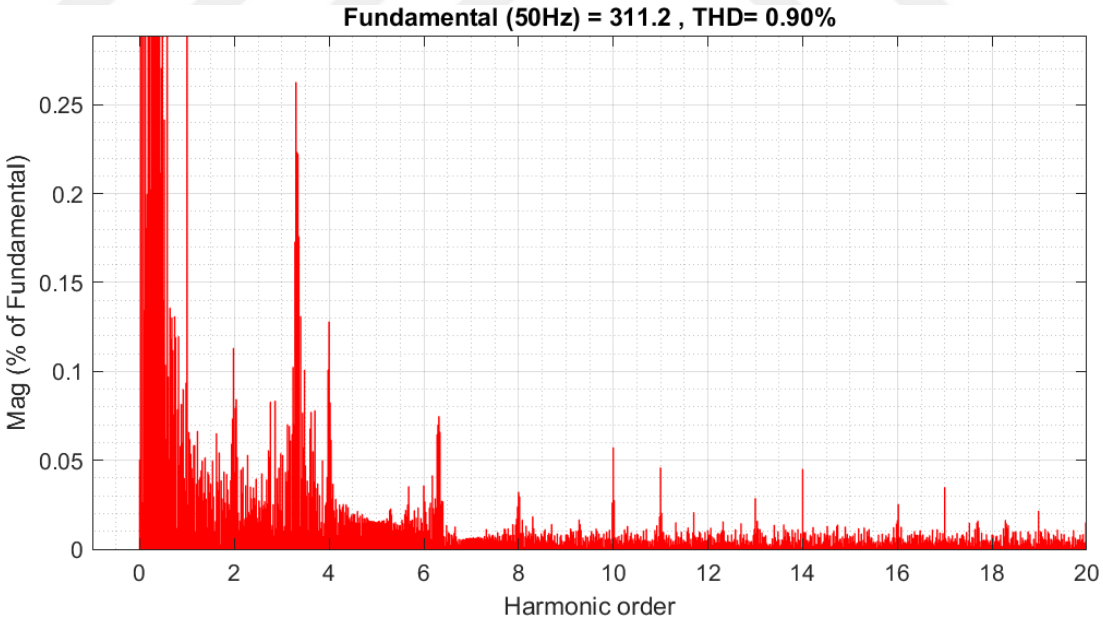
Şekil 5.23 Filtresiz durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te filtreli durum için sırasıyla sadece RL yüküne ve RL-RC yük gerilimlerine ait THB grafikleri gösterilmiştir. Burada ortaya konulan değerlere göre başlangıçta filtre devrede değil ve sadece RL yükü devredeyken toplam harmonik

değer %24,65; hem RL hem de RC yükü devredeyken %22,50 olup filtre devreye girdikten sonra sadece RL yükü devredeyken % 1,73 ve hem RL hem de RC yükü devredeyken %0,90'dir.

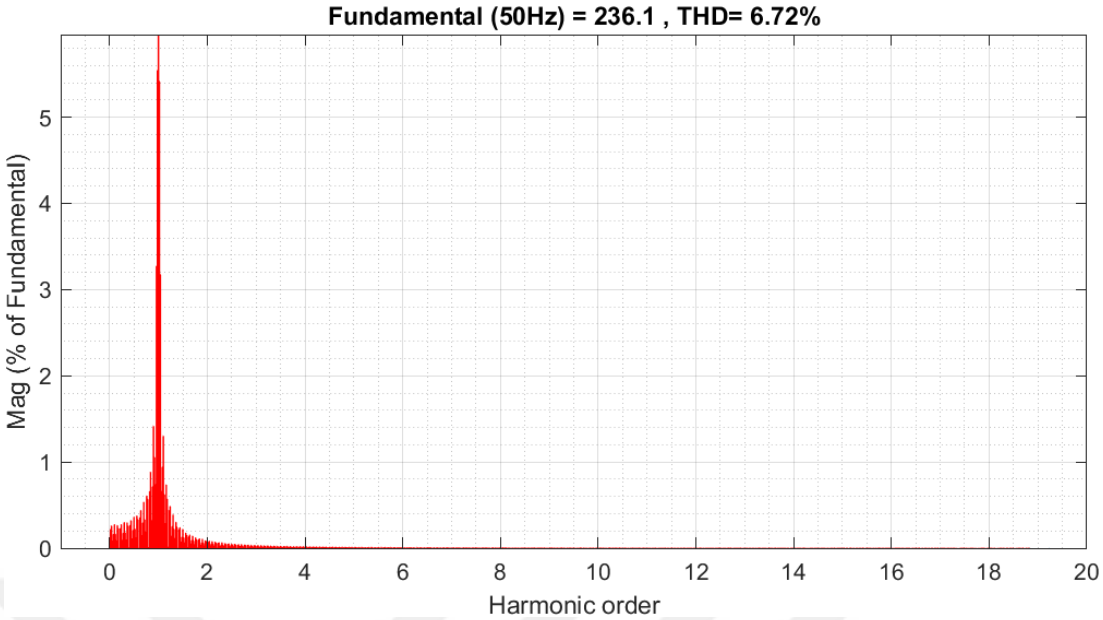


Şekil 5.24 Filtreli durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB

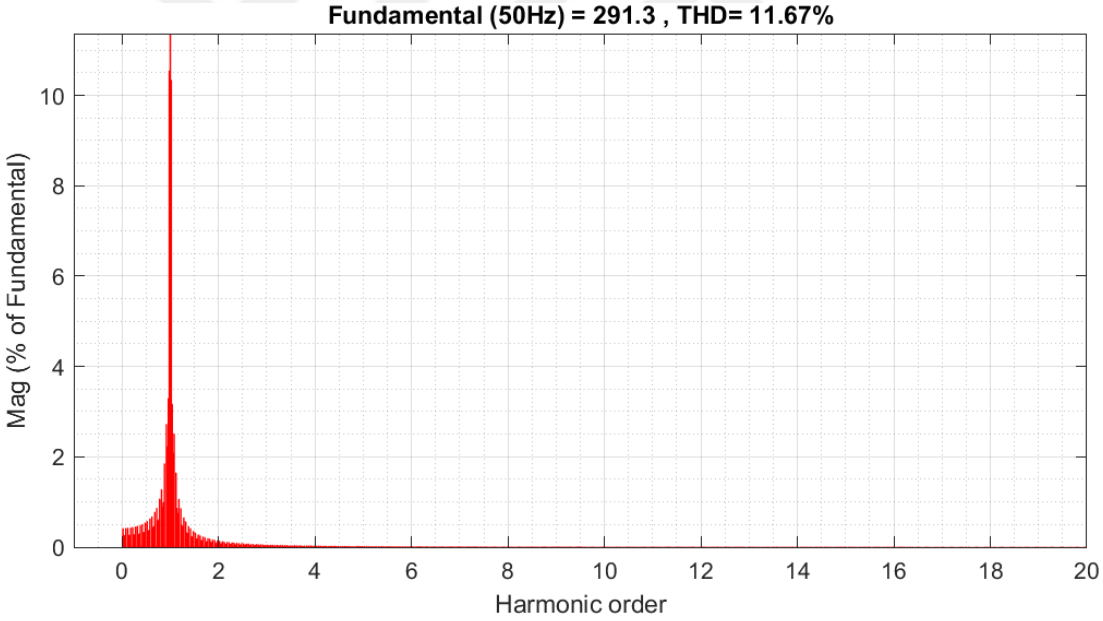


Şekil 5.25 Filtreli durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB

Ayrıca kaynak geriliminde sistemin davranışını izleyebilmek adına ilk başta kaynağa eklenmek suretiyle bulunan 5. Ve 7. harmonik değerler kaynak gerilimi üzerinden kaldırılırsa bu toplam harmonik bozulma değerlerinin daha da düştüğü görülmüştür.

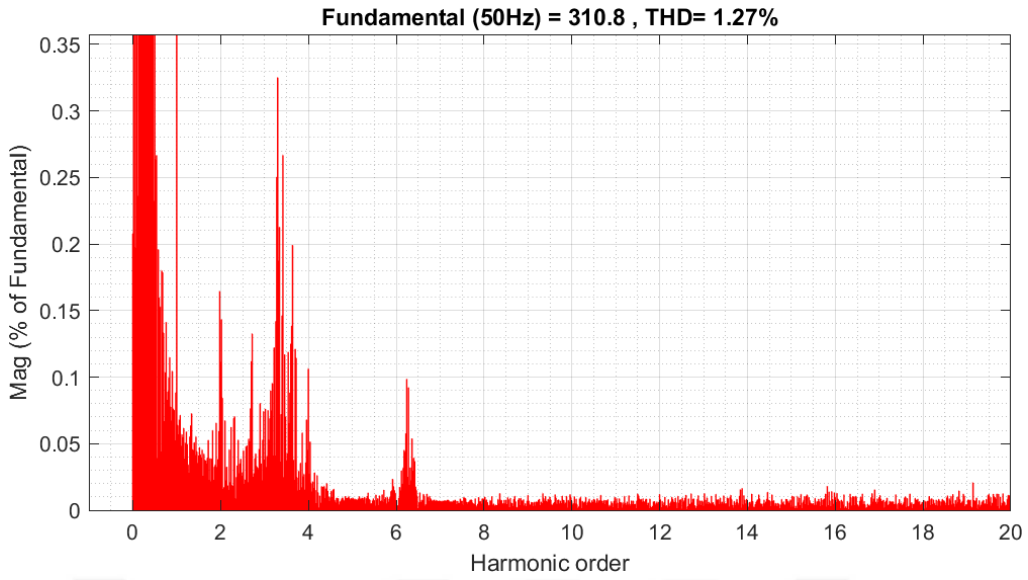


Şekil 5.26 Filtresiz durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş)

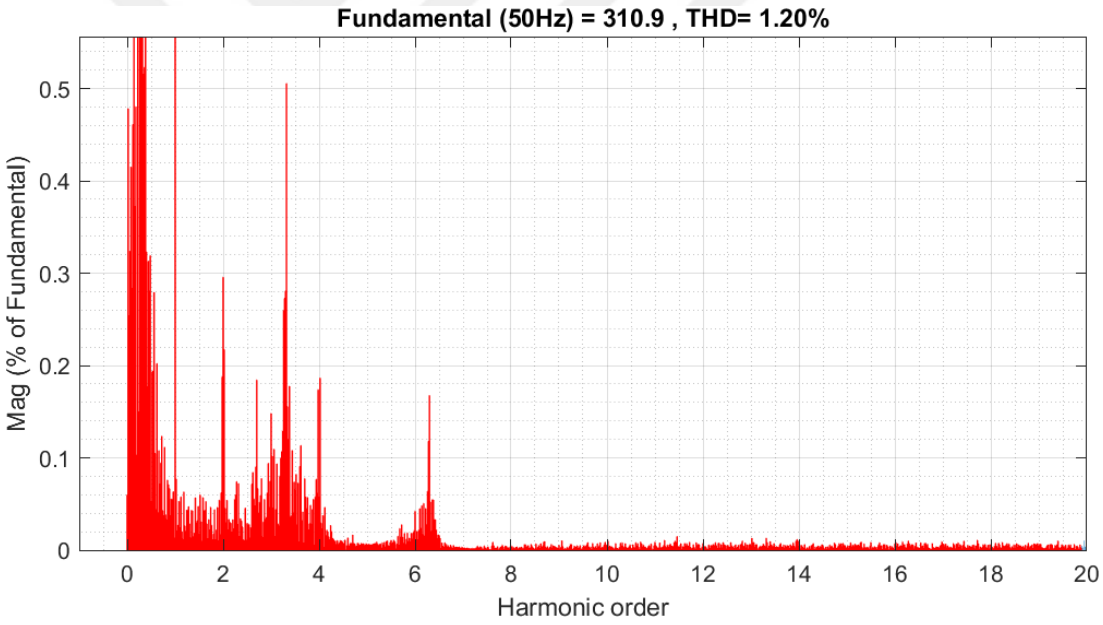


Şekil 5.27 Filtresiz durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş)

Bu durumda sırasıyla Şekil 5.26 ve 5.27'de görüldüğü gibi sistemde filtre devreye girmeden öncesinde sadece RL yükü devredeyken THB değeri %6,72 RL ve RC yükünün her ikisi devredeyken %11,67'dir. Ayrıca filtre sisteme dâhil olduktan sonra sırasıyla Şekil 5.28 ve 5.29'da görüldüğü üzere sadece RL yükü devredeyken THB değeri % 1,27 ve hem RL hem de RC yükü devredeyken %1,20'dir.



Şekil 5.28 Filtreli durumda RL yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş)



Şekil 5.29 Filtreli durumda RL ve RC yükü devredeyken yük gerilimine ait THB (harmonik eklenmemiş)

Yani her iki durumun da filtresiz hallerinde sistemde kabul edilebilir standart değerlerin çok üstünde bir harmonik bulunmaktayken filtrenin devreye girmesiyle harmonikler önemli ölçüde önlenmiş ve THB değeri IEEE 512-2014'ün belirlemiş olduğu sınır değerlerin oldukça altına çekilebilmiştir. Filtresiz ve AHE algoritmasının kullanıldığı filtreli durumlar için %THB değerleri Tablo 5.3'de görülmektedir.

Tablo 5.3 AHE algoritması sonucu %THB değerleri

Kaynaktaki Bozulma	Yükün Durumu	SAGF devrede değilken Yük geriliminde %THB	SAGF devredeyken Yük geriliminde %THB
Gerilim düşmesi Gerilim yükselmesi Kaynakta üretilen harmonik	*RL*	24,69	1,73
	RL+RC	22,50	0,90
Gerilim düşmesi Gerilim yükselmesi	*RL*	6,72	1,27
	RL+RC	11,67	1,20

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gerilim kaynaklı evirici yapısındaki seri aktif güç filtresinin Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. SAGF, güç kaynağı tarafındaki gerilim düşmesi, yükselmesi ve gerilimde harmonik bulunması durumlarında meydana gelen bozulmalardan yükü korumak amacıyla, sistemdeki harmoniğe eşit genlikte ancak ters fazda bir işareti ortak bağlantı noktası üzerinden sisteme enjekte eder. Aktif güç filtresinin çıkışında doğru bir işaret elde edebilmek ve filtrenin performansını maksimuma çıkarabilmek için normalize edilmiş en küçük kareler yöntemine dayanan adaptif harmonik enjeksiyonu algoritması kullanılmıştır. Uzay vektör DGM yöntemi ile seri aktif güç filtresi anahtarlama işaretleri oluşturularak SAGF'nin iki farklı yük durumundaki davranışı izlenmiş ve THB değerleri üzerinden filtrenin performansı hakkında değerlendirme yapılmıştır.

Buna göre kaynakta gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi ve kaynakta üretilen harmonik olması durumunda filtre devrede değilken ve sadece RL (10Ω ve 10mH) yükü varken sistemin THB değeri %24,69; RL (10Ω ve 10mH) ve RC (10Ω ve 100µF) yükü varken %22,5'dur. Filtre devredeyken başlangıçta RL yükü varken %1,73 ve daha sonra 1,2'nci saniyede sisteme RC yükü eklenmesiyle %0,90 toplam harmonik bozulma değeri elde edilir. Kaynakta üretilen harmonik ortadan kaldırıldığında ise filtre devrede yokken ve sadece RL yükü varken sistemin THB değeri %6,72; RL ve RC yükü varken %11,67 olarak ölçülür. Filtre devredeyken başlangıçta RL yükü varken %1,27 ve daha sonra 1,2'nci saniyede sisteme RC yükü eklenmesiyle %1,20 toplam harmonik bozulma değeri elde edilir. Bu değerler IEEE 519-2014' ün belirlediği kabul edilebilir sınır değerler içindedir.

Ayrıca AHE algoritması ile gerilimde meydana gelen düşüş, yükseliş ve harmonikler en iyi şekilde kompanze edilmeye çalışılarak yükün etkilenmemesi hedeflenmiş, ancak gerilimin genliğinde meydana gelen minimal dalgalanmaların önüne tam manasıyla geçilememiştir. Elde edilen bu sonuçlar; adaptif harmonik enjeksiyonu algoritmasının seri aktif güç filtresi ile gerilimden kaynaklı güç kalitesi problemlerinin çözümünde oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Daha sonrasında yapılacak olan çalışmalarda; gerilim kaynaklı güç kalitesi problemleri detaylıca irdelenerek seri aktif güç filtresi alanında yapılan çalışmalar arttırılabilir, makine öğrenmesi yöntemleri uyarlanarak referans işaretlerin tahmin edilmesinde kullanılabilir ve ayrıca seri aktif güç filtreleri gerilim kompanzasyonu haricinde akım harmoniklerinin giderilmesinde de rol alacak şekilde çalışmalar yapılabilir. Son yıllarda ivme kazanan elektrikli araç kullanımı nedeniyle araçların şarj ünitesine bağlandığı noktada sisteme getireceği yük ve güç kalitesinde oluşacak sıkıntılar konusunda çalışmalar yürütülebilir. Ayrıca kaynak gerilimi orta gerilim seviyesinde tutularak oluşturulacak yeni bir sistem için simülasyonlar uyarlanabilir.

KAYNAKLAR

Adak, S. (2003). Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması. Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Akagi, H., Kanazawa, Y., & Nabae, A. (1984). Instantenous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20 (3), 625-630.doi: 10.1109/TIA.1984.4504460

Akçay, M. T. (2010). Dengesiz Çalışma Koşulları için Seri Aktif Güç Filtre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.

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.

Annapoorani, I., Samikannu, R., & Senthilnathan, K. (2017). Series Active Power Filter for Power Quality Improvement Based on Distributed Generation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (22), 12214-12218.

Anwar, H. K. (2009). Gerilim Beslemeli ve Akım Beslemeli Üç Fazlı Şönt Aktif Güç Filtresinin Karşılaştırması ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

Arrillaga, J., Bradley, D., & Bodger, P. (1985). *Power System Harmonics*. New York: Wiley.

Bhatttacharya, S., & Divan, D. (1995). Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filter. *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting* (s. 2531-2540). Orlando, FL, USA: IEEE. doi:10.1109/IAS.1995.530625.

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

Bird, B., Marsh, J., & McLellan, P. (1969). Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Tripple-Frequency Current Injection. *Proceedings of Institution of Electrical Engineers*, 116 (10), 1730-1734. doi: 10.1049/piee.1969.0316.

Bozabalı, M. (2009). Üç Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımı ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Chaudhari, M., & Chandraprakash. (2012). Three-Phase Series Active Power Filter as Power Quality Conditioner. *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (s. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/PEDES.2012.6484387.

Das, J. (2015). Harmonic Distortion Limits According to Standards. J. Das içinde, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs* (s. 427-451). Wiley-IEEE Press. doi: 10.1002/9781118887059.ch10.

Das, J. (2004). Passive Filters - Potentialities and Limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 (1), 232-241. doi: 10.1109/TIA.2003.821666.

Demirdelen, T. (2016). Modelling and Analysis of Modular Cascaded Multilevel Converter Based Shunt Hybrid Active Power Filter for Large Scale Photovoltaic System Interconnection. Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Adana.

Depenbrock, M. (1993). The FBD-Method, A Generally Applicable Tool For Analyzing Power Realtions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8 (2), 381-387. doi: 10.1109/59.260849.

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.

El-Habrouk, M., Darwish, M., & Mehta, P. (2000). Active Power Filters: A Review. Electric Power Applications, *IEEE Proceedings*, 147 (5), 403-413. doi: 10.1049/ip-epa:20000522.

El-Saadany, E. (2001). Effectiveness of Different Filtering Methodologies in Harmonic Distortion Mitigation. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001. Conference Proceedings (Cat. No.01TH8555)* (s. 1035-1040). Toronto, ON, Canada: IEEE. doi: 10.1109/CCECE.2001.933585.

Erken, F., Öksüztepe, E., & Kürüm, H. (2016). Online Adaptive Decision Fusion Based Torque Ripple Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motor. *IET Electric Power Applications*, 10 (3), 189-196. doi: 10.1049/iet-epa.2015.0258.

Farooqi, A., Othman, M. M., Abidin, A. F., Sulaiman, S. I., & Radzi, M. A. (2019). Mitigation of Power Quality Problems Using Series Active Filter in a Microgrid System. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* , 2245-2253. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp2245-2253.

Fujita, H., Akagi, H., & Kohata, M. (1997). Combined Rectifying System Including Double-Series Capacitor-Smoothed Diode Rectifier and Series Active Filter. *Electrical Engineering in Japan* , 120 (1), 85-94. doi: 10.1002/(SICI)1520-6416(19970715)120:1<85::AID-EEJ12>3.0.CO;2-U.

Gali, V., Gupta, N., & Gupta, R. (2017). Mitigaiton 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.

Gothane, A. R., Baliwant, B. B., & Waghmare, V. B. (2019). Simulation and Analysis of Series Active Filter Using AC-AC Converter for Mitigation of Sag. *3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (s. 886-889). Erode,India: IEEE. doi: 10.1109/ICIEA.2017.8283004.

Gündüz, H. (2020). Paralel Aktif Güç Filtresi için Bulanık Uyarlamalı Kesirli PI Kontrolör Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Endtitiüsü*. Balıkesir.

Gyugyi, L., & Strycula, E. (1976). Active AC Power Filters. *Proceeding of IEEE/IIAS Annual Meeting*, 529-535.

Hasan, K. N., & Romlie, M. F. (2007). Comparative Study on Combined Series Active and Shunt Passive Power Filter Using Two Diffrerent Control Methods. *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems* (s. 928-933). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE. doi: 10.1109/ICIAS.2007.4658522.

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

Ilamkar, T. L., & Joshi, V. (2018). Voltage Sag Compensation Using Synchronously Reference Frame Theory Based Dynamic Voltage Restorer. *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)* (s. 1-3). Coimbatore, India: IEEE. doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8550858.

Islam, A., Abeed, M., Rabby, M. K., Rahaman, M. H., Hossain, A., Nur, R. A., et al. (2012). Series Active Power Filter Implementation Using P-Q Theory. *2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)* (s. 915-918). Dhaka, Bangladesh: IEEE. doi: 10.1109/ICIEV.2012.6317511.

Karaman, Ö. A. (2018). Yeni Bir Denetim Algoritmalı Paralel Aktif Güç Filtresi ile Akım Harmoniklerinin Azaltılması. Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Elazığ.

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., & Yumurtacı, R. (2003). *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Kumar, K. P., & Ilango, K. (2014). Design of Series Active Power Filter for Power Quality Improvement. *2014 International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE)* (s. 78-82). Hosur, India: IEEE. doi: 10.1109/ICECCE.2014.7086639.

Lee, G.-M., & Lee, D.-C. (2001). Control of Series Active Power Filters Compensating for Source Voltage Unbalance and Current Harmonics. *IECON'01.The 27th Annual Conference of the IEEE Indaustrial Electronics Society (Cat. No.37243)*. 2, s. 1144-1149. IEEE. doi: 10.1109/IECON.2001.975941.

Manias, S. N. (2016). *Power Electronics and Motor Drive Systems*. Elsevier.

Moran, L., Werlinger, P., Dixon, J., & Wallace, R. (1995). A Series Active Power Filter Which Compensates Current Harmonics and Voltage Unbalance Simultaneously. *Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference.* 1, s. 222-227. Atlanta, GA, USA: IEEE. doi: 10.1109/PESC.1995.474816.

Peng, F. Z., & Lai, J.-S. (1996). Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45 (1), 293-297. doi: 10.1109/19.481350.

Peng, F. Z., Akagi, H., & Nabae, A. (1990). A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26 (6), 983-990. doi: 10.1109/28.62380.

Peng, F. Z., Akagi, H., & Nabae, A. (1993). Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 144-152. doi: 10.1109/28.195900.

Perez, J., Cardenas, V., Pazos, F., & Ramirez, S. (2003). Voltage Harmonic Cancellation in Single Phase Systems Using a Series Active Filter with a Low-Order Controller. VIII IEEE International Power Electronics Congress, 2002. Technical Proceedings. CIEP 2002 (s. 270-274). Guadalajara, Mexico: IEEE.

Pinto, J., Pregitzer, R., Monteiro, F., Couto, C., & Afonso, J. L. (2007). A Combined Series Active Filter and Passive Filters for Harmonics, Unbalances and Flicker Compensation. *International Conference on Power Engineering - Energy and Electrical Drives Proceedings*, (s. 54-59). Setúbal-Portugal. doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380200.

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.

Sandeep, A. (2014). Study of Hybrid Active Power Filter for Power Quality Improvement. Yüksek Lisans Tezi, National Instıtute ofTechnology Rourkela. Rourkela-India.

Sasaki, H., & Machida, T. (1971). A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-90 (5), 2009-2019. doi: 10.1109/TPAS.1971.292996.

Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A. (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46 (5), 960-971. doi: 10.1109/41.793345.

Srianthumrong, S., Fujita, H., & Akagi, H. (2000). Stability Analysis of a Series Active Filter Integrated with a Double-Series Diode Rectifier. *IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018)* , 3, 1305-1311. doi: 10.1109/PESC.2000.880498.

Tedeschi, E. (2009). Cooperative Control of Distributed Compensation Systems in Electric Networks Under Non-Sinusoidal Operations. Doktora Tezi,*Universita Degli Studi Di Padova*.Padova.

Tong, L., Qian, Z., Xue, L., & Peng, F. Z. (2008). A Novel Series-in Series Hybrid Active Power Filter. *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (s. 1874-1878). Austin, TX, USA: IEEE. doi: 10.1109/APEC.2008.4522982.

Turunen, J. (2009). Series Active Power Filter in Power Conditioning. Doktora Tezi, *Tampere University of Technology*. Tampere.

Uçar, F. (2012). Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Elazığ.

Xiangning, X., Yonghai, X., & Lianguang, L. (2000). Simulation and Analysis of Voltage Sag Mitigation Using Active Series Voltage Injection. PowerCon 2000. *2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*. 3, s. 1317-1322. IEEE. doi: 10.1109/ICPST.2000.898160.

Yusof, Y., & Rahim, N. A. (2009). Simulation of Series Active and Passive Power Filter Combination System to Mitigate Current Source Harmonics. *AIP Conference Proceedings, Proceedings of the Second Global Conference.Power Control and Optimization*, 1159, s. 86-91. doi: 10.1063/1.3223960.