

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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN İNCELENMESİ VE AKIM
HARMONİKLERİNİN AZALTILMASI İÇİN AKTİF GÜÇ FİLTRE TASARIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzgün AKMAZ

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ**

HAZİRAN-2012

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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN İNCELENMESİ VE AKIM
HARMONİKLERİNİN AZALTILMASI İÇİN AKTİF GÜÇ FİLTRE TASARIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzgün AKMAZ

091103104

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 Mayıs 2012
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2012**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)

HAZİRAN-2012

Düzgün AKMAZ tarafından hazırlanan GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN İNCELENMESİ VE AKIM HARMONİKLERİNİN AZALTILMASI İÇİN AKTİF GÜÇ FİLTRE TASARIMLARI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç .Dr. Hüseyin ERİŞTİ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)

Tarih : 5 Haziran 2012

ÖNSÖZ

Lineer olmayan yüklerin kullanımının artmasıyla birlikte güç sistemindeki harmonikler önemli bir konu haline gelmiştir. Bu harmoniklerin elenmesi için en uygun yöntem aktif güç filtreleridir.

Bu çalışmada 3 fazlı 3 telli sistemlerdeki lineer olmayan yükler tarafından meydana gelen harmonikler fourier analizi taban kontrolleri ve senkron referans yapı taban kontrolleri ile tasarlanan paralel aktif güç filtreleri (PAGF) tarafından elimine edilmektedir. Aynı zamanda bu iki kontrol yönteminin PAGF' nin performansına olan etkisi incelenmektedir.

Tez çalışmam süresince yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr Hüseyin ERİŞTİ hocama, aileme ve Burcu YANAR'a teşekkürü borç bilirim.

Düzgün AKMAZ

TUNCELİ-2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XII
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgi	1
1.2 Tezin Amacı	2
2. HARMONİK TANIMI, KAYNAKLARI VE ETKİLERİ	4
2.1 Harmonik Tanımı	4
2.2 Harmonik Kaynakları	5
2.3 Harmonik Terimleri	6
2.4 Harmonik Etkileri	7
2.4.1 Harmoniklerin Kondansatör Üzerindeki Etkileri	7
2.4.2 Harmoniklerin Transformatör Üzerindeki Etkileri	8
2.4.3 Harmoniklerin Generatör Üzerindeki Etkileri	9
2.4.4 Harmoniklerin Aydınlatma Sistemlerindeki Etkileri	9
2.4.5 Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkileri	9
2.4.6 Harmoniklerin Güç Elektroniği ve Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkileri ..	10
2.4.7 Harmoniklerin Döner Makineler Üzerindeki Etkileri	10
2.4.8 Harmoniklerin Koruyucu Röleler Üzerindeki Etkileri	11
2.4.9 Harmoniklerin Ölçme Ayrıtları Üzerindeki Etkileri	11

2.4.10	Harmoniklerin İletişim Hatları Üzerindeki Etkileri	12
2.4.11	Harmoniklerin Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri	12
2.5	Harmonik Standartları	13
3.	HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ	15
3.1	Statik Var Kompanzatorleri	15
3.2	Pasif Filtreler	15
3.2.1	Paralel Pasif Filtre	16
3.2.2	Seri Pasif Filtre	18
3.3	Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulamaları	19
3.3.1	Seri Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulaması	19
3.3.2	Paralel Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulaması	21
4.	AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ	23
4.1	Aktif Güç Filtreleri Topolojik Yapısına Göre Sınıflandırma	24
4.1.2	Paralel Aktif Güç Filtresi	24
4.1.3	Seri Aktif Güç Filtresi	25
4.1.4	Hibrit Aktif Güç Filtresi	26
4.1.5	Birleşmiş Güç Kalite Düzenleyicileri	28
4.2	Aktif Güç Filtrelerini Kontrol Prensibine Göre Sınıflandırma	29
4.3	Aktif Güç Filtrelerini Güç Devrelerine Göre Sınıflandırma	30
5.	3 FAZLI SİSTEMLERDE PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ TASARIMI VE KONTROL YÖNTEMLERİ	32
5.1	Paralel Aktif Güç Filtresinin Matematiksel Modeli	32
5.2	Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımındaki Kullanılan Eleman Değeri Seçimi	33
5.2.1	Paralel Aktif Güç Filtre Endüktans Değeri Seçimi	33
5.2.2	Paralel Aktif Güç Filtresindeki Kondansatör Değeri Seçimi ve Gerilim Kontrollü .	34

5.3	Paralel Aktif Güç Filtresi Tetikleme Sinyallerinin Üretilmesinde Kullanılan metotlar.....	36
5.3.1	Histerezis Tabanlı Akım Kontrollü	37
6.	ÇEŞİTLİ AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ VE ÖZELLİKLERİ	40
7.	3 FAZLI SİSTEMLERDEKİ PAGF MATLAB/SİMULİNK DEVRELERİ	48
7.1	Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanılmadan Önceki Lineer Olmayan Yük Ve Bozulum Değerleri	48
7.2	Fourier Analizi Taban Kontrolleri İle 3 Fazlı 3 Telli Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımı.....	50
7.3.1	Fourier Analizi Taban Kontrollü Paralel Aktif Güç Filtresi Simülasyon Sonuçları .	57
7.3	Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü Analizi İle 3 Fazlı 3 Telli Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımı	59
7.3.1	Senkron Referans Yapı Tabanlı Paralel Aktif Filtre Simülasyon Sonuçları	65
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
	KAYNAKLAR.....	70
	ÖZGEÇMİŞ.....	74

ÖZET

Son yıllarda güç şebekelerinde lineer olmayan yüklerin kullanımının artmasıyla birlikte harmonikler oluşmakta ve bu harmonikler sistemlerde gittikçe artan bir sorun haline gelmektedir. Bu durum güç kalitesini önemli ölçüde etkileyip şebekeye büyük zararlar vermektedir. Meydana gelen bu harmonikleri yok etmek için pasif filtreler ve aktif filtreler kullanılmaktadır.

Geleneksel pasif LC filtreleri meydana gelen bu sorunları çözmek için kullanılmaktadır. Fakat pasif filtrelerin sabit kompanzasyon sağlaması, rezonans riskini taşıması ve hantal olmaları gibi dezavantajları vardır. Bu sorunları çözenin etkili bir yolu paralel aktif güç filtreleri aracılığıyla harmonik kompanzasyonu sağlamaktır. Kompanzasyonu sağlayan paralel aktif güç filtrelerinin kontrol sisteminde, birçok farklı metot kullanılabilir. Bu metotlar aktif güç filtresinin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden seçilecek kontrol yöntemi çok önemlidir.

Bu tezde fourier analizi tabanlı kontrol yöntemi ile senkron referans yapı tabanlı kontrol yöntemi gibi gelişmiş iki farklı metot ele alınmıştır. Bu kontrol yöntemleri MATLAB/Simulink paket programında paralel aktif güç filtresinin, yükten elde edilen harmonikleri yok etmesi için tasarlanmış ve test edilmiştir. Her iki yöntem için sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Paralel aktif güç filtreleri, Harmonik kompanzasyon, Güç kalitesi, Harmonikler.

SUMMARY

Design Of Active Power Filters For Investigation of Harmonics On Power System And Reducing Harmonics Current

In the last few years, harmonics have been occurred with the increasing use of nonlinear loads, and these harmonics have been an ever increasing problem for the line systems. This situation importantly affects the quality of power, gives large losses to the network. To destroy these occurring harmonics, passive and active filters are used.

Conventional passive LC filters have been used to prevent these problems. Yet passive LC filters have disadvantages such as stable compensation, having a risk of resonance or being bulky. An efficient way to solve these problems is providing harmonic compensation through parallel active power filters. Many methods can be used in the control systems of the parallel active power filters which provide the compensation. These methods efficiently affect the performance of the active power filters. For this reason, the chosen control method is very significant.

In this thesis, two different advanced methods such as fourier based analysis control method and synchronous reference frame control method are discussed. These control methods are designed for destroying harmonics occurred by loads of parallel active power filters in MATLAB/Simulink pack program and are tested . The results have been compared for each two methods.

Key words: Parallel active power filters, Harmonic compensation, Power quality, Harmonics.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Şebekedeki temel gerilim harmoniği (311V 50 Hz)	4
Şekil 2.2. Şebekedeki üçüncü gerilim harmoniği (80V, 150Hz)	5
Şekil 2.3. Şebekedeki temel gerilim harmoniği ve 3. gerilim harmoniğinin toplamı İle bozulan dalga.....	5
Şekil 3.1 Değişik pasif filtre çeşitleri	16
Şekil 3.2. Paralel pasif filtre	17
Şekil 3.3. Temel frekanstaki paralel pasif filtrenin davranışı	17
Şekil 3.4. Temel frekansın dışındaki belirlenen harmonik frekansındaki paralel pasif filtrenin davranışı.....	17
Şekil 3.5. Seri pasif filtre	18
Şekil 3.6. Temel frekanstaki seri pasif filtre davranışı	18
Şekil 3.7. Temel frekansın dışındaki frekanslarda seri pasif filtre davranışı	18
Şekil 3.8. Seri pasif filtre eklenmeden önceki 150 Ω ' luk yük ve gerilimlerin matlab/simulink modeli	19
Şekil 3.9. İki gerilim kaynağının toplamı ile oluşan yük üzerindeki bozulmuş dalga şekli	19
Şekil 3.10. Seri pasif filtre uygulandıktan sonraki matlab/simulink modeli	20
Şekil 3.11. Seri pasif filtre sonrası yük üzerindeki gerilim şekli	20
Şekil 3.12. Paralel pasif filtre eklenmeden önceki 100 Ω ' luk yük ve gerilimlerin matlab/simulink modeli	21
Şekil 3.13. Şekil 3.13. Üç gerilim kaynağının toplamı ile oluşan yük üzerindeki bozulmuş dalga şekli	21
Şekil 3.14. Paralel pasif filtre uygulandıktan sonraki matlab/simulink modeli	22

Şekil 3.15. Paralel pasif filtre sonrası yük üzerindeki gerilim şekli	22
Şekil 4.1. Paralel aktif güç filtresi	24
Şekil 4.2. Seri aktif güç filtresi	26
Şekil 4.3. Paralel aktif filtre ve paralel pasif filtrelerinin bileşimi ile oluşan hibrit filtre	27
Şekil 4.4. Seri aktif filtre ve paralel pasif filtre bileşiminden oluşan hibrit filtre	27
Şekil 4.5. Birleşik güç kalite düzenleyicisi	28
Şekil 4.6. Gerilim beslemeli aktif güç filtresi	31
Şekil 4.7. Akım beslemeli aktif güç filtresi	31
Şekil 5.1. I kayıp değerini belirleyen blok	36
Şekil 5.2. Histerezis bant	37
Şekil 5.3. 3 Fazlı 3 telli sistemde kullanılan darbe genişlik modülasyonu iç yapısı	38
Şekil 5.4. Histerezis bant akım kontrollü ile akım ve gerilim dalga şekli	38
Şekil 5.5. Histerezis bant ve darbe genişlik modülasyonu için tetikleme sinyallerini oluşturan matlab/simulink bloğu	39
Şekil 6.1. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için temel paralel pasif filtre	40
Şekil 6.2. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için temel seri pasif filtre	40
Şekil 6.3. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için temel paralel aktif filtre	40
Şekil 6.4. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için temel seri aktif filtre	40
Şekil 6.5. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için paralel aktif ve paralel pasif filtrenin paralel kombinasyonu	40
Şekil 6.6. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için seri aktif ve seri pasif filtrenin seri kombinasyonu	40

Şekil 6.7. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için seri aktif ve paralel pasif filtrenin hibrit birleşimi	40
Şekil 6.8. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için paralel aktif ve seri pasif filtrenin hibrit birleşimi	40
Şekil 6.9. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için paralel aktif ve paralel pasif filtrenin seri birleşimi.	40
Şekil 6.10. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için seri aktif ve seri pasif filtrenin paralel kombinasyonu	40
Şekil 6.11. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için seri aktif ve paralel aktif filtrenin kombinasyonu	41
Şekil 6.12. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için paralel aktif ve seri aktif filtrenin kombinasyonu.....	41
Şekil 6.13. Akım kaynaklı lineer olmayan yükler için seri pasif ve paralel pasif filtre kombinasyonu.....	41
Şekil 6.14. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için paralel pasif ve seri pasif filtre kombinasyonu.....	41
Şekil 6.15. Paralel aktif filtre üzerindeki temel gerilimi azaltmak için kullanılan devre 1	41
Şekil 6.16. Seri aktif filtre üzerindeki temel akımı azaltmak için kullanılan devre1	41
Şekil 6.17. Paralel aktif filtrenin temel gerilimini azaltmak için kullanılan devre2	41
Şekil 6.18. Seri aktif filtrenin temel akımını azaltmak için kullanılan devre2	41
Şekil 6.19. Paralel aktif filtre üzerindeki temel gerilimi azaltmak için kullanılan devre 3	41
Şekil 6.20. Seri aktif filtrenin üzerindeki temel akımı azaltmak için kullanılan devre 3 ...	41

Şekil 6.21. Paralel aktif filtrenin temel gerilimini azaltmak için kullanılan devre 4	41
Şekil 6.22. Seri aktif filtrenin temel akımını azaltmak için kullanılan devre 4	41
Şekil 7.1. Paralel aktif güç filtresi bağlanmadan önceki lineer olmayan yük ve Matlab/Simulink bloğu	48
Şekil 7.2. Paralel aktif güç filtresi kullanmadan önceki bozulan şebeke akımları	49
Şekil 7.3. Paralel aktif filtre kullanılmadan önceki şebeke gerilimleri	49
Şekil 7.4. Bozulan şebeke akımının THD değeri	50
Şekil 7.5. Gelen sinyalin büyüklük ve faz açısını, fouier dönüşümü ile hesaplayan Matlab/Simulink bloğu	50
Şekil 7.6. Her bir yük akımının fourier dönüşüm ile faz açısı ve büyüklüğünü bulan Matlab/Simulink bloğu	52
Şekil 7.7. Gelen yük akımı sinyalinin faz açısı hesaplanması ve sinyalin faz kilitlemeli döngüye yollanıp bu faz açısına göre sinüs dalgası üreten Matlab/Simulink bloğu	52
Şekil 7.8. Yük akımının Ia faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü	53
Şekil 7.9. Yük akımının Ib faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü	53
Şekil 7.10. Yük akımının Ic faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü	53
Şekil 7.11. Her bir yük akımının 1. temel harmoniğini bulan Matlab/Simulink bloğu	54
Şekil 7.12. Yük akımlarından temel harmoniğin çıkarılması ile referans akımlarını oluşturan Matlab/Simulink bloğu	55
Şekil 7.13. DGM için tetikleme sinyallerinin oluşması	55

Şekil 7.14. Fourier analizi taban kontrolleri ile referans akımlarının oluşması	56
Şekil 7.15. Fourier analizi taban kontrollü Matlab/Simulink şekli	57
Şekil 7.16. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımları	58
Şekil 7.17. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke gerilimleri	58
Şekil 7.18. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımının THD değeri	59
Şekil 7.19. (a) a-b-c koordinatlarından (b) α - β -0 durağan referans yapıdan d-q-0 senkron referans yapıya dönüşüm	60
Şekil 7.20. Ia, Ib, Ic yük akımlarından Id ve Iq' yu elde etmede kullanılan Matlab/Simulink bloğu.....	61
Şekil 7.21. Iq ve Id akımlarının AA bileşenlerinin bulunmasını sağlayan blok	63
Şekil 7.22. Id ve Iq' den iref(a), iref(b) ve iref(c) referans bileşenlerinin hesaplanması ...	63
Şekil 7.23. Senkron referans yapı tabanlı kontrol algoritması	64
Şekil 7.24. Senkron referans yapı tabanlı kontrol algoritmasının Matlab/Simulink bloğu	65
Şekil 7.25. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımları	66
Şekil 7.26. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke gerilimleri	66
Şekil 7.27. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki THD değeri	67

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Harmonik akım bozulması	14
Tablo 2.2. IEEE-519-1992 Kaynak sağlayıcının kullanıcı barasında sağlaması gereken en yüksek yüzde (%) THD sınır değerleri	14
Tablo 6.1. Çeşitli Filtre Birleşimlerinin Özellikleri	42
Tablo 7.1. Fourier ve senkron tabanlı denetim algoritmaları matlab/simulink parametreleri	56
Tablo 7.2. Kompanzasyon tipleri için gerekli akım bileşenleri	62

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
AGF	: Aktif Güç Filtresi
MATLAB	: Matrix Laboratory
FAKT	: Fourier Analizi Taban Kontrollü
STRYTK	: Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü
PCC	: Ortak Bağlantı Noktası
THD	: Toplam Harmonik Bozulumu
RMS	: Effektif Değer
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynakları
HVDC	: Yüksek Gerilim İle Enerji İletim Sistemleri
Hz	: Hertz
VA	: Volt Amper
VAR	: Volt Amper Reaktif
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovolt Amper
kVAr	: Kilovolt Amper Reaktif
CENELEC	: European Committee For Electrotechnical Standardization
IEC	: International Electrotechnical Commission
SVK	: Statik Var Kompanzatörü
PPF	: Paralel Pasif Filtre
SPF	: Seri Pasif Filtre
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
SAGF	: Seri Aktif Güç Filtresi
BGKD	: Birleşmiş Güç Kalite Düzenleyicileri
HAGF	: Hibrit Aktif Güç Filtresi
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
BJT	: Bipolar Jonksiyon Transistor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
GTO	: Gate Turn Off Thyristor
SIT	: Static Induction Transistor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
EPS	: Epsilon
HB	: Histerezis Band Genişliği
PLL	: Faz Kilitlemeli Döngü
YGF	: Yüksek geçiren filtre

SEMBOLLER LİSTESİ

C	: Kondansatör
C_{DA}	: Paralel aktif güç filtresi DA tarafı kondansatör değeri
d-q-0	: Akımın d, q, 0 eksen bileşenleri
d(ifa/dt)	: A fazı filtre akımının yükselme hızı
F	: Kondansatör birimi farad
f_s	: Anahtarlama frekansı
H	: Bobin birimi Henry
I	: Akım değeri
I_{af}	: Aktif filtre akımı
i_{af+} , i_{af-}	: A fazı akımının yükselen ve düşen kısımları
I_{boz}	: Bozulmuş akımı
I_{da}	: DA tarafındaki maksimum akım
I_d	: Yük akımının d eksen bileşeni
I_{d-}	: Yük akımının d eksen sabit bileşeni
I_{d~}	: Yük akımının d eksen dalgalanan bileşeni
I_f	: Pasif filtrenin çektiği akım
I_h	: Harmonik akımı
I_K	: Aktif güç filtresinin kompanzasyon akımı
I_L	: Ana frekanstaki en yüksek yük akımı
I_o	: Akımın 0 eksen bileşeni
I_{ref(a,b,c)}	: a-b-c fazlarının referans akımları
I_{sc}	: Ortak bağlantı noktasındaki en yüksek kısa devre akımı
I_s	: Şebeke akımı
I_t	: Temel akım
I_{var}	: Paralel pasif filtre reaktif akımı
I_y	: Yük akımı
I_{yh}	: Yük akımı harmonikleri
I_q	: Yük akımının q eksen bileşeni
I_{q-}	: Yük akımının q eksen sabit bileşeni
I_{q~}	: Yük akımının q eksen dalgalanan bileşeni
k	: Pozitif bir katsayı
K_i, K_p	: PI parametreleri
L	: Bobin
L_f	: Aktif güç filtre bobin değeri
n	: Harmonik mertebeye katsayısı
P	: Yükün tükettiği aktif güç
P_{ak}	: Şebekeden çekilen aktif güç
P_f	: Aktif güç filtresinin üretmesi gereken güç
P_{kayıp}	: Aktif güç filtresindeki enerji kayıpları
P_{s(t)}	: Şebekeden çekilen ani güç
P_{3y~}	: Üç fazlı yük aktif gücün dalgalı bileşeninin etkin değeri
Q_c	: Kondansatör kümelerinin sağladığı reaktif güç

Q_s	: Mevcut kısa devre görünen gücü
R	: Direnç
R_f	: Aktif güç filtre direnci değeri
V	: Gerilim değeri
V_{DA}	: Paralel aktif güç filtresinin DA tarafı gerilimi
V_{DA-}	: DA tarafı ortalama kondansatör gerilimi
$V_{DA\sim}$: DA tarafı kondansatör geriliminin dalgalanan bileşeni
V_{df}	: Seri pasif filtre üzerindeki temel gerilim düşümü
V_m	: Maksimum gerilim
V_{sa}	: A fazı anlık kaynak gerilimi
$V_{\text{ş}(t)}$: Şebeke Gerilim değeri
$V_{\text{şh}}$: Şebeke harmonikleri
V_K	: Aktif güç filtresinin kompanzasyon gerilimi
V_T	: Terminal gerilimi
V_t	: Temel gerilim
V_y	: Yük gerilimi
V_{yh}	: Yük gerilimi harmonikleri
w	: AA kaynak gerilim/akım değişiminin açısal hızı
X_p	: Bobin ve kondansatörün AA akımdaki paralel empedansı
X_s	: Bobin ve kondansatörün AA akımdaki seri empedansı
Z	: Empedans
Z_D	: Seri pasif filtre empedansı
$Z_{\text{ş}}$: Şebeke empedansı
Z_f	: Paralel pasif filtre empedansı
Ω	: Direnç birimi ohm
ϕ_n	: Gerilim ve akıma ilişkin n. harmonikteki faz farkı

1.GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Elektrik enerjisi bugünkü sosyal ve ekonomik yaşamın en önde gelen temel gereksinimlerinden biridir. Gelişen teknoloji, yükselen yaşam düzeyi ve artan nüfusla birlikte bu enerjiye olan gereksinim her geçen gün büyük ölçüde artmaktadır. Bu artan ihtiyaçla birlikte üretilen enerjinin kayıpsız bir şekilde iletilmesi ve verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Ancak elektrik enerjisi güç kalite problemleri, elektrik enerjisinin kullanılmaya başlandığı tarihten günümüze kadar güncelliğini korumaktadır. Buradaki güç kalitesi terimi; şebekenin dengeli, frekansın sabit, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüzoidal biçimde olduğu sistemler için tanımlanmaktadır.

Son yıllarda güç elektroniği uygulamalarının artmasıyla birlikte doğrusal olmayan yüklerin kullanımı da artmaktadır. Bu kullanılan doğrusal olmayan yükler, şebekeden harmonik akım ve reaktif güç çekmektedir. Bu durum şebekelerde reaktif güç yükü, ısınmalar ve düşük güç kalitesi gibi sorunlara yol açmaktadır (Huang ve Wu, 1999; Sing vd., 1999).

Lineer olmayan bu yüklerin şebekelerdeki bozucu etkilerini sınırlamak amacıyla üretici ve kullanıcıya bazı standartlara uyma zorunluluğu getirilmiştir. Bu standartlardan biride Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE 519-1992) standartlarıdır. IEEE 519-1992 standartları endüstriyel dağıtım sistemlerindeki harmonik akımlar kadar harmonik gerilimler içinde önerilen kurallar belirlemiştir (URL-1, 2012). Belirlenen harmonik standartları akım için %5 iken gerilim için ise %3 tür (Gezegin, 2006). Belirlenen standartlarda harmonik eliminasyonunu sağlamak ve güç faktörünü arttırmak için pasif filtreler ve aktif güç filtreleri (AGF) kullanılmaktadır.

Geleneksel olarak pasif filtreler harmonikleri elemek ve güç faktörünü arttırmak için uygulanmıştır. Fakat bu filtrelerin büyük hacimli olmaları, rezonans riskini taşımaları ve sabit bir kompanzasyon sağlamaları gibi bir takım dezavantajları vardır (Sing vd., 1998).

Pasif filtrelerin meydana getirdiği bu sorunların üstesinden gelebilmek ve istenmeyen harmonikleri yok etmek için kontrol tekniklerinin ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte aktif güç filtre tasarımları ön plana çıkmıştır. AGF harmonik kompanzasyonu için önemli bir tür yol sunmaktadır. Yüksek kontrollüğü ve hızlı yanıt özelliğine sahip aktif güç filtreleri frekans ve empedans değişimini otomatik olarak karşılar (Xia ve Han, 2006). Bu filtreler reaktif güç kompanzasyonu, harmonik akım kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, frekans regülasyonu ve üç faz akımlarını dengelemek gibi birçok fonksiyona sahiptir (Akagi, 2000; Atan ve Hussien, 2008; Jou, 1995).

Genel olarak bir AGF yüke seri bağlı bir gerilim kaynağı (seri aktif güç filtresi) ya da yüke paralel bağlı bir akım kaynağı (paralel aktif güç filtresi) gibi düşünölmektedir. Paralel aktif güç filtreleri, akım dengesizliklerini, yüksek ve düşük dereceli harmonikleri, nötr akımlarını ve reaktif gücü bastırmak için kullanılmaktadır. Diğer taraftan gerilim çökme ve sıçramaları, gerilim dengesizlikleri ve gerilim harmonikleri gibi şebeke ve yük üzerindeki bozulmalar da seri aktif güç filtreleri kullanılarak ortadan kaldırılabilmektedir (Uçar, 2005). Son yıllarda AGF alanında önemli çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan AGF ilk olarak Bird vd. (1969) tarafından yapılan çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra üzerinde Ametani (1972) tarafından yapılan çalışmalarla geliştirilmiştir. Gelişen güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 1980'li yılların başlarından itibaren kullanımı pratik bir değer kazanmış ve endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlanılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezde güç şebekelerindeki harmonikler, harmoniklerin etkileri, harmonik standartları, harmonikleri filtreleme yöntemleri ve bu filtreleme yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. Aynı zamanda 3 fazlı 3 telli sistemlerde Matlab/Simulink programı kullanılarak Fourier Analizi Tabanlı Kontrol (FATK) ve Senkron Referans Yapı Tabanlı Kontrol (SRYTK) paralel AGF tasarımı detaylı olarak anlatılmakta, uygulama ve simölasyon sonuçları tartışılmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde, harmonik tanımı, harmonik kaynakları, harmonik terimleri, harmonik etkileri ve standartları incelenmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde, harmoniklerin filtrelenmesindeki statik var kompanzatörleri, çeşitli pasif filtreler bu pasif filtreleri avantajları, dezavantajları ve pasif filtre uygulamaları incelenmektedir.

Tezin dördüncü bölümünde, çeşitli AGF'leri, bu filtrelerin topolojik yapılarına göre sınıflandırılması, kontrol prensiplerine göre sınıflandırılması, bu aktif filtrelerin özellikleri ve fonksiyonları incelenmektedir.

Tezin beşinci bölümünde, aktif, pasif, hibrit ve birleşik güç kalite düzenleyicisi filtrelerden oluşan farklı filtre özellikleri, uygun olduğu yük, çalışma prensibi ve fiyatları incelenmektedir.

Tezin altıncı bölümünde, paralel AGF matematiksel denklemleri, bu filtrelerde kullanılacak olan eleman değerlerinin seçimi, kullanılacak olan akım kontrol tekniği incelenmektedir.

Tezin yedinci bölümünde, Fourier Analizi Taban Kontrollü ve Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü PAGF simülasyon tasarımına yer verilmiştir. Bu kontrol metotları detaylı olarak anlatılmakta, bu filtrelerin bağlanmadan önceki ve bağlandıktan sonraki dalga şekilleri incelenmekte ve sonuçları kıyaslanmaktadır.

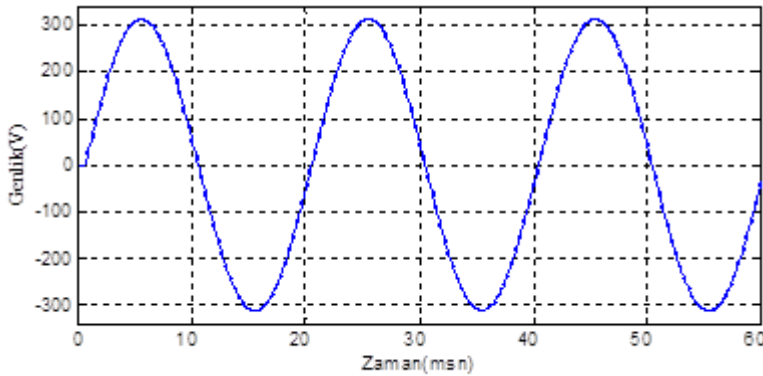
Tezin sekizinci bölümünde, araştırma sonuçları verilmekte ve simülasyon sonuçları değerlendirilmektedir.

2.HARMONİK TANIMI, KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

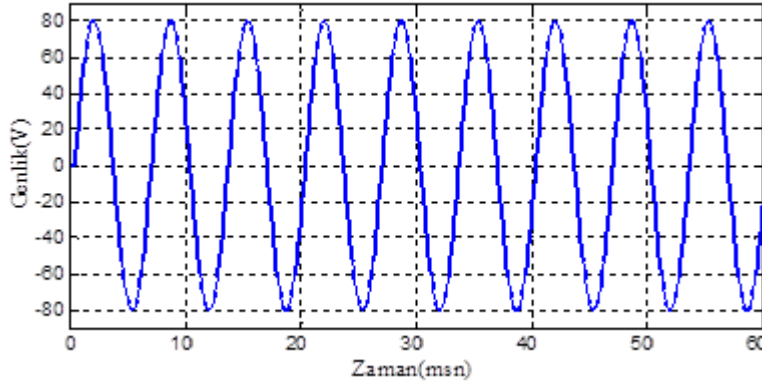
2.1. Harmonik Tanımı

Elektrik güç sistemindeki doğrusal olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi sorunlara neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilemektedir. Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli, temel frekanstaki sinüzoidal dalga formuna sahip olmalıdır. Bu dalga şekli için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve doğrusal yüklerle yüklenmesi gereklidir. Ancak, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konvertörler, güç elektroniği elemanları, ark fırınları, kesintisiz güç kaynakları gibi doğrusal olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin nonsinüzoidal, yani harmonik bozuluma neden olabilirler.

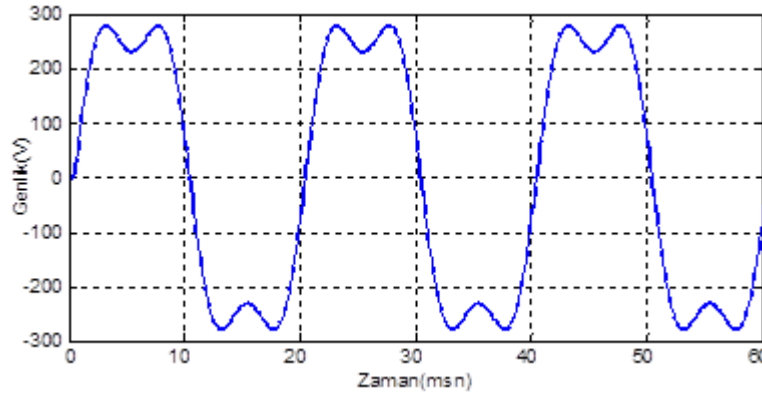
Bir harmonik, temel güç frekansının katlarındaki frekansa sahip sinüzoidal dalga şeklindedir (Henderson ve Rose, 1994; Phipps vd., 1994; Subjak ve Mcquilkın, 1990; URL -1, 2012; Wagner vd., 1993). Bu şekilde düşünüldüğünde güç sistemlerindeki bozulmuş gerilim veya akım dalga formları, içinde temel güç frekanslarının katlarına sahip çeşitli büyüklükteki saf sinüzoidal dalga bileşenlerinden meydana gelmiştir. Bu bozulmaları oluşturan harmonik bileşenlerin frekansları arttıkça büyüklükleri ters şekilde azalmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.1' deki tepe değeri 311 V ve frekansı 50 Hz olan sinüzoidal temel şebeke gerilimine Şekil 2.2' deki tepe değeri 80 V ve frekansı 150 Hz olan sinüzoidal 3. gerilim harmoniğinin eklenmesiyle Şekil 2.3' teki bozulmuş olan dalga şekli elde edilmektedir. Burada da görüldüğü gibi bozulmuş olan dalga şekilli, frekansı ve büyüklüğü farklı olan sinüzoidal dalga gerilimlerinin birleşmesiyle oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Şebekedeki temel gerilim harmoniği (311 V 50 Hz)



Şekil 2.2. Şebekedeki üçüncü gerilim harmoniği (80 V, 150 Hz)



Şekil 2.3. Şebekedeki temel gerilim harmoniği ve 3. gerilim harmoniğinin toplamı ile bozulan dalga

2.2. Harmonik Kaynakları

Elektrik şebekeleri sistemleri ideal olarak, sabit bir gerilim ve sabit bir elektriksel enerji kaynağı frekansından oluşur (50-60 Hz). Güç elektroniği uygulamalarının artması, elektrik şebekelerinde sinüzoidal olmayan gerilimlerin ve akımların miktarlarının artmasına sebep olmuştur (Wagner vd., 1993). Bunlara sebep olan lineer olmayan yüklerin bazıları aşağıda sıralanmıştır (Phipps vd., 1994; Yıldız, 2006).

- ✓ Transformatör doyumu
- ✓ AA Döner makineleri
- ✓ Kesintisiz güç kaynakları (UPS)
- ✓ Anahtarlamalı güç kaynakları

- ✓ Kaynak makineleri
- ✓ Kontrol devreleri
- ✓ Frekans dönüştürücüleri
- ✓ Jeneratörler
- ✓ Elektriksel ark fırınları
- ✓ Flüoresan lamba
- ✓ Bilgisayar anahtar modlu güç kaynakları
- ✓ Batarya şarj cihazı
- ✓ Kusurlu AA kaynakları
- ✓ Statik var kompanzatörleri
- ✓ Değişken frekanslı motor sürücüleri
- ✓ DA konvertörler
- ✓ İnvörtörler
- ✓ Televizyon güç kaynakları
- ✓ Yüksek gerilim ile enerji iletim (HVDC) sistemleri
- ✓ Elektrikli ulaşım sistemleri
- ✓ Redresörler
- ✓ Elektronik balastlar
- ✓ Fotovoltaik sistemler
- ✓ Döner rotorlu makineler
- ✓ İndüksiyon fırınları

2.3. Harmonik Terimleri

Harmonik analizi ile ilgili birçok önemli kavram ve terim bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Ortak Bağlantı Noktası (PCC) ve Toplam Harmonik Bozulumu (THD) dir. PCC harmonik gerilimin ve akımın hesaplandığı veya ölçüldüğü yerdir (URL – 1, 2012). THD ise gerilim ve akım dalgalarındaki bozulmayı ifade eden bir göstergedir. THD harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının temel bileşenin efektif değerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Gerilim ve akımın THD değerleri denk.(2.1) ve denk.(2.2)' deki gibi hesaplanmaktadır (Bozabalı, 2009).

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.2)$$

2.4. Harmonik Etkileri

Güç şebekelerindeki harmoniklerin etkisi, stres ve yüksek kan basıncının insan vücudunda oluşturduğu etkilere benzetilebilir. Yüksek seviyedeki harmonik bozulumu herhangi bir dağıtım sistemi ekipmanlarında problemlere yol açabilir. Harmonik varlığıyla oluşan problemlerin şiddeti, bozulan dalga formunun büyüklüğüne ve var olan cihazların duyarlılığına bağlıdır. Bu problemler anlık veya kalıcı problemler arasında değişmektedir. Teknik ve ekonomik bakımdan pek çok etkisi olan harmoniklerin, etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması hem enerji kalitesi açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir (Subjak ve Mcquilkın, 1990).

2.4.1. Harmoniklerin Kondansatör Üzerindeki Etkileri

Paralel kondansatör kullanımı, gerilim şekli bozulmalarını azaltır ve güç faktörünü artırır. Ayrıca harmonik seviyeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kondansatörler harmonik üretmezler fakat olası rezonans şartları için şebeke ağları sağlarlar. Eğer eklenen kondansatörler sistem gerilimi veya akımındaki, rezonans frekansı aralığındaki bir harmonik frekansa ayarlanmışsa, büyük miktardaki akımlar veya gerilimler oluşur. Buda dielektrik yetmezliğine veya kondansatör bozulmasına yol açabilir (Wagner vd., 1993; URL-1, 2012). Kondansatörlerdeki sigorta atmaları harmonik problemin bir belirtisidir (Wagner vd., 1993). Bir düşük gerilim sistemi ile kondansatör kümelerinin rezonans frekansı şu şekilde bulunabilir.

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (2.3)$$

Burada n, rezonans oluşturabilecek harmonik sırasidir. Q_s , mevcut kısa devre (kVA) görünen gücü ve Q_c ise kondansatör kümelerinin sağladığı (kVAr) reaktif güçtür. Bazı düşük gerilim tesislerinde aşağıdaki yönergeler takip edilebilir.

- ✓ Eğer harmonik üreten yükün görünen gücü (kVA), transformatörün görünen güç değerinin % 10' undan daha az ise rezonans durumu düşünülmezsizin kondansatörler uygulanabilir.
- ✓ Eğer harmonik üreten yükün görünen gücü (kVA), transformatörün görünen gücü değerinin % 30' undan daha az ise ve kondansatörün reaktif gücü (kVAr) transformatörün görünen güç değerinin % 20' den daha az ise kondansatörler rezonans kaygısı olmadan uygulanabilir.
- ✓ Eğer harmonik üreten yükün görünen gücü (kVA), transformatörün görünen gücü (kVA) değerinin % 30' undan daha fazla ise kondansatörler filtre olarak uygulanmalıdır.

2.4.2. Harmoniklerin Transformatör Üzerindeki Etkileri

Transformatörler üzerindeki güç sistem harmoniklerinin başlıca etkisi, yük akımlarının harmonik bileşenleri ile oluşan ek ısınmalardır. Diğer problemler, transformatör endüktansı ve sistem kapasitansı arasındaki olası rezonans durumu, sıcaklık çevrimi yüzünden oluşan mekaniksel izolasyon zorlaması ve olası küçük iç titreşimlerdir (Wagner vd., 1993).

Sistem harmoniklerinin neden olduğu ek ısınmaların, transformatörlerin sıcaklık sınıflandırması içinde kalması için yük kapasitesinin azalmasını veya sinüzoidal olmayan yük akımları için özel transformatör kullanımını gerektirir. Harmoniklerin oluşturduğu ek ısınmalar sonucunda transformatörün ömrü azalacaktır (Wagner vd., 1993).

İzolasyon transformatörleri, harmonik üreten yükler ile dağıtım sistemi etkilerini sınırlamak için kullanılabilir. Son zamanlarda ‘k’ nominal transformatörleri aşırı ısınmalara ve stres zararlılarına karşı koymada büyük bir özellik olarak üretilmiştir (Henderson ve Rose, 1994).

2.4.3. Harmoniklerin Generatör Üzerindeki Etkileri

Harmonikler generatör üzerinde, transformatör üzerinde oluşan problemlere benzer sorunları oluşturmaktadır. Boyutlandırma ve koordinasyon, gerilim, regülatör ve kontrollerinin işleyişi için önemlidir. Aşırı harmonik gerilim bozulmaları, akım dalga formunun çoklu sıfır geçişlerine neden olacaktır. Çoklu sıfır geçişleri, gerilim regülatörü zamanlamasını etkiler, girişim ve işletme süreksizliğine neden olur (URL-1, 2012).

2.4.4. Harmoniklerin Aydınlatma Sistemlerindeki Etkileri

Akkor flomanlı lambalar işletim gerilim seviyelerine duyarlı olmaları nedeniyle, bozulan gerilim ile işletildiğinde kullanım ömürleri azalır. Eğer harmonik bozulumu nedeni ile işletilen etkin gerilim, anma geriliminin üzerindeyse yükseltilmiş flaman sıcaklığı, lamba ömrünü azaltır. Kaufman sürekli işletmeler için % 105 nominal rms (etkin) gerilimin, lamba ömrünü % 47 azalttığını tanımlamaktadır (Wagner vd., 1993).

2.4.5. Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkileri

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına sebep olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi literatürde deri etkisi olarak bilinen ‘skin-effect’ sonucudur. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artmasıyla meydana gelen ek artıştır.

İkinci etki ise tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinde büyük akımların meydana gelmesidir. Bazı doğrusal olmayan elemanlar büyük değerde 3 ve 3’ün katları harmonik bileşenleri üretirler.

Temel frekanstaki dengeli 3-fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3-fazlı sistemlerde üçüncü mertebeden (3.,9.,15.,....) harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirirler. Harmonik mertebesi “n” için fazlar arasında $n.120^\circ$ lik faz farkı olduğundan 3 ve 3'ün katı harmoniklerin her biri 360° lik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olurlar. Bu nedenle nötr akımının değeri, faz akımının değerinin 1,7 katına kadar çıkabilmektedir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı kesitte olsa bile bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu sorun en çok, 3-fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem, nötr iletkenini faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğündeki kesitlerde yapmaktır (Yıldız, 2006).

2.4.6. Harmoniklerin Güç Elektroniği ve Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra harmonik bozulmaya çok duyarlıdır. Bu elemanların doğru çalışması gerilim sıfır geçişlerinin doğru saptanmasına bağlıdır. Harmonik bozulma, gerilim sıfır geçişlerini kaydırır. Bu durum birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Bu kayma nedeniyle oluşan komütasyon hataları elemanların çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Yarı-iletken elemanlarda delinme etkileri ve ek ısınma etkileri görülür. Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarında harmoniklerin birtakım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örneğin tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, ateşleme anlarının değişmesi gibi durumlar meydana gelebilir (Başman, 2006).

2.4.7. Harmoniklerin Döner Makineler Üzerindeki Etkileri

Harmonik gerilim ve akımlarının en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinaların verimi ile momentinin düşmesine ve sinüzoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması veya senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar da

görülebilmektedir. Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının neden olduğu başlıca sorunlardan birisidir. Elektrik makinelerinde kayıplar, uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebiyle motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Harmonik bileşenler, motor performansını %5 ile %10 arasında azaltmaktadır (Yıldız, 2006).

2.4.8. Harmoniklerin Koruyucu Roleler Üzerindeki Etkileri

Genel olarak koruma sistemleri temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik bozulmadan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Dalga şeklinin bozulması koruma rölelerinin performansını etkileyerek; ya gerektiğinde çalışmamasına ya da uygun olmayan yerde çalışmasına neden olurlar. Faz açısının gerilim veya akım dalga şeklinin temel bileşen ile harmonik bileşenler arasında değişmesi, rölenin cevabını önemli ölçüde etkiler (Başman, 2006).

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Özellikle sayısal mesafe koruma rölelerinde büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerindeki yapılan testlerden, %10-20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerden fazla bir işletme problemi oluşmadığı gözlenmiştir (Başman, 2006).

2.4.9. Harmoniklerin Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüzoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuma özelliklerine sahiptirler (Filiz, 2006).

Elektrik sayaçları ve aşırı akım röleleri gibi indüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akının ve diskte indüklenen girdap akımlarının çarpımı ile orantılıdır. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik bozulmanın oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Genelde önemli hataların oluşması için bozulma seviyesinin %20' den büyük olması gerekir (Filiz, 2006).

2.4.10. Harmoniklerin İletişim Hatları Üzerindeki Etkileri

İletişim ve telefon hatlarının yan yana bulunması, telefon haberleşmesi ile parazit oluşturur. Güç devresindeki akım akısı, yakınındaki iletişim devresi iletkenlerinde akım/gerilim indükleyecek bir manyetik/elektrostatik alan oluşturabilir. Parazitlerin miktarı akım/gerilim genliğine ve frekansa bağlıdır. Haberleşme devrelerindeki gürültü, iletim kalitesini azaltır; iletilen sinyalle girişim yapabilir veya gönderilen bilgide kayba neden olabilir (Başman, 2006).

2.4.11. Harmoniklerin Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri

Akımda meydana gelen harmonik bozulma, kesicilerinin akım kesme yeteneklerini etkilemektedir. Devre kesicilerinin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin, harmoniklerin bulunduğu durumlarda doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürülmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkin yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Harmonik akımları ayrıca ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesi ile akımı zamansız kesmeler söz konusu olur. Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Ayrıca, harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinde temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmekte, bu da sonuçta akım kesme işlevini zorlaştırabilmektedir (Yıldız, 2006).

2.5. Harmonik Standartları

Doğrusal olmayan yüklerin kullanım miktarları arttıkça, bu yüklerin etkileri sınırlandırmak zorunlu hale gelmiştir. Bazı standart organizasyonları bu yükler için konu sınırlarına sahiptir. Belirlenen sınırlar yüklerin etkilerine ve standart kuruluşların en iyi kararına dayalı olmaktadır.

İlk harmonik standartları Avrupa’ da oluşturulmuştur. 1969 European Committee For Electrotechnical Standardization (CENELEC) ve International Electrotechnical Commission (IEC), ev aletlerinde kullanılan yarı iletken devrelerin oluşturduğu harmoniklerin etkilerini araştırmak için bir araya gelmiştir. İlk standart (EN 50006) 1975 yılında CENELEC tarafından yayınlanmış ve 14 avrupa ülkesi bu standartları uygulamıştır. Daha sonra 1982’ de Almanya daha geniş kapsamlı olan IEC 555 dokümantasyonunu oluşturulmuştur. 1991 yılında CENELEC, IEC-555-2 standartlarını ortaya çıkarmıştır (EN 60555-2). Günümüzde, IEC standartları 555 revizyon altında olup ev yüklerinden, bütün yüklere doğru araştırma geliştirilmektedir (Key ve Lai, 1993).

Bir diğer harmonik standardı ise IEEE standartlarıdır. Amerika Birleşik Devletlerinde IEEE sanayi uygulamaları derneği 1973’ de harmonik standartları belirlenmesi için çalışma başlatmış ve ilk IEEE 519 kılavuzu 1981’ de yayınlanmıştır. 1986’ da IEEE 519 standartlarını geliştirmek için güç mühendisliği, endüstriyel uygulama topluluğuyla birleşmiştir. Bunun sonucu olarak standartların görünüş ve içeriği oldukça artmıştır. 1992 yılında IEEE 519 güç sistemindeki harmoniklerin tavsiye edilen uygulamalarını, nedenlerini, etkilerini ve kontrollerini sağlamak için onaylanmıştır. Bu standartlar IEEE 519-1992 standartları başlığı altında yayınlanmış ve bu standartlar hem gerilim hem de kullanıcı akımlarının bozulmalarını sınırlamaktadır (Key ve Lai, 1993).

Bu konudaki standartlarda sınırlamalar yüzde (%) THD olarak gösterilmektedir. Birçok ülke için harmoniklerin sınırlandırılmasında, THD kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Sonuçta izin verilen THD değerleri IEEE Standardı 519-1992[8]’ ye göre gerilim için %3 akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu sınır değerlerin üzerinde bulunan harmonik oranları, elektrik tesislerinde ekonomik sorunlara yol açmaktadır (Gezegin, 2006).

Tablo 2.1.' de IEEE-519-1992 standartlarına göre harmonik akım sınır değerleri gösterilmiştir. Akım harmonik bozulması sınırları şebekeye ortak bağlantı noktasında bağlı doğrusal olmayan yükler için ve 2.3-69 kV gerilim aralığında belirlenmiştir. I_{sc} ortak bağlantı noktasındaki en yüksek kısa devre akımıdır. I_L ana frekanstaki en yüksek yük akımıdır. THD toplam harmonik bozulmasıdır.

Çift harmonikler için sınır değerler ise verilen değerlerin %25'i kadardır. Standartlara göre ortak bağlantı noktasında (point of common coupling-PCC) gerilim harmoniği toplam bozulması %5'i geçemez (Gezegin, 2006). Tablo 2.2.' de ise baraların uyması gereken gerilim bozulma değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Harmonik akım bozulması

I_{sc}/I_L	Tek Harmonik Sayısı h(%)					THD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tablo 2.2. IEEE-519-1992 Kaynak sağlayıcının kullanıcı barasında sağlaması gereken en yüksek yüzde (%) THD sınır değerleri

Genel bağlantı noktasındaki bara gerilimi	Her bir gerilim bozulma yüzdeleri	Toplam gerilim yüzdeleri
69kV altı	3.0	5.0
69kV -138kV arası	1,5	2,5
138kV ve üstü	1.0	1,5

3. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

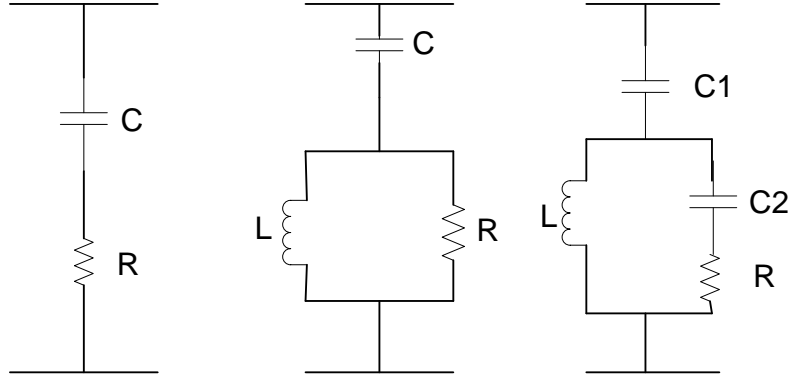
Son yıllarda, güç elektroniği uygulamalarının artmasıyla birlikte kullanılan tristör ve diğer yarı iletken araçlar, ayarlanabilen hız sürücüleri, ark fırınları, bilgisayar güç kaynakları gibi lineer olmayan yük kullanımları artmaktadır. Bu lineer olmayan yükler alternatif akım şebekesinden reaktif güç çekmekte ve harmonik akımlar üretmektedir. Meydana gelen bu harmonikler reaktif güç yükü, dengesizlik, aşırı nötr akımları, ısınmalar ve düşük güç faktörüne neden olmaktadır (Akagi, 1996; Fujita ve Akagi, 1991; Huang ve Wu, 1999; Jou vd., 2005; Li ve Tian, 2008; Sing vd., 1999). Elektrik enerji sistemleri üzerinde bu olumsuz etkiler meydana getiren harmoniklerin ya ortadan kaldırılması ya da etkisinin en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bunun için statik var kompanzatörleri, pasif filtreler ve aktif güç filtreleri kullanılmaktadır.

3.1. Statik Var Kompanzatörleri

Güç faktörü problemlerini çözmek için statik var kompanzatörlerinin (SVK) birçok farklı konfigürasyonları yayınlanmıştır. Fakat bazı SVK konfigürasyonları düşük bileşenli harmonikleri kendi kendine üretmektedir. Aynı zamanda bazı SVK konfigürasyonlarının yanıt süresi, hızlı dalgalanan yükler için çok uzun olduğu kabul edilmektedir (Jou, 1995).

3.2. Pasif Filtreler

Geleneksel olarak şebekelerdeki güç kalite problemlerini çözmek ve meydana gelen harmonikleri elemek için pasif filtreler kullanılmaktadır (Jou, 1995; Sing vd., 1998). Pasif filtreler direnç, bobin ve kondansatör (R-L-C) gibi pasif elemanların değişik bağlantı şekillerinden meydana gelirler. Bu filtreleme şebekede istenilmeyen harmonik bileşenlerin L-C pasif elemanların ayarlanmasıyla yok etme prensibine dayanmaktadır. Pasif filtreler şebekeye paralel veya seri olarak bağlanabilirler. Şekil 3.1' de farklı türlerdeki pasif filtre bağlantı şekilleri gösterilmiştir.

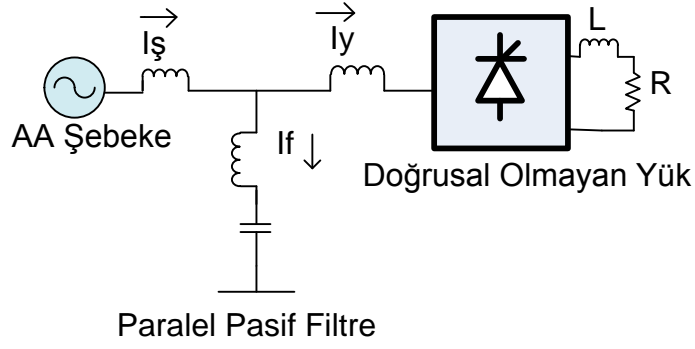


Şekil 3.1. Değişik pasif filtre çeşitleri

Pasif filtrelerin basit oluşu, düşük fiyatları, yüksek etkinlikleri ve temel frekansta reaktif güç ihtiyacını aynı anda karşılayabilmesi gibi avantajları olmasına rağmen bu filtrelerin, kaynak empedansı ve sistemdeki frekans değişiminden etkilenmesi, kaynakla beraber seri ve paralel rezonans gibi risklerinin olması, filtreleme frekansının sabit olup kolay kolay değiştirilememesi ve büyük hacimli olmaları gibi dezavantajları vardır (Bhattacharya ve Divan, 1995; Fujita ve Akagi, 1991; Jou, 1995; Jou vd., 2005; Li ve Tian, 2008; Peng vd., 1990; Sing vd.,1998; Singh vd., 1999; Sing vd., 2005; Turunen vd., 2005; Xia ve Han, 2006). Bu yüzden pasif filtreler sisteme bağlanmadan önce detaylı bir araştırma yapıp sistem bilgisi toplanmalı ve pasif filtrelerin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulmalıdır.

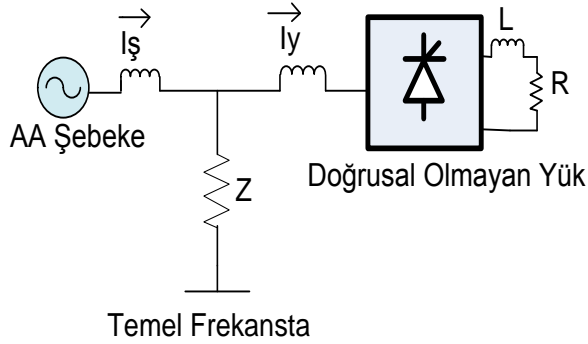
3.2.1. Paralel Pasif Filtre

Paralel pasif filtre (PPF) her bir harmonik frekansı için ya da belirli bir harmonik frekansının üstündeki tüm frekanslar için ayarlanabilir. Burada PPF istenilmeyen harmonik frekansında, L-C elemanlarının rezonansa girmesiyle bu harmonik bileşeni ortadan kaldırır. Ayrıca, belirli bir harmonik frekansı üzerindeki tüm frekanslar için yüksek geçiren filtre gibi davranarak bütün yüksek frekanslı harmonikleri ortadan kaldırır. Bu şekilde şebekelerdeki harmonikler elenmiş olur. Şekil 3.2' de temel PPF şekli gösterilmiştir.

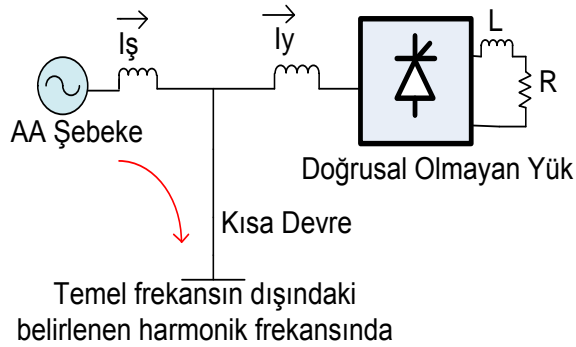


Şekil 3.2. Paralel pasif filtre

PPF' nin temel şebeke frekanstaki davranışı Şekil 3.3' deki gibidir. Burada PPF temel frekansta belli bir empedans (z) göstermektedir. Şekil 3.4' de ise temel şebeke frekansının dışındaki, belirlenen harmonik frekanstaki PPF' nin davranışı görülmektedir. PPF harmonikli frekansa çok düşük bir empedans gösterip, harmonikli akımı veya gerilimi toprağa aktarır. Bu şekilde harmonik kompanzasyon sağlanmış olunur.



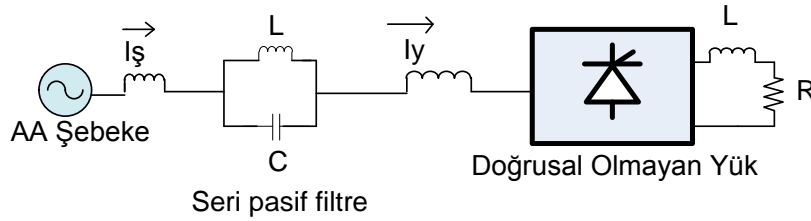
Şekil 3.3. Temel frekanstaki paralel pasif filtrenin davranışı



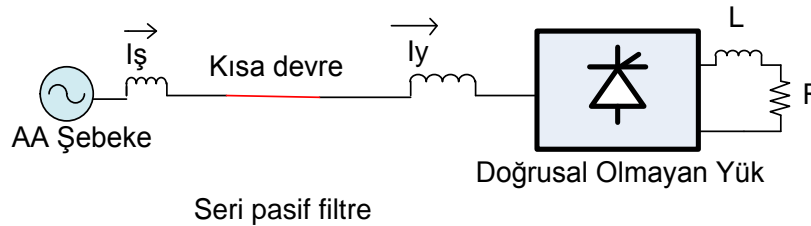
Şekil 3.4. Temel frekansın dışındaki belirlenen harmonik frekansındaki paralel pasif filtrenin davranışı

3.2.2. Seri Pasif Filtre

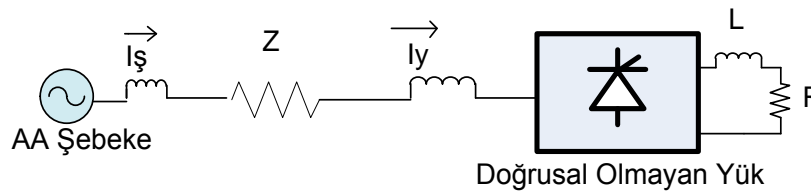
Seri pasif filtre (SPF) yük ile kaynak arasında seri bağlanmaktadır. Bu filtre şebeke frekansına düşük bir empedans göstererek temel harmonik bileşenin geçmesine izin verir. Fakat şebeke frekansı dışındaki tüm frekanslara yüksek bir empedans göstererek harmoniklerin geçişine engel olur. Şekil 3.5, temel SPF şemasını göstermektedir. Şekil 3.6'da temel frekanstaki SPF'nin davranışını göstermektedir. Bu şekilden görülebileceği gibi temel frekansta seri bağlı pasif filtre kısa devre gibi davranarak akımın veya gerilimin geçişine izin verir. Şekil 3.7' de ise SPF' nin temel şebeke frekansı dışındaki harmoniklere karşı davranışını göstermektedir. Burada harmonik frekanslara yüksek bir empedans gösterilerek harmonik geçişine engel olunur.



Şekil 3.5. Seri pasif filtre



Şekil 3.6. Temel frekanstaki seri pasif filtre davranışı

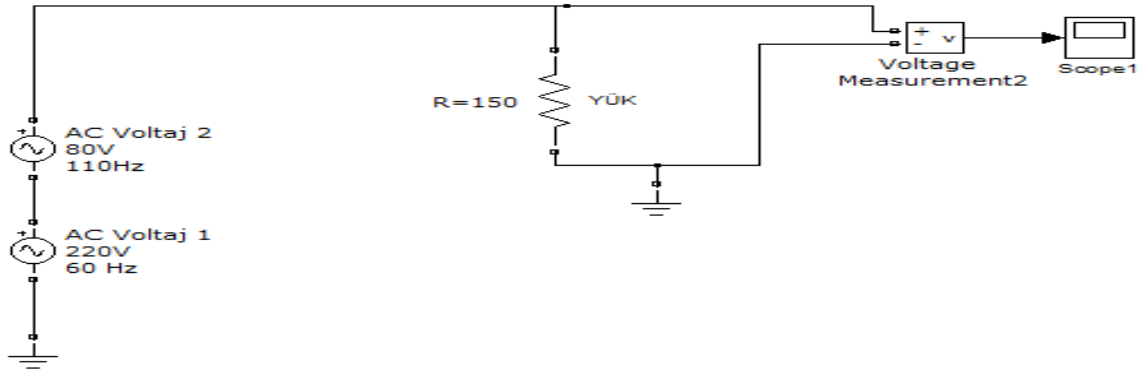


Şekil 3.7. Temel frekansın dışındaki frekanslarda seri pasif filtre davranışı

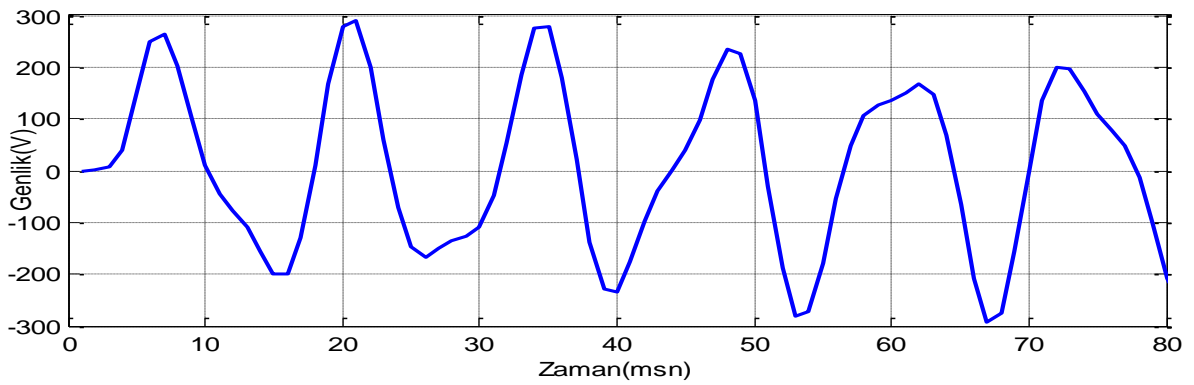
3.3. Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulamaları

3.3.1. Seri Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulaması

Şekil 3.8’ de gösterildiği gibi 150 Ω ’ luk yük 220 V, 60 Hz’ lik temel harmonik ve 80V, 110 Hz değerindeki sistemde istenmeyen harmonik toplamından oluşan bozulmuş bir gerilim dalgasıyla beslenmektedir. Bu iki gerilim dalgasıyla oluşan bozulmuş dalga şekli, Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.

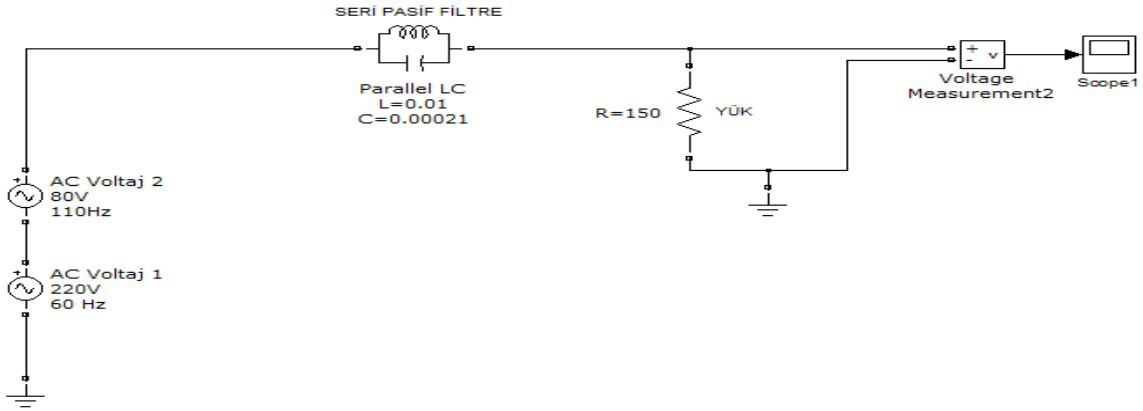


Şekil 3.8. Seri pasif filtre eklenmeden önceki 150 Ω ’ luk yük ve gerilimlerin Matlab/Simulink modeli

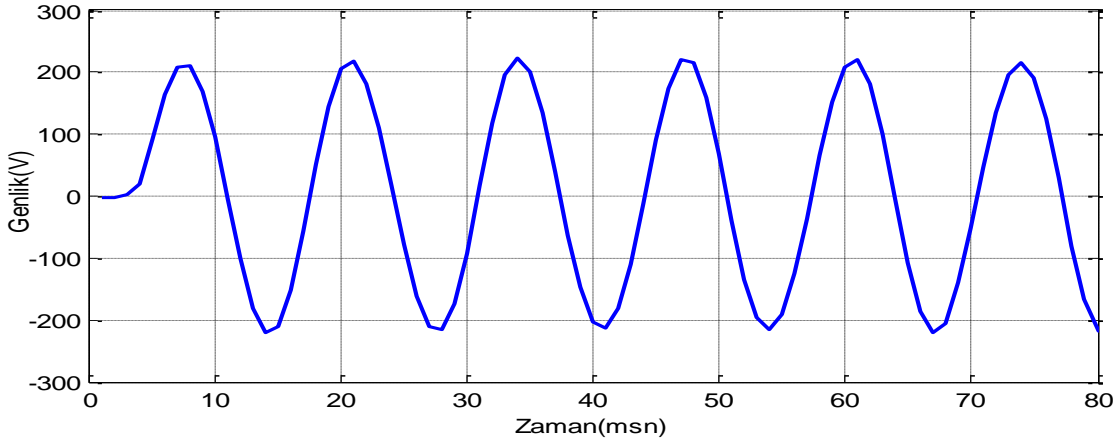


Şekil 3.9. İki gerilim kaynağının toplamı ile oluşan yük üzerindeki bozulmuş dalga şekli

Yük üzerine uygulanan bu harmonik içeren gerilimi elemek için yüke ve şebekeye seri L-C bağlanmıştır. Yüke seri bağlanan bu paralel L-C' nin alternatif gerilimde, 220 V ve 60 Hz' lik gerilim kaynağına düşük empedans göstermesi, 80 V 110 Hz' lik gerilim kaynağına ise büyük empedans gösterip yüke geçirmemesi gerekmektedir. Eğer Şekil 3.10' daki gibi $L=0.01$ H, $C=0.00021$ F seçilip seri bağlınırsa, Şekil 3.11'den görüleceği gibi 150 Ω ' luk yük üzerindeki gerilim şeklinin istenildiği gibi 220 V ve 60 Hz'lik dalga şekline çok yaklaştığı görülecektir.



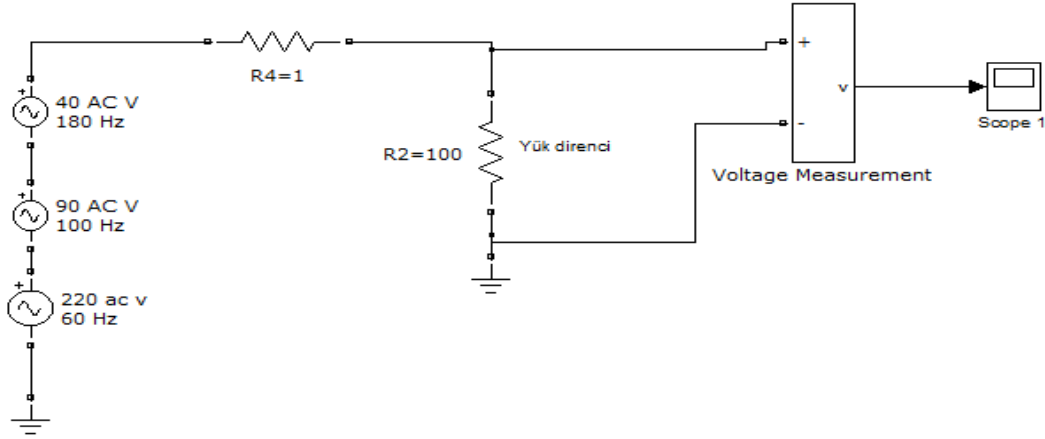
Şekil 3.10. Seri pasif filtre uygulandıktan sonraki Matlab/Simulink modeli



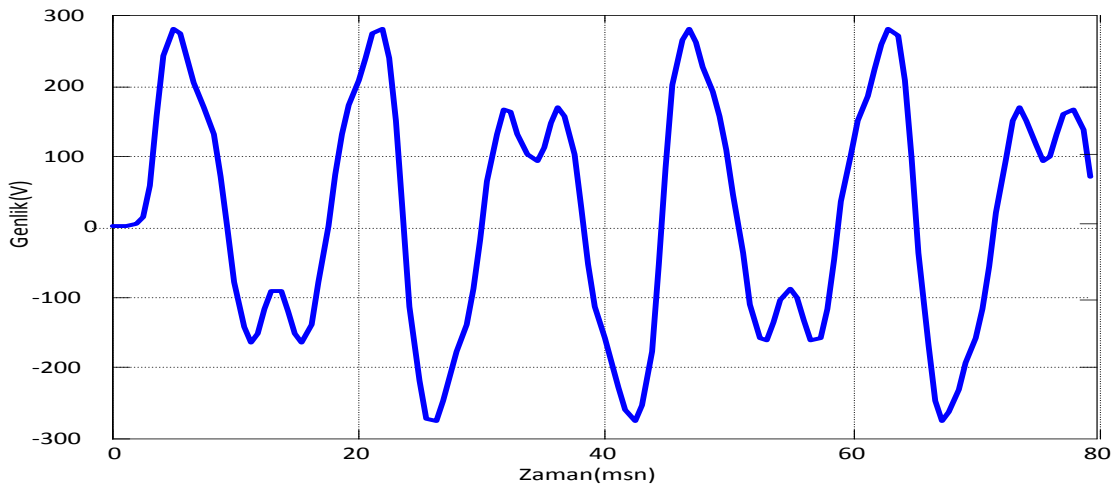
Şekil 3.11. Seri pasif filtre sonrası yük üzerindeki gerilim şekli

3.3.2. Paralel Pasif Filtre Matlab/Simulink Uygulaması

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi 100Ω ’luk direnç 220 V - 60 Hz , 90 V - 100 Hz ve 40 V - 180 Hz ’lik üç gerilim kaynağının toplamından oluşan bozulmuş bir gerilim ile beslensin. Burada üç dalga birleşimiyle oluşan bozulmuş gerilim dalga şekli, Şekil 3.13’te görülmektedir. Yük üzerinde istenilen gerilim 220 V genişliğinde ve 60 Hz frekansa sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden 90 V ’luk ve 40 V ’luk harmonik gerilim bileşenlerinin pasif filtre ile elenmesi gerekmektedir. Paralel pasif filtreler istenilmeyen harmonik frekanslarında rezonansa girerek bu harmonik bileşenleri ortadan kaldırmaktadır.

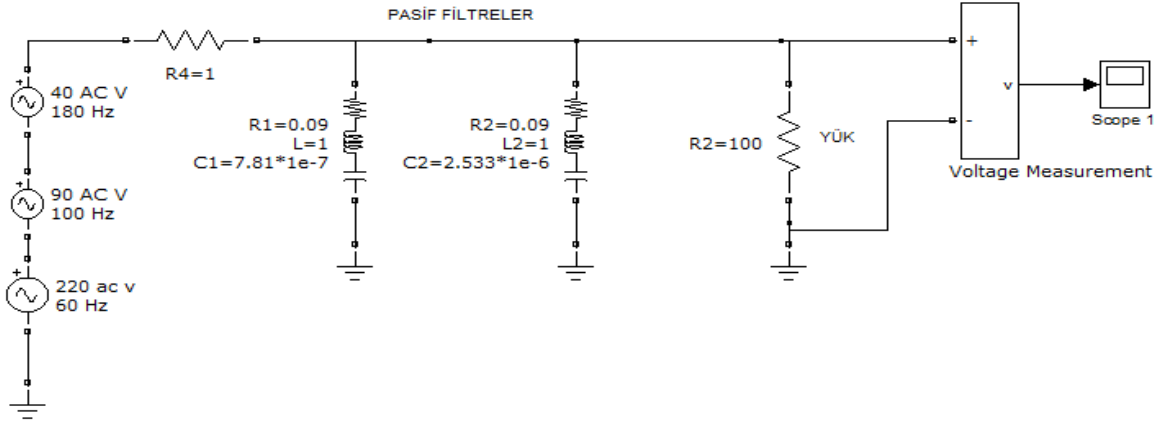


Şekil 3.12. Paralel pasif filtre eklenmeden önceki 100Ω ’luk yük ve gerilimlerin Matlab/Simulink modeli

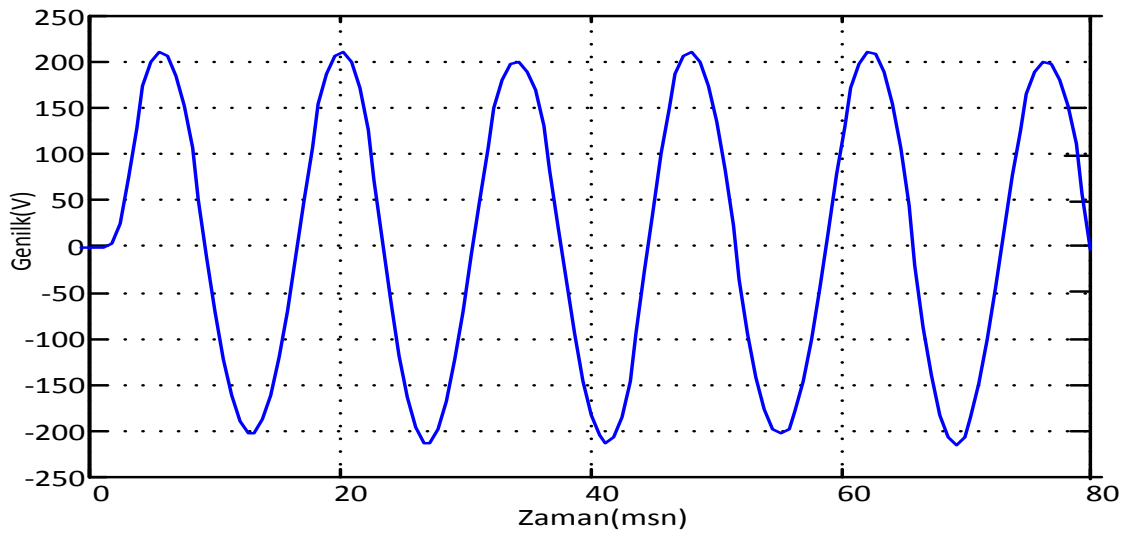


Şekil 3.13. Üç gerilim kaynağının toplamı ile oluşan yük üzerindeki bozulmuş dalga şekli

Rezonans, alternatif gerilimde endüktif reaktans ve kapasitif reaktansın birbirlerine eşit olduğu durumdur. Eğer R-L-C değerleri Şekil 3.14' teki gibi seçilirse ve uygulanırsa, yük üzerindeki gerilim, Şekil 3.15' de görüldüğü gibi yük üzerindeki dalga şeklinin 220 V ve 60 Hz' lik sinüs dalgasına çok yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 3.14. Paralel pasif filtre uygulandıktan sonraki Matlab/Simulink modeli



Şekil 3.15. Paralel pasif filtre sonrası yük üzerindeki gerilim şekli

4. AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ

Güç sistemlerinde lineer olmayan yüklerin kullanımının artmasıyla oluşan harmonik bozulmalar ve güç kalite problemlerini çözmek, dinamik ayarlanabilen çözümler geliştirmek için güç elektroniği ve güç sistemleri mühendisleri birlikte önemli çalışmalar yapmışlardır. Bu sorunları çözmek için kullanılan güç elektroniği araçlarına AGF olarak adlandırılır (Sing vd., 1999). AGF bir takım güç elektroniği devresi ve bobin, kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşan yapılardır. Bu filtreler şebekelerdeki harmonik akım 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 kullanılabilir (Akagi, 2000; Atan ve Hussien, 2008; Grady vd., 1990; Jou, 1995; Jou vd., 2005; Sing vd., 1999).

Genel olarak, AGF'nin kullanım amacı, her bir tüketicinin kendi harmonik üreten yüklerinin harmonik dengesizliğini veya harmonik akımlarını kompanze etmektir. Diğer taraftan endüstriler tarafından kullanılan AGF'nin temel amacı, güç dağıtım sistemlerindeki harmonik değerleri azaltarak gerilim harmonikleri ve gerilim dengesizliklerini kompanze etmektir (Akagi, 1996). AGF seçiminde aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulabilir (El-habrouk vd., 2000).

- ✓ Kompanze edilecek sistemin yanıtama süresi ihtiyacı ve güç oranı
- ✓ Güç devre konfigürasyonları ve bağlantıları
- ✓ Kompanze edilecek güç sistem parametreleri (harmonik akım kompanzasyonu, harmonik gerilim kompanzasyonu, güç faktörünü artırma, üç fazlı sistemi dengeleme)
- ✓ Kontrol teknikleri
- ✓ Yukarıdaki kriterlere göre referans akım/gerilim tahmininde kullanılacak teknik sistem.

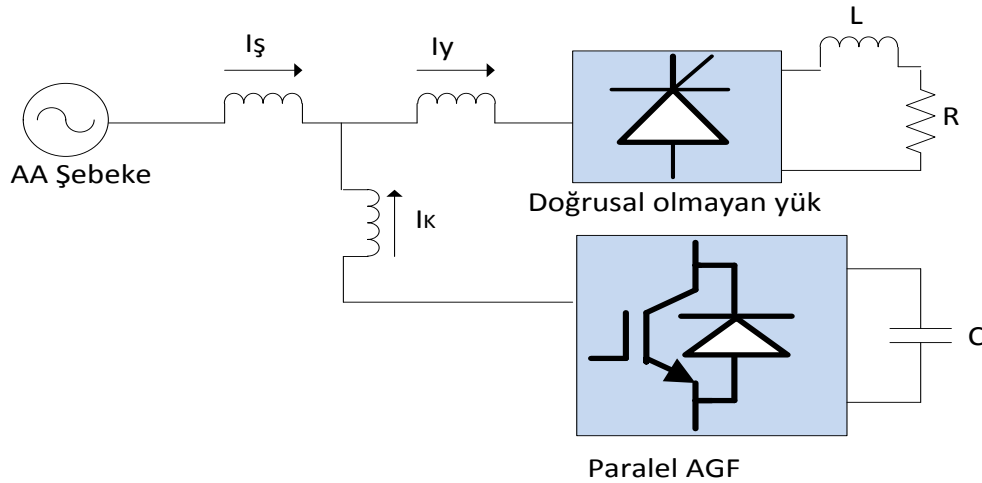
AGF'nin yüksek verimli olmaları, aynı anda birden fazla kompanzasyon yapma gibi avantajlarının olmasının yanında pahalı olmaları ve uygulamalarının kompleks olması gibi dezavantajları da vardır (Fujita ve Akagi, 1991; Jou, 1995). AGF topolojik yapısına göre, güç devresine göre sınıflandırılabilirler.

Topolojik yapısına göre; paralel, seri, hibrit ve birleşik güç kalitesi düzenleyicileri olarak bölümlere ayrılır. Güç devresine göre de; gerilim beslemeli eviricili ve akım beslemeli eviricili aktif güç filtreleri olarak bölümlere ayrılır. Kontrol prensibine göre de zaman domeni ve frekans domeni olarak iki bölüme ayrılır (Kocatepe vd., 2003).

4.1. Aktif Güç Filtreleri Topolojik Yapısına Göre Sınıflandırma

4.1.2. Paralel Aktif Güç Filtresi

Paralel AGF (PAGF), şebekeye paralel bağlanmaktadır. Filtre konfigürasyonları yapılarının bu sınıfı, endüstriyel işletmelerdeki en önemli ve en genişçe kullanılan yapılardır (El-habrouk vd., 2000). Bu filtreler harmonik akım kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı dengeleme ve nötr akım kompanzasyonu gibi akım tipi harmoniklerin elenmesi için uygundur (Li ve Tian, 2008; Peng ve Adams, 2001; Sing vd., 1999; Terbobri vd., 2000). Şekil 4.1’de temel bir PAGF gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Paralel aktif güç filtresi

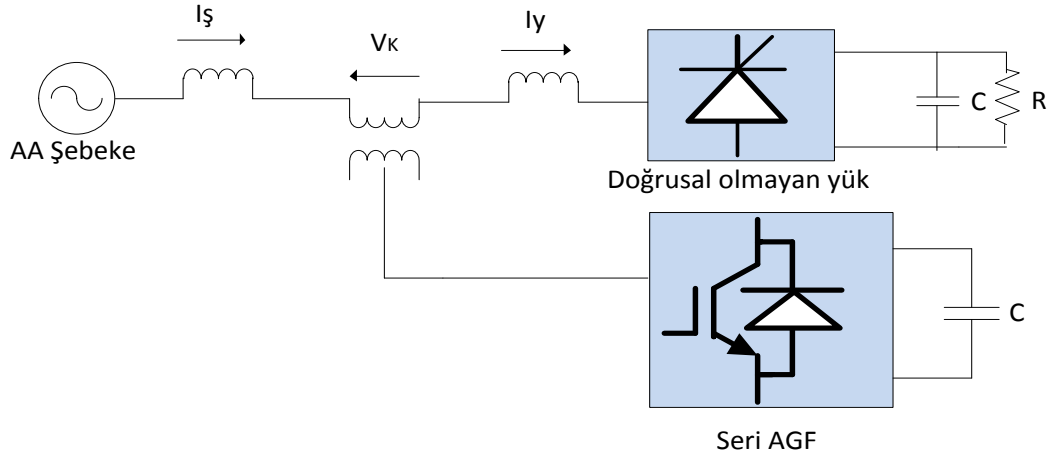
PAGF düşüncesi eşit fakat zıt harmonik akımları yarı iletken güçlendirme devreleri ile kaynak şebekesine enjekte ederek harmonik eliminasyonu ve reaktif güç kompanzasyonunu sağlamak ile gerçekleşir (Terbobri vd., 2000). PAGF kullanılırken aşağıdaki sorulara en uygun cevapların elde edilmesi gerekmektedir (Akagi, 1994).

- ✓ Kompanzasyon için gerilim veya akımlardan hangileri kullanılmalıdır ($I_{yük}, I_{şebeke}, V_{şebeke}$)?
- ✓ Belirlenen gerilim veya akımlardan kompanzasyon komutlarını nasıl elde edilecektir ve geçici durumlarda veya yükün sürekli değiştiği durumlarda bu durum nasıl sağlanacaktır ?
- ✓ Büyük kapasitedeki sinüzoidal olmayan akım kaynağıyla, hızlı akım sorumluluğu nasıl gerçekleştirilecektir?

PAGF' lerin problemleri yüksek güç uygulamalarında oluşmaktadır. Çünkü yüksek güç uygulamalarında, aktif filtrelerde kullanılacak yarı iletken sıkıntısını meydana gelmektedir. Bu uygulamalarda indirici trafolar, çoklu konvertörler veya kaskat bağlama konvertörleri PAGF ve güç şebekesi değerlerinin birleşmesi için kullanılması gerekmektedir (Turunen vd., 2005).

4.1.3. Seri Aktif Güç Filtresi

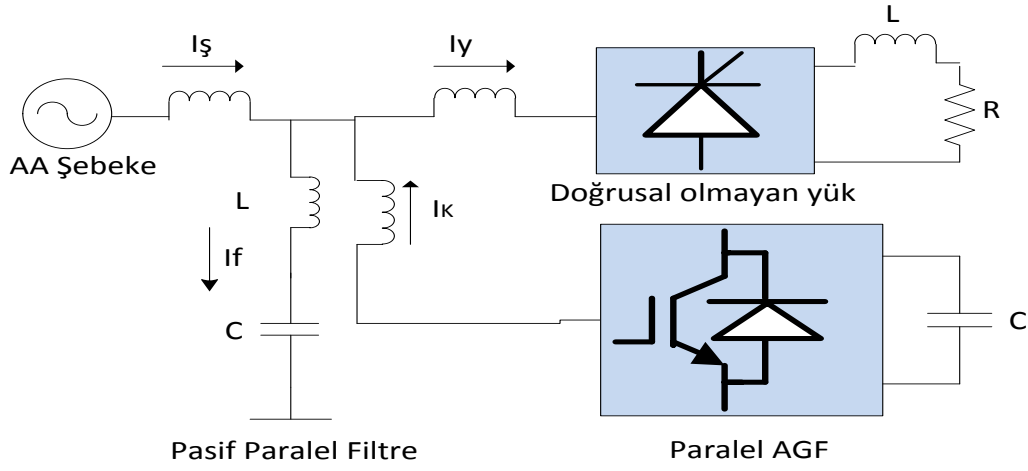
Seri AGF (SAGF) şebekeye eşleşen bir trafo üzerinden seri bağlanır. SAGF temel olarak anlık gerilim eklenip/çıkarılarak yük boyunca saf sinüzoidal gerilim dalga formunun devam ettirilmesine dayalıdır (El-habrouk vd., 2000). Bu filtreler gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, gerilim dengelenmesi, gerilim dalgacıklarının azalması ve gerilim düşmelerinin kaldırılması için kullanılır (Sing vd., 1999). Bu, yük üzerinde saf sinüzoidal dalga formu sağlar ki bu da gerilim değişimlerine hasas cihazlar için önemlidir. SAGF'nin PAGF'si üzerindeki en büyük avantajı çıkış gerilim dalgasının sinüzoidal biçimini sürdürebilmesi için ideal olmasıdır (Akagi, 2000; El-habrouk vd., 2000; Li ve Tian, 2008; Peng ve Adams, 2001). Bununla beraber, SAGF bağlantı transformatörlerinin bütün yük akımlarını üzerinden geçireceği için yüksek kapasitede olmalıdır. Harmonik akımlar yüksek olduğunda aktif güç filtresinin kapasitesi ayrıca artar. Bunun sonucu olarak SAGF endüstriyel uygulamaları sınırlanır (Xia ve Han, 2006). Şekil 4.2' de temel bir SAGF gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Seri aktif güç filtresi

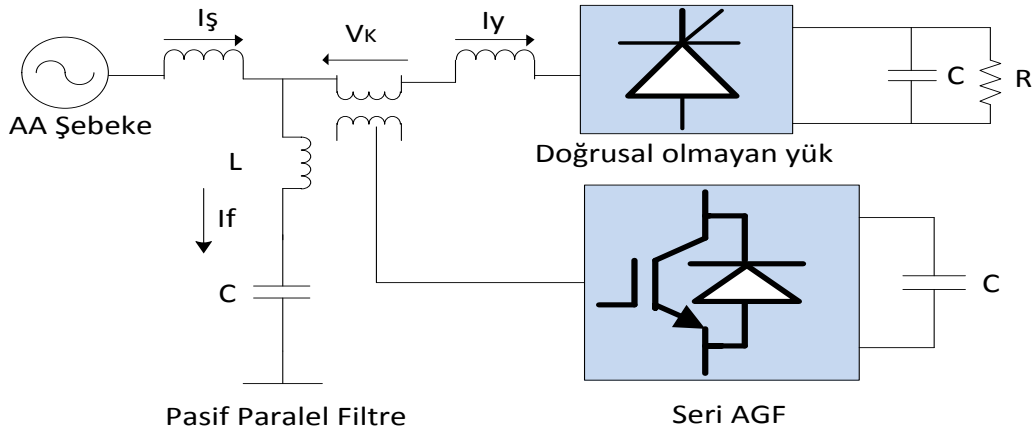
4.1.4. Hibrit Aktif Güç Filtresi

Hibrit aktif güç filtresi (HAGF), AGF ve pasif filtrelerin değişik bağlantı konfigürasyonlarının birleşimi ile oluşan yapılardır. HAGF yalnızca harmonik kompanzasyonu için kullanılmaz ayrıca gerilim regülasyonu, dengesizlik kompanzasyonu, kaynak ve lineer olmayan yük arasındaki izolasyon içinde kullanılır (Akagi, 2000; Terbobri vd., 2000). Bu filtrelerdeki temel amaç fiyatları düşürmek ve etkinliği arttırmaktır (Akagi, 1994; Akagi, 1996; Akagi, 2000; Akagi, 2005; Singh vd., 2005). PAGF ve PPF'nin kombinasyonu, PAGF ile birlikte paralel pasif filtre veya yüksek geçiren filtrenin birleşimidir. Burada kullanılan PAGF düşük sıralı harmoniklerin elenmesi için tasarlanırken PPF yüksek sıralı harmoniklerin kompanzasyonu için tasarlanır (El-habrouk vd., 2000; Peng ve Adams, 2001). Çünkü yüksek sıralı harmoniklerin kompanzasyonu için anahtarlama frekansı sınırlanır (Peng ve Adams, 2001). Aynı zamanda burada kullanılan PAGF, PPF ile kaynak empedansı arasındaki olası rezonansı elimine etmek için kullanılır (Peng ve Adams, 2001). Şekil 4.3' te PPF ve PAGF ile oluşan temel bir HAGF gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Paralel aktif filtre ve paralel pasif filtrelerinin bileşimi ile oluşan hibrit filtre

SAGF ve PPF kombinasyonu, filtre kombinasyonlarının karışıklığını azaltmak için, yüksek frekanslı harmoniklere yüksek empedans gösteren SAGF ve yükün harmonik akımları için bir yol olan PPF birleşimidir. Bu kombinasyon SAGF'nin karakteristiğini arttırmaya izin verir (El-habrouk vd., 2000; Turunen vd., 2005). Buradaki amaç akım harmoniklerini azaltmak ve gerilim harmoniklerini elemektir (El-habrouk vd., 2000). Şekil 4.4' te ise PPF ve SAGF ile oluşan temel bir HAGF gösterilmektedir.

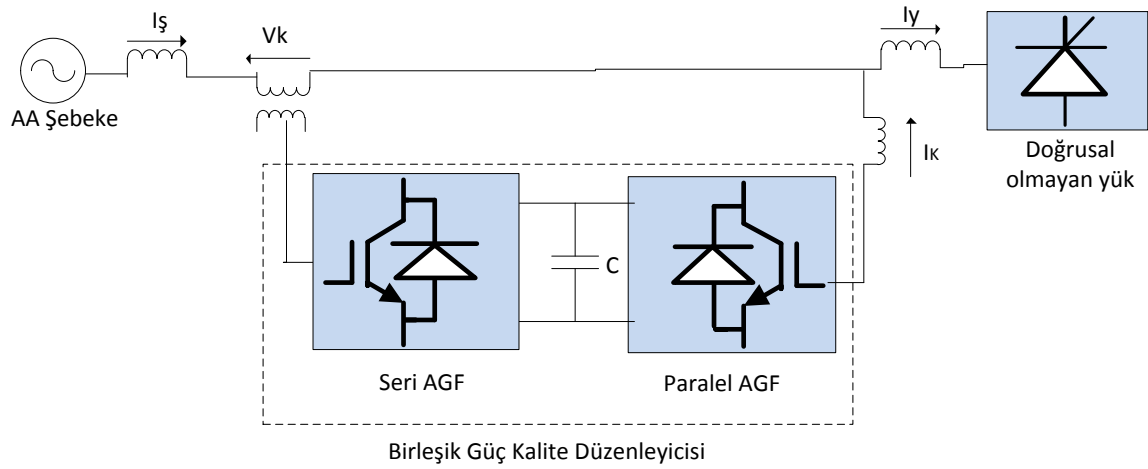


Şekil 4.4. Seri aktif filtre ve paralel pasif filtre bileşiminden oluşan hibrit filtre

HAGF tekniğın en önemli dezavantajı özellikle PPF için çok fazla güç bileşenini barındırmasıdır. Buradaki PPF sürekli sisteme bağlandıkları için harmonik kaynakları önceden bilinen yükler için uygundur. (El-habrouk vd., 2000). HAGF'nin uygun fiyatlara sahip olması ve etkili kompanzasyon sağlamasından ötürü güç kalite artırımı için daha iyi bir seçenek olarak düşünülür (Sing vd., 2005).

4.1.5. Birleşmiş Güç Kalite Düzenleyicileri

Birleşmiş Aktif Güç Kalite Düzenleyicileri (BGKD), SAGF ve PAGF'nin bir DA linki paylaştığı uygulamadır. BGKD harmonik kompanzasyon, güç akışı kontrollü, geçici dinamik ve statik kararlılık geliştirme, reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kontrollü için güç sistemine uygulanabilir (Arades vd., 1998). Buradaki fonksiyonlar SAGF ve PAGF arasında paylaşılır. Şekil 4.5' de temel bir BGKD gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Birleşmiş güç kalite düzenleyicisi

Buradaki SAGF'nin fonksiyonu alt iletim sistemleri ve dağıtım sistemleri arasındaki harmonik izolasyon, gerilim regülasyonu, ortak bağlantı noktasındaki dengesizlik, gerilim titreşimi kompanzasyonu sağlamak ve filtre ile üretilen gerçek ve sanal gücü kontrol etmektir. PAGF'nin görevi ise harmonik akımları, negatif sıra akımı (ters faz akımı) kompanzasyonu ve her iki aktif filtre arasındaki DA link gerilim regülasyonunu sağlamaktır (Akagi, 1996; Akagi, 2000; Arades vd., 1998; Fujita ve Akagi, 1998).

Bu fonksiyonların her biri BGKD kontrollerindeki, kontrol sinyallerinin farklı ve bağımsız kurulumları ile ilişkili olacaktır. Bu yüzden her bir uygulama durumu için fonksiyonlar uygun şekilde seçilebilir ve genel kontrol tasarımlarından sadece istenmeyen kontrol bileşenlerinin çıkarılmasıyla yeni kontrollere adapte olunabilir (Aredes vd., 1998). Bu filtreler, güç sorunları için en iyi çözümü sağlarlar (Sing vd.,1999; Sing vd.,2005). Fakat bu filtrelerin kontrollerinin kompleks olması ve fiyatlarının yüksek olması gibi dezavantajları vardır (El-habrouk vd., 2000; Sing vd., 1999).

4.2. Aktif Güç Filtrelerini Kontrol Prensibine Göre Sınıflandırma

Akım veya gerilim harmoniklerini, bozulan gerilim ya da akımdan elde etmek için birçok kontrol stratejisi vardır. Bu kontrol stratejileri frekans ve zaman bölgesi düzeltme tekniklerine dayanmaktadır (Akagi, 1996; Sing vd., 1999; Terbobri vd., 2000).

Zaman bölgesinde AGF kontrol yöntemleri bozulan gerilim veya akım sinyallerinden anlık kompanzasyon komutlarını elde etme prensibine dayalıdır. Bu düzeltme yönteminde çok sayıda kontrol metodu vardır. Bunlardan bazıları 'p-q' anlık reaktif güç teorisi, senkron belirleme metodu, sliding modu kontrolleri ve P-I kontrol metotlarıdır (Sing vd., 1999). Zaman bölgesi düzeltme tekniğinin en büyük avantajı güç sistemlerindeki değişimlere hızlı yanıt vermesidir. Ayrıca uygulaması kolaydır ve küçük hesaplama hatalarına sahiptir (Grady vd., 1990; Sing vd., 2005).

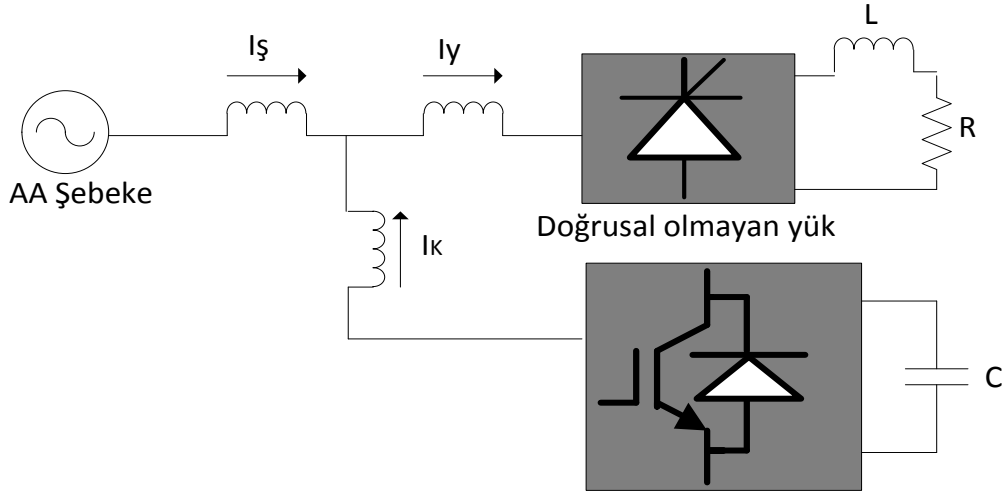
Frekans bölgesi düzeltme yöntemi ise Fourier analizi teorisine dayalıdır ve bozulan gerilim ve akım dalga formlarını periyodiksel olarak düzeltir (Grady vd., 1990). Etkili kompanzasyon sağlamak için genellikle aktif filtre anahtarlama frekansı, harmonik frekansının iki ya da daha fazla katıdır (Sing vd., 1999; Terbobri vd., 2000). Frekans domain tekniğinin en büyük dezavantajı artan hesaplama gereksinimidir. Bu yüzden fazla sayıdaki harmonik bileşenlerinin olduğu sistemlerde hesaplama sayısı ayrıca artacaktır. Bu da yanıtlama süresinin gecikmesine neden olur (Grady vd., 1990).

Bu kontrol stratejileri aktif filtrelerin sabit durum kararlılığı kadar geçici durumlardaki etki ve performansını arttırmasında önemli bir rol oynar (Akagi, 1996; Sing vd., 1999). Stratejilerdeki seçim şebekelerdeki bozulum kaynağına, ekip fiyatına ve arzu edilen düzeltme miktarına bağlıdır. Bu tezde, Fourier analizi taban teorisine dayalı frekans bölgesi düzeltme tekniği ve senkron referans yapı taban tekniği teorisine dayalı zaman bölgesi düzeltme tekniği ile iki adet aktif güç filtresi tasarlanmıştır. Bu güç filtreleri Matlab/Simulink paket programı kullanılarak lineer olmayan üç fazlı dengeli sistemler üzerinde denenmiş ve sonuçları elde edilmiştir.

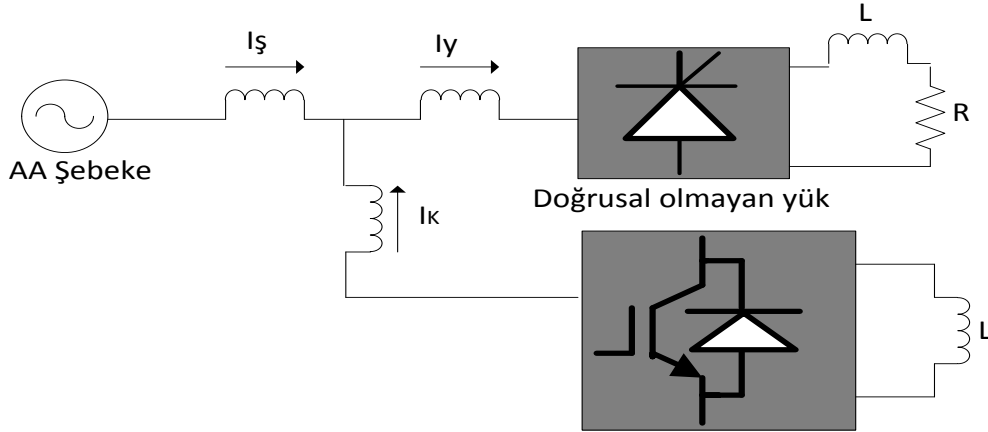
4.3. Aktif Güç Filtrelerini Güç Devrelerine Göre Sınıflandırma

Yarı iletken anahtarlama araçlarının kapasitelerindeki ve hızlarındaki önemli bir artış ile birlikte aktif güç filtrelerini oluşturan gerilim veya akım kaynaklı PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) invertörleri araştırılmış ve pratiksel uygulamaları ortaya konulmuştur (Akagi, 2000; Fujita ve Akagi, 1991; Peng vd., 1990). Gerilim beslemeli darbe genişlik modülasyonları enerji depolama elemanı olarak kondansatör, akım beslemeli darbe genişlik modülasyonlarında enerji depolama elemanı olarak ise bobin kullanılır.

Gerilim beslemeli PWM invertörlerinin daha hafif ve ucuz olması, çok seviyeli ve çok adımlı versiyonları için genişletilebilmesi, daha az kayıplarının olması, düşük anahtarlama frekansları ile performansını arttırması bu invertörü, akım beslemeli PWM' e göre daha baskın hale getirmiştir (Akagi, 1994; Akagi, 1996; Akagi, 2005; Grady vd., 1990; Karuppanan vd., 2011; Lada vd., 2010; Sing vd., 1999; Sing vd., 2005). Şekil 4.6'da gerilim beslemeli AGF gösterilmişken Şekil 4.7'de ise akım beslemeli AGF gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Gerilim beslemeli aktif güç filtresi



Şekil 4.7. Akım beslemeli aktif güç filtresi

AGF'lerin invertörlerindeki anahtarlamaı sağlayan yarı iletken araçlar olarak tristör, BJT (Bipolar Jonksiyon Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), GTO (Gate Turn Off Thyristor), SIT (Static Indüction Transistor) ve IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kullanılmıştır. Bunlar arasındaki IGBT aktif filtrelerin gelişmesinde önemli bir katkıyı sunmuştur. IGBT'ler invertörlerde kullanılan en iyi anahtarlama aracı olarak düşünölmektedir (Sing vd., 1999).

5. 3 FAZLI SİSTEMLERDE PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ TASARIMI VE KONTROL YÖNTEMLERİ

5.1. Paralel Aktif Güç Filtresinin Matematiksel Modeli

Şebekenin harmoniksiz yapıda olduğu durumlarda şebeke gerilimi ideal formdadır.

$$V_{\zeta}(t) = V_m \cos(\omega t) \quad (5.1)$$

Şebekenin lineer olamadığı durumlarda ve yükün endüktif olduğu varsayılırsa, şebekeden çekilen akım, gerilimi geriden takip eder ve sonsuz sayıda harmonik içerir (Sezer, 2006).

$$I_{\zeta}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t - \varphi_n) = I_{1m} \cos(\omega t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (5.2)$$

Şebekeden çekilen ani güç aşağıdaki formülle hesaplanır (Sezer, 2006).

$$P_{\zeta}(t) = V_{\zeta}(t) \cdot I_{\zeta}(t) \quad (5.3)$$

Şebekenin ideal gerilimi ile şebekeden çekilen harmonik akım bileşeni içeren akım çarpıldığında, 3 farklı güç bileşeni elde edilir (Sezer, 2006).

$$P_{\zeta}(t) = V_m I_{1m} \cos^2 \omega t \cdot \cos \varphi_1 + V_m I_{1m} \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t \cdot \sin \varphi_1 + V_m \cdot \cos \omega t \cdot \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (5.4)$$

Bileşenlerde görülebileceği gibi şebekeden aktif güç, bu güce fazörel olarak dik reaktif güç ve sonsuz sayıda harmonik güç bileşeni çekilir. Aktif güç değeri, şebeke gerilimine bölünürse, şebekeden çekilen reel akım hesaplanabilir. Böylece, toplam akım değerinden, reel akım değeri çıkarılarak, harmonik ve reaktif akım değerleri görülür. Bu harmonik ve reaktif akımlar, PAGF tarafından karşılanmak suretiyle, şebekeden ideal sinüs akımın çekilmesi mümkün olur (Sezer, 2006). Şebekeden çekilen aktif güç aşağıda gösterilmiştir.

$$P_{ak}(t) = V_m \cdot I_{1m} \cos^2 wt \cdot \cos \phi_1 \quad (5.5)$$

Aktif güç için şebekeden çekilmesi gereken akım, şebekeden çekilen akımın reel bileşenidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır (Sezer, 2006).

$$I_S(t) = P_{ak}(t) / V_S(t) = I_{1m} \cos wt \cdot \cos \phi_1 \quad (5.6)$$

Yük akımından, akımın reel bileşeni çıkarıldığında, reaktif akım ve akım harmoniklerinden oluşan bozulma akımı görülmektedir.

$$I_{boz}(t) = I_y(t) - I_S(t) \quad (5.7)$$

$$I_{boz}(t) = I_{1m} \sin wt * \sin \phi_1 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(nwt - \phi_n) \quad (5.8)$$

Bu akım bileşenlerinin aktif güce katkısı yoktur ve sistemde birçok dezavantaja neden olur (Sezer, 2006).

5.2. Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımındaki Kullanılan Eleman Değeri Seçimi

5.2.1. Paralel Aktif Güç Filtre Endüktans Değeri Seçimi

Endüktansın seçimi aktif filtre performansı için çok önemlidir. Filtre endüktansı güç konvertöründeki güç elektroniği araçlarının anahtarlaması sırasında oluşan yüksek frekanslı dalgacık akımlarını elimine etmek için ve aktif filtre akımının referans sinyallerini izlemesi için kullanılır. Eğer endüktans küçük değerde seçilirse büyük anahtarlama dalgacıkları kaynak akımına dahil olur. Fakat endüktans büyük değerde seçilirse kompanzasyon akımının istenilen değerlere yaklaşmasına izin vermez (Jou vd., 2005; Sing vd., 1998; Sing vd., 1999). L_f denk.(5.9) ile bulunur (Sezer, 2006).

$$L_f = V_{DA} / (6f_s I_{ppmax}) \quad (5.9)$$

Burada f_s : anahtarlama frekansdır. Konvertör verimi % 90 olarak değerlendirilir. Buna göre, DA tarafındaki maksimum akım işareti I_{da} değeri % 10' luk değişimler içermektedir. I_{ppmax} , denk.(5.10)' daki gibi bulunur.

$$I_{ppmax} = 0.1.I_{da} \quad (5.10)$$

Bu tez çalışmasında denk.(5.9) kullanılarak filtre endüktansı 1mH olarak belirlenmiştir.

5.2.2. Paralel Aktif Güç Filtresindeki Kondansatör Değeri Seçimi ve Gerilim Kontrollü

AGF tasarlamaadaki diğer önemli parametre ise kullanılacak olan V_{DA} kondansatör gerilimidir. Bu gerilimin AGF akımının, kompanze edilecek akımı azaltmaya zorlaması için kullanılır ve bu gerilim şebeke geriliminin tepe değerinden yüksek olmak zorundadır (Jou vd., 2005). Fakat çok yüksek DA gerilim kullanmanın, yüksek filtre endüktansı istemesi, güç elektroniği araçlarının ve DA kapasitörün yüksek gerilim oranına sahip olması gibi dezavantajları oluşur. Burada kullanılacak yüksek filtre endüktansı önemli güç kayıplarına, daha fazla ısınmaya, ağırlaşmaya ve frekans yanıt süresi performansının düşümüne yol açmaktadır. Buda yüksek gerilim ile C_{DA} kapasitör güç filtresinin uygulamalarını sınırlamaktadır (Jou vd., 2005).

PAGF çalışmaya başladıktan sonra DA kondansatör gerilimindeki dalgalanmalar anlık gerçek gücün dalgalanan bileşeninden kaynaklanmaktadır. Anlık gerçek gücün dalgalı bileşenini yok etmek için eviricinin DA tarafından AA tarafına anlık gerçek gücün dalgalanan bileşeni kadar enerji aktarılmaktadır. Dolayısıyla DA kondansatör geriliminde bu enerjinin miktarına bağlı olarak dalgalanmalar oluşur. DA kondansatör gerilimi dalgalı ve doğru bileşenleri denk.(5.11)' de ifade edilmektedir (Kale, 2004).

$$V_{DA} = \bar{V}_{DA} + \tilde{V}_{DA}(t) \quad (5.11)$$

Burada, \bar{V}_{DA} :Ortalama kondansatör gerilimidir ve \tilde{V}_{DA} :Kondansatör geriliminin dalgalanan bileşenidir. PAGF'nin sürekli durumda üretmesi gereken ve gerçek gücün dalgalanan bileşenine karşılık gelen güç denk.(5.12)' de ifade edilmektedir (Kale, 2004).

$$\tilde{P}_f = \tilde{P}_{3y} \quad (5.12)$$

Kondansatörün şebekeye vermesi gereken akım denk.(5.13)'de ifade edilmektedir (Kale, 2004).

$$i_f = \tilde{P}_{3y} / V_{DA} \quad (5.13)$$

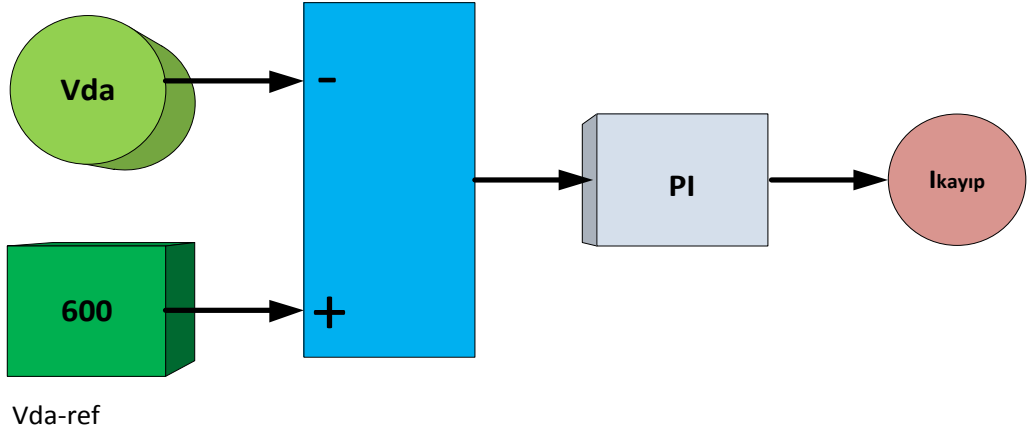
Kondansatör gerilimindeki dalgalanma denk.(5.14)' deki gibidir.

$$\tilde{V}_{DA}(t) = \frac{1}{C_{DA}} \int_0^t I_f(t) dt \quad (5.14)$$

Kondansatörün değeri ise denk.(5.13) ve denk.(5.14) kullanılarak denk.(5.15) elde edilir (Kale, 2004).

$$C_{DA} = \tilde{P}_{3y} / (\tilde{V}_{DA} \bar{V}_{DA} \omega_p) \quad (5.15)$$

Aktif filtre sistemlerinde oluşan besleme kayıplarını geri vermek, kontrol metodunu arttırmak ve kendi kendine yetebilen V_{DA} kondansatör gerilimini sağlamak için genel olarak kapalı döngü orantısal integral (PI) veya Sliding Mod kontrolleri kullanılmaktadır (Sing vd., 2005). Bu yüzden oluşan $I_{kayıp}$ 'in aktif filtreye geri verilmesi lazımdır. Aşağıdaki şekilde AGF' ne verilmesi gereken $I_{kayıp}$ Matlab/Simulink bloğu gösterilmiştir.



Şekil 5.1. $I_{kayıp}$ değerini belirleyen blok

Simülasyonda seçilen parametreler ise PI değerleri olarak $K_p=0.77$ $K_i=28$ olarak alınmıştır. Referans gerilimi ise 600 V olarak seçilmiştir.

5.3. Paralel Aktif Güç Filtresi Tetikleme Sinyallerinin Üretilmesinde Kullanılan Metotlar

Bu ünite gerilim ya da akım ile ilgili kompanzasyon komutlarından, aktif filtre yarı iletken araçları için kapı sinyallerinin üretildiği kısımdır. Histerezis tabanlı akım kontrollü, deatbeat kontrol ve üçgen dalga kontrollü gibi birçok yaklaşım aktif filtrelerin kontrol sinyallerini elde etmek için kullanılmaktadır (Sing vd., 1999).

Üçgen dalga kontrol metodu eski ve basit bir tekniğe sahiptir. Bu kontrol metodu invertörün tetikleme sinyallerini üretmesi için, akım hatasını üçgen bir dalgayla karşılaştırır (Brod ve Novotny, 1985). Bu tekniğin asıl dezavantajı yüksek anahtarlama kayıpları ve yüksek frekans bozulumudur. Buradaki anahtarlama hareketi, her bir yüksek taşıyıcı periyodu için 2 yada 4 katı olarak uygulanır (Grady vd., 1990).

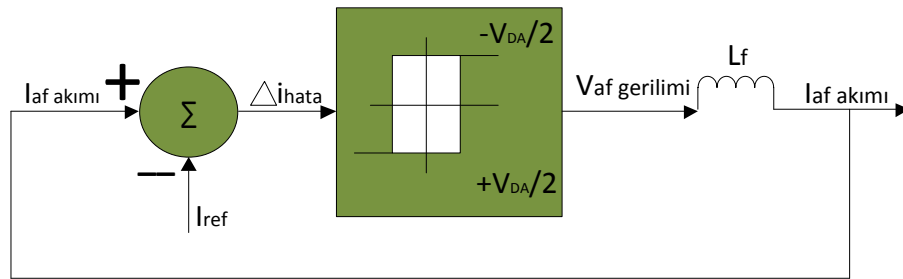
Deadbeat kontrol metodunda gelecek periyot için hata fonksiyonunu tahmin etmekte, geçmiş deneyimleri kullanılır.

Bu metot güç sistemindeki ani değişikliklere çok hızlı bir şekilde yanıt verir. Sinyal tahminleri geçen çok az örneğe dayalıdır ve genellikle sinyal periyodikliği göz ardı edilir (Grady vd., 1990).

Bütün önerilen metotlar arasındaki histerezis tabanlı akım kontrollü, koşulsuz istikrar hızlı sorumluluk, etkili performans, minimum donanım ile kolay uygulanmasından dolayı bütün uygulamalar için en uygun seçim olduğu doğrulanmıştır (Brod ve Novotny, 1985; Prusty vd., 2011; Zhang vd., 2010). Bu özelliklerinden dolayı bu tezde aktif filtre tetikleme sinyallerinin oluşturulmasında histerezis tabanlı akım kontrollü uygulanmıştır.

5.3.1. Histerezis Tabanlı Akım Kontrollü

Bu akım kontrolünde AGF akımı ile referans sinyalinin farkı alınarak hata sinyali oluşturulur. Bu hata sinyali önceden alt ve üst limitleri belli olan histerezis akım denetleyiciye yollanır. Hata sinyali tolerans bandı içerisindeyse anahtarlama hareketi oluşmaz. Fakat hata farkı, tolerans bandı üzerindeyse histerezis akım denetleyici AGF akımını azaltacak şekilde tetikleme sinyalleri üretir. Eğer hata farkı, tolerans bandı altındaysa histerezis akım denetleyici AGF akımını arttıracak şekilde tetikleme sinyallerini üretir (Grady vd., 1990; Prusty vd., 2011; Zhang vd., 2010). Aşağıda histerezis bloğu prensip şeması gösterilmiştir.



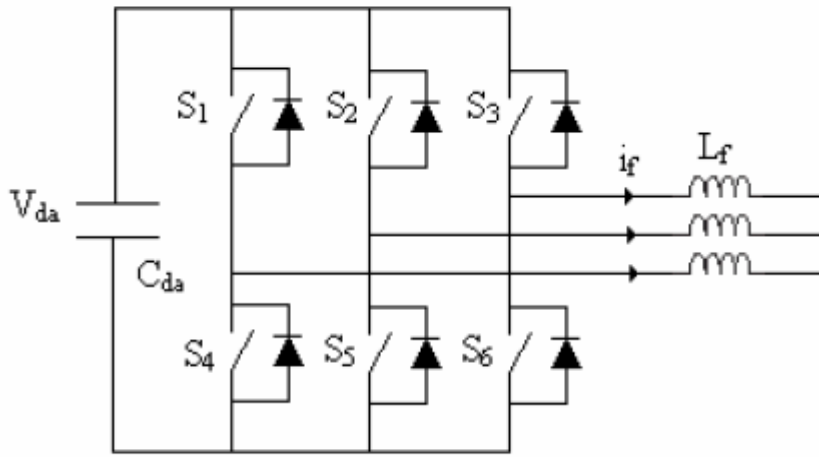
Şekil 5.2. Histerezis bant

Histerezis' de kullanılan anahtarlama mantığı aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Prusty vd., 2011).

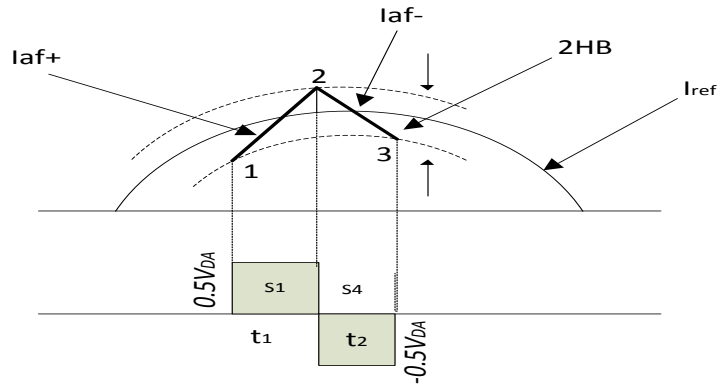
$$Hata_farkı = I_{afakımı} - I_{ref} \quad (5.16)$$

Eğer hatta_farkı > HB üst anahtarlama kapalı ($S_1=0$) ve alt anahtarlama açık ($S_4=1$) (5.17)

Eğer hatta_farkı < HB üst anahtarlama açık ($S_1=1$) ve alt anahtarlama kapalı ($S_4=0$) (5.18)



Şekil 5.3. 3 Fazlı 3 telli sistemde kullanılan darbe genişlik modülasyonu iç yapısı



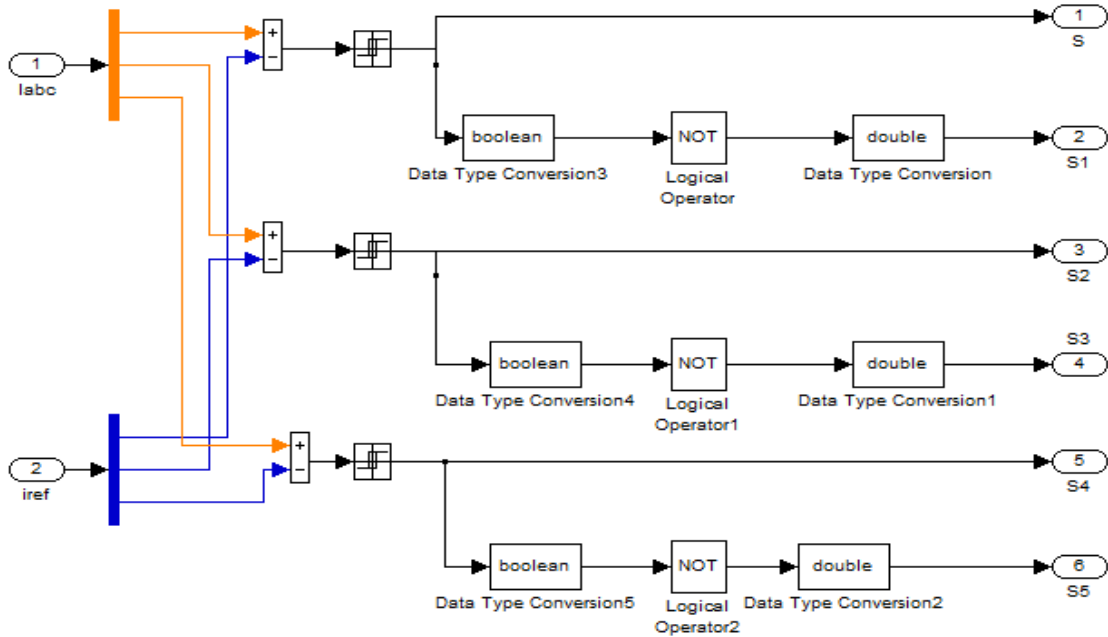
Şekil 5.4. Histeresis bant akım kontrollü ile akım ve gerilim dalga şekli

Şekil 5.4' de a-fazına ait akım ve gerilim dalga şekli görülmektedir. S₁ anahtarı kapatıldığında I_{af} akımını 1 numaralı noktadan 2 numaralı noktaya doğrusal olarak artar. 2 numaralı noktaya ulaştığında S₄ anahtarı kapatılır ve akım 3 numaralı noktaya doğrusal olarak azalır. t₁ ve t₂ anahtarlama aralıkları için denk.(5.19) ve denk.(5.20) yazılır (Bozabalı, 2009).

$$di_{af}^{+} / dt = 1 / Lf (0.5V_{DA} - V_{sa}) \quad (5.19)$$

$$di_{af}^{-} / dt = -1 / Lf (0.5V_{DA} - V_{sa}) \quad (5.20)$$

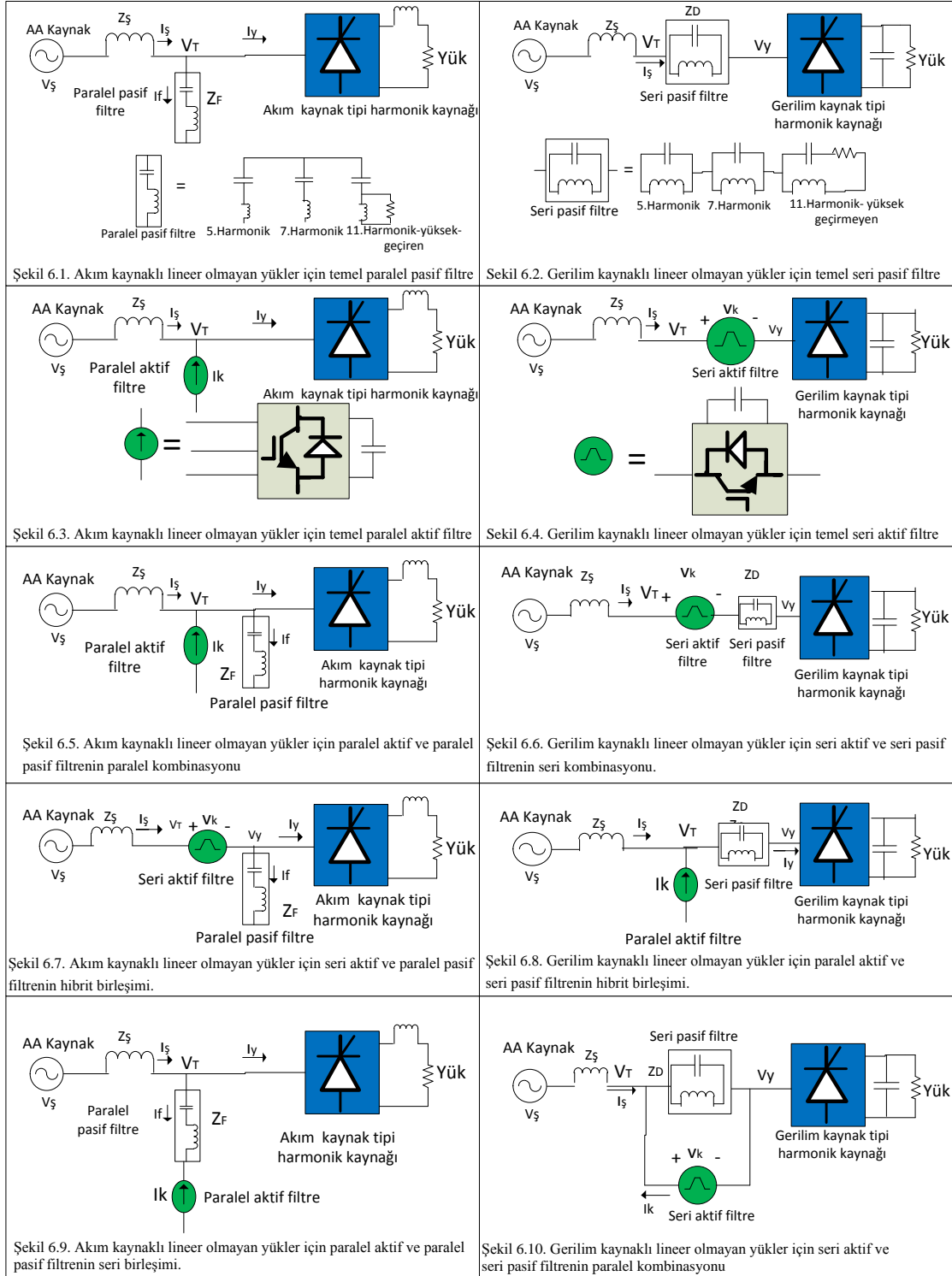
Burada i_{af+} ve i_{af-} a fazı akımının yükselen ve düşen kısımlarıdır. Şekil 5.5' de paralel aktif filtre akımları ve referans akımları farkı alınarak histerezis banda yollanıp darbe genişlik modülasyonu için tetikleme sinyallerinin yollandığı blok gösterilmiştir. Yukarıda gösterilen I_{abc} akımı, paralel aktif filtrenin şebekeye yolladığı akımdır. Simülasyonda kullanılan histerezis bant genişliği ise eps/5 seçilmiştir.

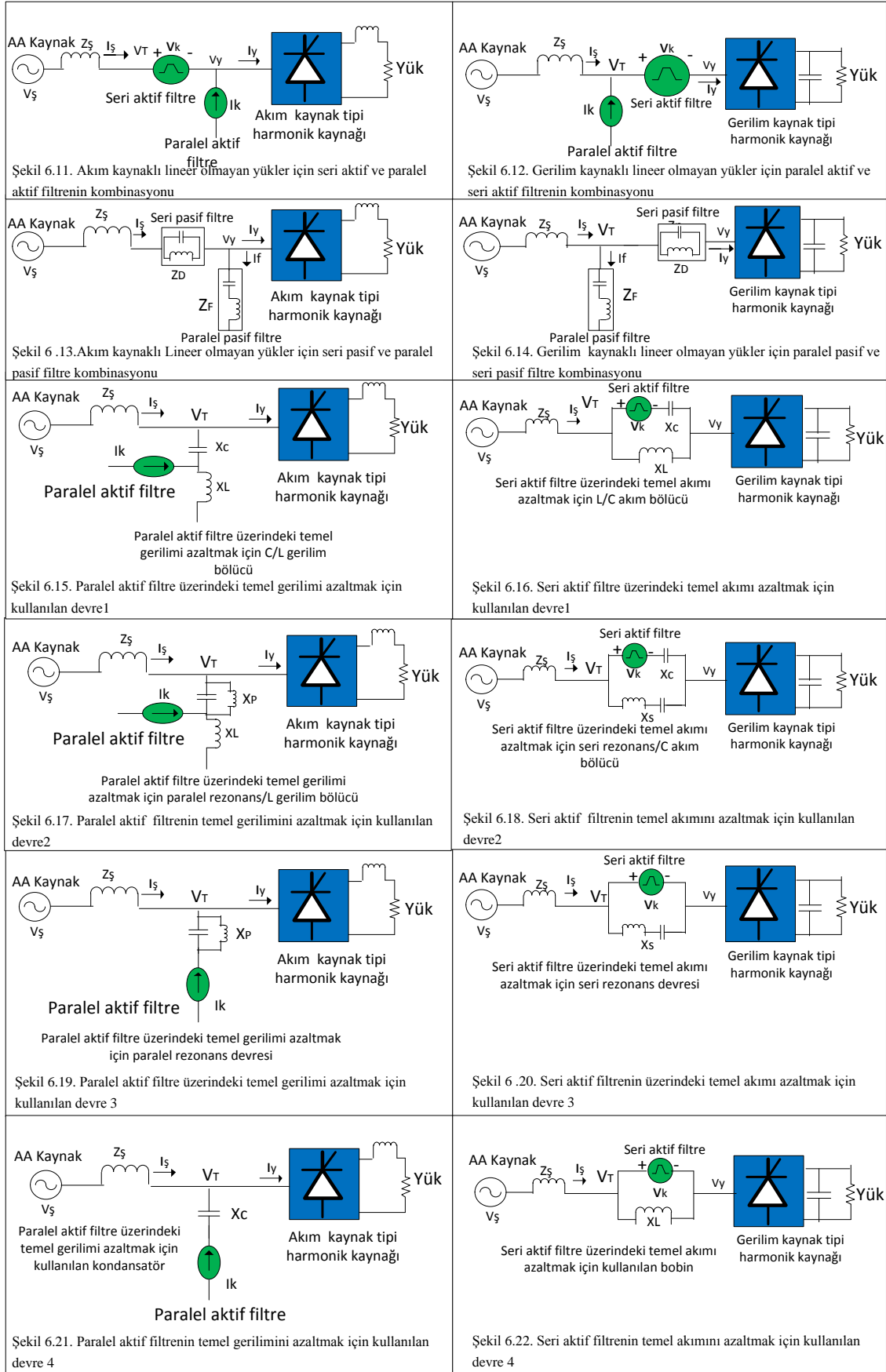


Şekil 5.5. Histerezis bant ve darbe genişlik modülasyonu için tetikleme sinyallerini oluşturan Matlab/Simulink bloğu

6. ÇEŞİTLİ AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde çeşitli aktif güç filtrelerinin şekilleri, avantajları, dezavantajları, fiyatları gibi çeşitli özellikleri incelenmiştir.





Yukarıdaki şekillerde V_s şebeke gerilimi, Z_s şebeke empedansı, I_s şebeke akımı, V_k aktif filtrenin gerilim kompanzasyonu, I_k aktif filtrenin kompanzasyon akımı, V_T terminal gerilimi, V_y yük gerilimi I_y yük akımı, I_f pasif filtrenin çektiği akım, Z_D seri pasif filtrenin empedansı, Z_F ise paralel pasif filtre empedansını göstermektedir. Tablo 6.1’de, yukarıda verilen şekillere ilişkin AGF özellikleri verilmiştir. Bu tabloda I_{yh} yük akımı harmoniği, V_{yh} yük gerilimi harmoniği, V yük terminal gerilimi değeri, I yük akım değeri, V_t ve I_t temel gerilim ve temel akım, I_{var} PPF reaktif akımı, V_{df} seri pasif filtre Z_D üzerindeki temel gerilim düşümünü göstermektedir.

Tablo 6.1. Çeşitli Filtre Birleşimlerinin Özellikleri

Filtre Birleşimlerinin Özeti				
Şekil (6.)	İşletim Prensipleri/ Uygun Lineer Olmayan Yük	Devre Tasarımı ve Kontrol Konusu	Özellikleri, Performansı	VA Derecesi/Sistem fiyatı
1	Harmonik Azalması/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	Düşük Empedans veya Seri Rezonans Devresi	Kaynak Empedansından Etkilenmesi ve Rezonans Oluşması	Var+harmonik akım, $I_{var} + I_{yh}$ /en ucuzu
2	Harmonik Engelleme/Gerilim Kaynaklı lineer Olmayan Yük	Yüksek Empedans Devresi veya Paralel Rezonans Devresi	Kaynaktan Etkilenmemesi ve Rezonans Oluşmaması	Temel+harmonik gerilimi, $V_{df} + V_{yh}$ /en ucuzu
3	Akım Kaynağı/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	PAGF: Akım Enjekte eder bu yüzden $I_k = -I_y(h)$	Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yükler İçin ideal Performans	I_{yh} /Pahalı
4	Gerilim Kaynağı/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF: Gerilim Üretir bu yüzden $V_k = -V_y(h)$	Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yükler İçin ideal Performans	V_{yh} /Pahalı
5	Akım Kaynağı+Harmonik Azalması/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	PAGF: Düşük Bileşenli Harmonikleri Kompanze Eder ve Rezonansı Engeller, PPF: Yüksek Bileşenli Harmonikleri Kompanze eder	İyi Performans, Kompanzasyon rol paylaşımı, Dinamik VAR Kompanzasyonu sağlayabilir	PAGF: $I_{yh}(5,7)$ PPF:($I_{var} + I_{yh}(11,13, \dots)$) /oldukça pahalı
6	Gerilim Kaynağı+Harmonik Engelleme/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF: Düşük Bileşenli Harmonik Kompanzasyonu ve Engelleme, SPF:Yüksek Bileşenli Harmonik Kompanzasyonu	İyi Performans, Kompanzasyon rol paylaşımı, Dinamik Gerilim Regülasyonu sağlayabilir.	SAGF: $V_{yh}(5,7)$ SPF:($V_{df} + V_{yh}(11,13, \dots)$) /oldukça pahalı

7	SAGF:Harmonik İzolasyonu, PPF:Harmonik Kompanzasyonu /Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF:Harmonik Akımları Bloklama, PPF:Düşük Empedans Devresi	İdeal Performans, Dinamik Gerilim Regülasyonu sağlayabilir	SAGF: minimize edilmiş VA değeri, PPF:(Ivar+Iyh)/minimize edilmiş sistem fiyatı
8	PAGF:Harmonik İzolasyonu SPF:Harmonik Engellemesi /Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	PAGF:Bitişik ve Zıt Harmonikleri Elimine Eder bu yüzden terminal geriliminde harmonik gözükmez, SPF: Yüksek Empedans Devresi	İdeal Performans, Dinamik VAR Kompanzasyonunu PAGF ile sağlayabilir	PAGF:Ih(zıt + birleşik), SPF:(Vt+Vyh)/ minimize edilmiş sistem fiyatı
9	PAGF: PPF Performansını Arttırır ve Rezonansı Engeller , PPF: Harmonik Kompanzasyonu/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	PAGF: PPF' yi Kontrol Etmesiyle Bütün Yük Akımı Harmonikleri PPF tarafından elenir. PPF: Düşük Empedans Devresi	Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük için İdeal Performans, Kaynak Harmonik Gerilimi Terminalde Görülecektir. V_T	PAGF:(Ivar+Iyh), minimize edilmiş VA, PPF:(Ivar+Iyh) /minimize edilmiş sistem fiyatı
10	SAGF: SPF Performansını Arttırır, SPF: Harmonik Bloklama/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF: Harmonik Akımları Bloklamaya yardım eder, $V_k = -V_y(h)$,SPF Yüksek Empedans Devresi	Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük için İdeal Performans, Harmonik Rezonans Oluşmaz	SAGF: minimize edilmiş VA, SPF:minimize edilmiş sistem fiyatı
11	SAGF: Harmonik İzolasyon, PAGF: Harmonik Kompanzasyon/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF: Harmonik İzolasyonu,Kaynak Harmonik Kompanzasyonu ve Gerilim Regülasyonu, PAGF: Yük Harmonik Kompanzasyonu	Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük için İdeal Performans, Dinamik Gerilim Regülasyonu ve VAR Kompanzasyonu sağlayabilmesi	SAGF: V_{sh} , PAGF:(Ivar+Iyh) /en pahallısı
12	SAGF: Harmonik Kompanzasyon, PAGF: Harmonik Yönlendirme/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SAGF: Yük Harmonik Kompanzasyonu, PAGF: Birleşik ve Zıt Harmonikler İçin Azaltıcı	Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük için İdeal Performans, Dinamik VAR Kompanzasyonu sağlayabilmesi	SAGF: V_{yh} , PAGF: Ih(zıt ve/veya birleşik)/ en pahallısı
13	SPF: Harmonik İzolasyon, PPF: Harmonik Kompanzasyon/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SPF: Harmonik İzolasyonu ve Kaynak Harmonik Kompanzasyonu, PPF: Yük Harmonik Kompanzasyonu	PPF' nin Tek Başına Kullanılmasından daha İyi bir performans sağlar. Şebeke harmonikleri olmasına rağmen V_T Sinüzoidal olur	SPF: V_{sh} , PAGF:(Ivar+Iyh)/ucuz
14	SPF: Harmonik Kompanzasyon, PPF: Harmonik Yönlendirme/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	SPF: Yük Harmonik Kompanzasyonu, PPF: Birleşik Harmonik Yükler İçin Paralellik Sağlar	Kaynak ve Birleşik Harmoniklerin Varlığında Bile ,daha Sinüzoidal V_T Terminal Gerilimini sağlar.	SPF: V_{yh} , PPF: Ih(zıt ve/veya birleşik)/ucuz

15 17 19 21	PAGF Üzerine Uygulanan Temel Gerilimi Azaltmak İçin LC Devresi Kullanılır/Akım Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	Şekil(15) için PAGF üzerindeki temel gerilim $X_L/(X_L+X_C)$ ile azaltılabilir. Şekil(17) için ise temel gerilim $X_L/(X_L+X_P)$ ile azaltılabilir. Şekil(19) ve Şekil(21) için ise temel gerilim sıfıra indirilebilir. Diğer taraftan, PAGF tarafından enjekte edilen harmonik akımlar X_C veya X_P üzerinde harmonik düşüme neden olacaktır.	PAGF' in Toplam VA Değerini Ve Sistemin Toplam Maliyetini Minimize etmek İçin Optimum Bir Tasarım İstenir. .Dinamik var Kompanzasyonu sağlamaz	Şekil(15): $X_L/(X_C+X_L)$ Iyh Şekil(17): $X_L/(X_P+X_L)$ Iyh
16 18 20 22	SAGF Üzerine Uygulanan Temel Akımı Azaltmak İçin LC Devresi Kullanılır/Gerilim Kaynaklı Lineer Olmayan Yük	Şekil(16) için SAGF üzerindeki temel akım $X_L/(X_C+X_L)$ ile azaltılabilir. Şekil(18) için ise temel akım $X_L/(X_S+X_L)$ ile azaltılabilir. Şekil(20) ve Şekil(22) için temel akım sıfıra indirilebilir. Diğer taraftan SAGF tarafından üretilen gerilim harmoniği X_C veya X_P üzerinde harmonik akıma neden olacaktır.	SAGF' nin Toplam VA Değerini ve Sistemin Toplam Maliyetini Minimize etmek İçin Optimum Bir Tasarım İstenir. Dinamik Gerilim Regülasyonu Sağlamaz	Şekil(16): $X_L/(X_C+X_L)$ Vyh Şekil(18): $X_L/(X_S+X_L)$ Vyh

Şekil 6.1, bir paralel pasif filtrenin temel konfigürasyonunu göstermektedir. PPF seri LC devresinden oluşup LC değerleri yük veya harmonik akım kaynağındaki harmonik frekanslara göre ayarlanır. Ayarlanmış bu devreler harmonik frekanslara çok küçük empedans göstererek veya yüksek geçiren filtre gibi davranarak harmonik azalmasını gerçekleştirir.

Şekil 6.2, seri pasif filtrenin temel konfigürasyonunu göstermektedir. SPF, PPF' nin aksine yük veya harmonik gerilim kaynakları için yüksek empedans göstererek engeller yani harmonik akım engelleyici olarak davranır. Şekil 6.2' de gösterdiği gibi ayarlanmış olan 5. harmonik ve 7. harmonik seri pasif filtresi 5.harmoniğe ve 7. harmoniğe yüksek empedans göstererek harmonik geçişine engel olur. Buradaki 11. harmoniğe ayarlanmış seri pasif filtre ise 11. ve daha yukarıdaki harmonikler için yüksek empedans gösterir (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.3, bir PAGF' nin temel konfigürasyonunu gösterir. PAGF yükteki var olan harmonik akımlara aynı büyüklükteki ve zıt fazdaki harmonikleri enjekte ederek var olan harmonikleri kompanze eder. Burada PAGF bir akım kaynağı gibi davranmaktadır.

Şekil 6.4, SAGF' nin temel konfigürasyonunu göstermektedir. PAGF' nin aksine yük harmonik gerilimleri için aynı büyüklükte ve zıt fazdaki harmonik gerilimi sağlar, böylece harmonik akım akışını engellemek için bir gerilim kaynağı olarak davranır (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.5, akım kaynaklı lineer olmayan yükler için bir PAGF' nin ve PPF' nin paralel kombinasyonunu göstermektedir. Buradaki PAGF sınırlı anahtarlama frekansı ve değerlerinden dolayı, yüksek bileşenli (11.harmonik ve yukarısı) harmoniklerden çok, düşük bileşenli harmoniklerin (5.harmonik 7.harmonik) elenmesi için uygun iken PPF ise yüksek bileşenli harmoniklerin elenmesi için uygundur. Aynı zamanda PAGF kaynak ve PPF arasındaki olası rezonansı elimine etmek için kullanılabilir (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.6, gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için bir SAGF ve SPF' nin seri kombinasyonunu göstermektedir. Benzer şekilde SAGF ve SPF kompanzasyon rollerini paylaşabilir ve sırasıyla düşük bileşenli harmonikleri ve yüksek bileşenli harmonikleri engellemek için kullanılabilir (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.7, akım kaynaklı lineer olmayan yükler için küçük bir SAGF ve PPF' nin hibrit sistemini göstermektedir. Buradaki SAGF kaynak empedansının etkisi, rezonans gibi PPF' nin problemlerini yok etmek ve kompanzasyon performansını arttırmak için kullanılır. PPF yük harmonik akımlarını azaltır.

Şekil 6.8, Şekil 6.7'nin diğer devresidir. Gerilim kaynaklı lineer olmayan yükler için bir SPF ve PAGF' nin hibrit birleşimidir. Şekil 6.7'nin aksine Şekil 6.8' deki devre, harmonik akımları engeller ve PAGF, SPF' nin performansını arttırmak ve SPF' nin rezonansını elimine etmek için kullanılabilir (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.9, bir PPF ve PAGF' nin seri kombinasyonunu gösterir. Burada PAGF yük akımlarındaki harmonikleri elimine etmek için harmonik akımları enjekte eder ve temel akımı sağlar. Bu yüzden şebeke gerilimi PPF için uygulanır ve PAGF üzerinde temel gerilim gözükmez. Bunun sonucunda PAGF' nin gerekli VA oranı azalır ve kombine edilmiş sistem sitili bir PAGF' nin yaptığı kadar çok iyi bir performans sağlar.

Şekil 6.10, Şekil 6.9'un diğer devresidir. SAGF ve SPF' nin paralel kombinasyonudur. Benzer şekilde SAGF' nin VA değeri, izin verilen SPF den akan temel akım ile azalır (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.11, akım kaynaklı lineer olmayan yükler için, ideal filtre konfigürasyonunu gösterir. PAGF yük harmoniklerini yok etmek için harmonik akımları enjekte eder, oysaki SAGF şebekede akan akımları bloke eder. Bu filtre sistemi yalnızca harmonik akımları elimine etmez ayrıca yük için bozulmuş gerilim veya değişken gerilimlerde bile saf sinüzoidal ve sabit V_T değerini sağlar.

Şekil 6.12, Şekil 6.11'in diğer devresidir. Bir harmonik gerilim kaynaklı yük için idealdir. Bu sistem harmonik akımları engeller ve bütün yük bağlantıları için saf sinüzoidal gerilim (V_T) sağlar (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 harmonik akım kaynak yükleri ve harmonik gerilim kaynak yükleri için pasif filtrenin sıralı kombinasyonlarını göstermektedir.

Aktif filtrelerin performansları harika olmasına rağmen pahalıdır ve yüksek güç uygulamaları zordur. Aktif filtrelerin gerekli değerleri azaltılmak istenilebilir. Şekil 6.15' den Şekil 6.22'ye kadar PAGF üzerindeki temel gerilim nasıl azaltılır ve SAGF üzerindeki temel akımları nasıl azaltacağımızı gösteren devreler vardır. Örneğin Şekil 6.15'de PAGF üzerindeki temel gerilimi azaltma için C ve L formu bir gerilim bölücüdür. PAGF' deki temel gerilim geçişi, C ve L' nin empedans oranları tarafından belirlenir.

Şekil 6.16, Şekil 6.15'deki devrenin diğer formudur. Burada SAGF' nin temel akımını azaltmak için C ve L akım bölücüsü kullanılır (Peng ve Adams, 2001).

Şekil 6.17’de temel gerilimi azaltmak için ve empedans oranını arttırmak için, temel frekansta rezonans olan LC paralel devresi gösterilmiştir.

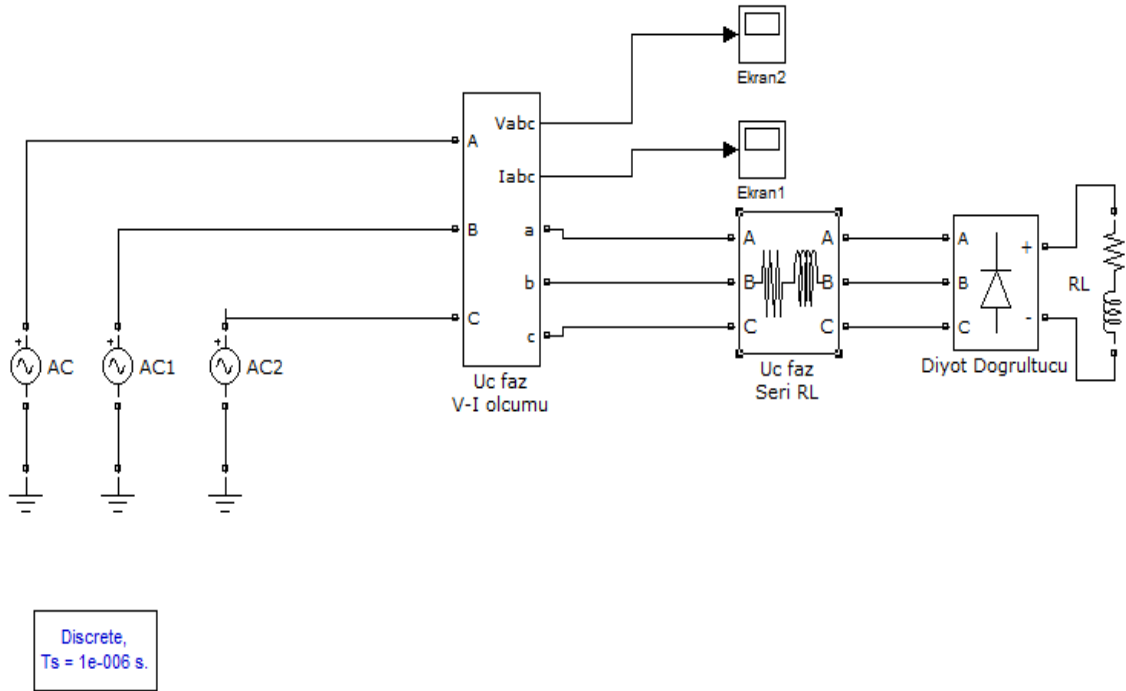
Şekil 6.18’de temel şebeke frekansında LC seri devresinin rezonasyonu ile SAGF’ nin üzerindeki temel akımı azaltır.

Şekil 6.19 ve Şekil 6.21’de PAGF üzerindeki temel gerilim, PAGF’ nin enjekte edilen akımın kontrollü ile yok edilebilir. Benzer şekilde Şekil 6.20 ve Şekil 6.22 SAGF üzerindeki temel akım SAGF’ nin ürettiği temel gerilim kontrollü ile yok edilebilir (Peng ve Adams, 2001).

7. 3 FAZLI SİSTEMLERDEKİ PAGF MATLAB/SİMULİNK DEVRELERİ

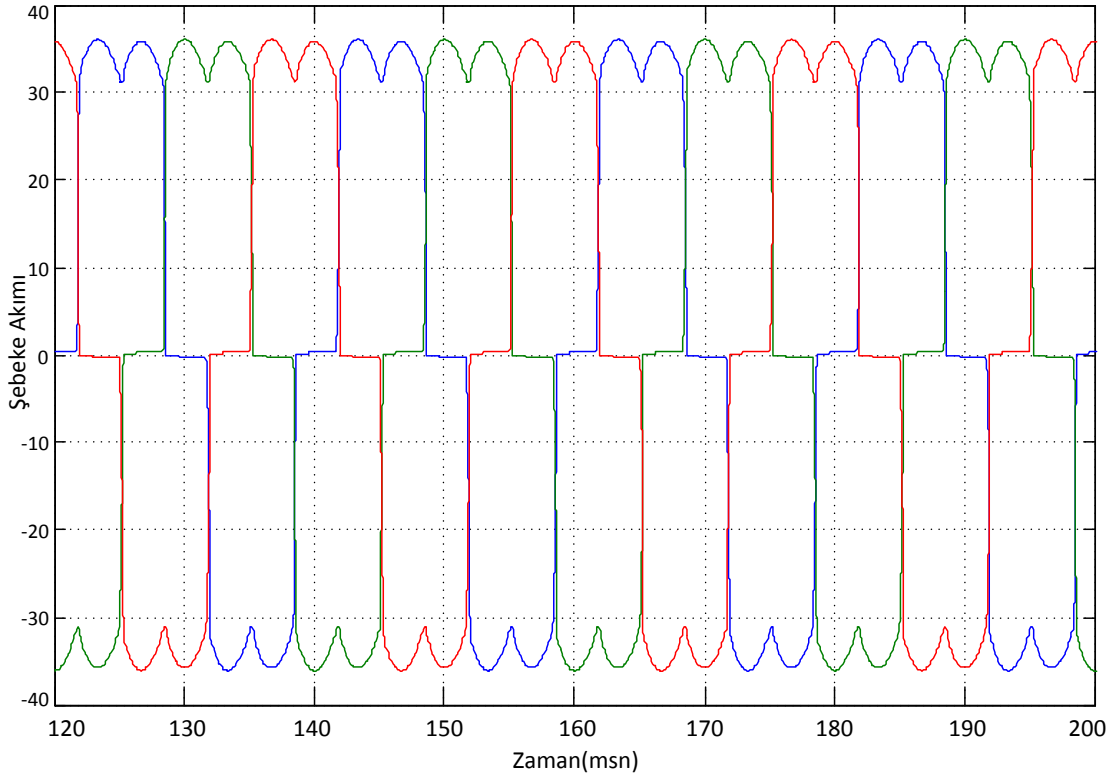
7.1. Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanılmadan Önceki Lineer Olmayan Yük ve Bozulum Değerleri

Lineer olmayan yük olarak diyot doğrultucu seçilmiştir. Aynı zamanda sistemin dengeli olduğu varsayılmıştır. PAGF kullanılmadan önceki THD değerleri ve Matlab/Simulink blokları aşağıda gösterilmiştir. Şebeke gerilimi olarak tepe değeri 311 V, frekansı ise 50 Hz seçilmiştir. Diyot doğrultucunun direnç ve bobin değerleri sırası ile 15 Ω ve 1 mH olarak alınmıştır. Diyot doğrultucunun önünde kullanılan seri R-L değerleri ise sırasıyla $5 \cdot 10^{-3} \Omega$ ve 0.1 mH olarak alınmıştır. Şekil 7.1'de gerçekleştirilen PAGF'nin sisteme bağlanmadan önceki lineer olmayan yük ve Matlab/Simulink bloğu verilmiştir.



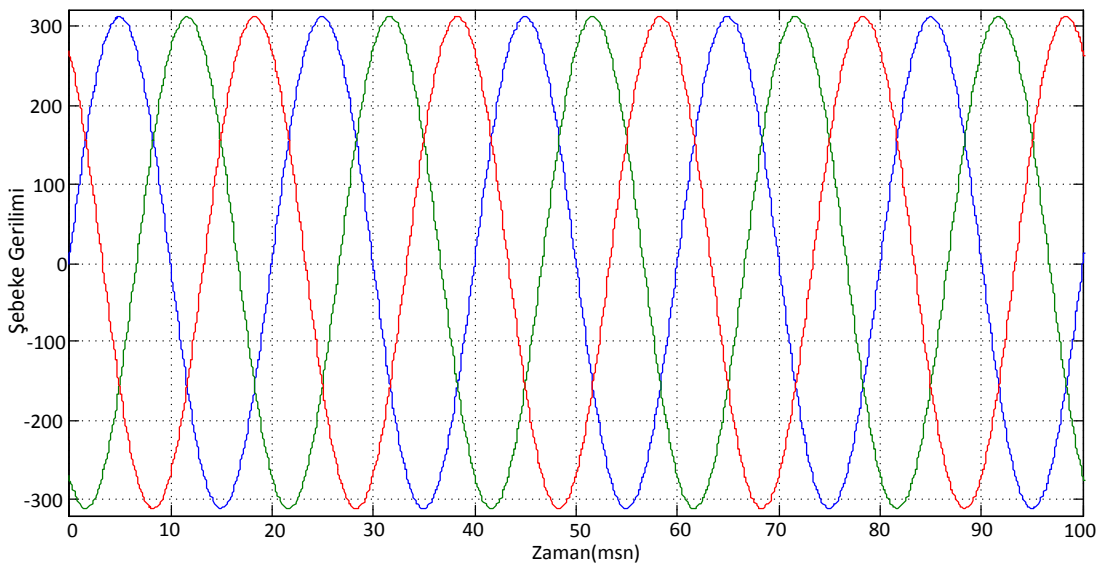
Şekil 7.1. Paralel aktif güç filtresi bağlanmadan önceki lineer olmayan yük ve Matlab/Simulink bloğu

Şekil 7.2'de lineer olmayan yük ile bozulan şebeke akımlarını göstermektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi şebeke akımları sinüzoidal dalgadan çok uzaklaşmıştır.

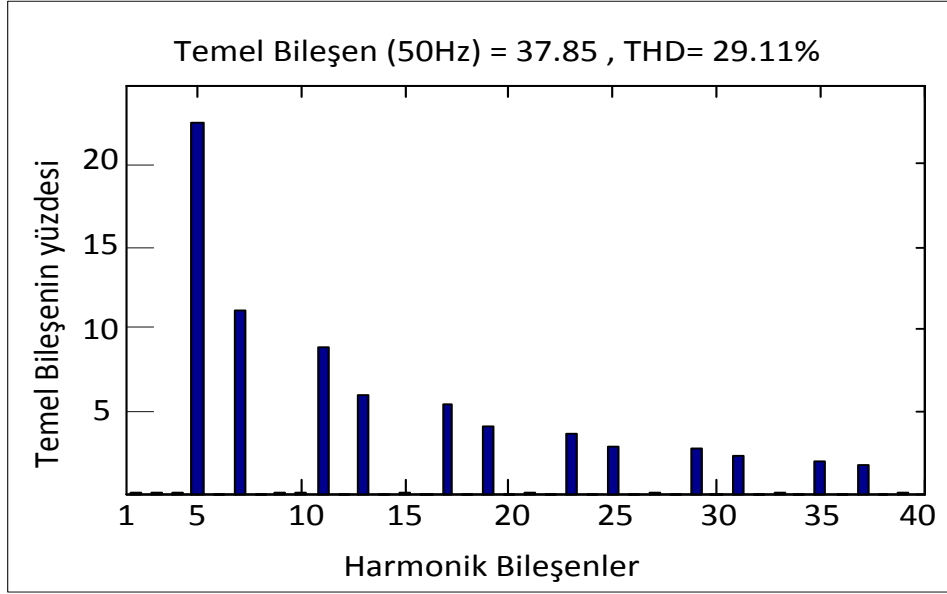


Şekil 7.2. Paralel aktif güç filtresi kullanılmadan önceki bozulan şebeke akımları

Şekil 7.3'te ise paralel aktif filtre kullanılmadan önceki şebeke gerilimleri gösterilmektedir. Son olarak Şekil 7.4'te bozulmuş olan şebeke akımının THD değerini vermektedir. Buradan görüleceği gibi şebeke akımının THD değeri % 29.11 dir.



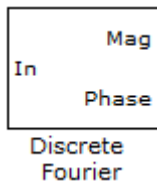
Şekil 7.3. Paralel aktif filtre kullanılmadan önceki şebeke gerilimleri



Şekil 7.4. Bozulan şebeke akımının THD değeri

7.2. Fourier Analizi Tabanlı Kontrol Yöntemi ile 3 Fazlı 3 Telli Paralel Aktif Filtre Tasarımı

Herhangi bir sinüzoidal olmayan dalga formu, frekansları temel frekansın katları olan saf sinüs dalgalarına ayrılabilir. Temel frekansın katlarındaki frekansa sahip olan bu saf sinüs dalgaları harmonik bileşenleridir. Fourier analizi sinüs dalga formu bileşenin büyüklüğünü ve frekansını belirlemek için kullanılmaktadır (Henderson ve Rose, 1994; Phipps vd., 1994; Subjak ve Mcquilkin, 1990). Aşağıdaki MATLAB\Simulink fourier analizi bloğu, gelen sinyalin büyüklük ve faz açısını hesaplamaktadır.



Şekil 7.5. Gelen sinyalin büyüklük ve faz açısını, fouier dönüşümü ile hesaplayan Matlab/Simulink bloğu

FAKT, lineer olmayan sistemlerde çeşitli harmonik bileşenlerin, yük akımından elde etmesi ve elde edilen bu bileşenlerin referans sinyallerini oluşturmak üzere birleştirilmesine dayanır. Bu dönüşüm ile sistemdeki istenilen harmonik bileşen ya da bileşenler hesaplanabilir. Fourier dönüşümünün en büyük dezavantajı hesaplamaların külfetli olması ve oldukça uzun sürmesidir (El-habrouk vd., 2000; Jain vd., 2005; Sing vd., 1999).

Sinüzoidal olmayan gerilim veya akım dalga şekilleri, aşağıdaki formüllerde belirtildiği gibi farklı frekanstaki ve farklı büyüklükteki sinüzoidal sinyallerin toplamı olarak gösterilebilir (Jain vd., 2005).

$$V_s(t) = \sum_{n=1}^k V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (7.1)$$

$$I_Y(t) = \sum_{n=1}^k I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (7.2)$$

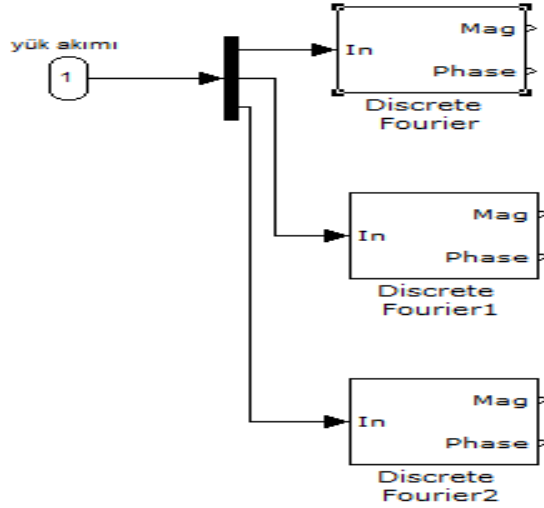
$I_Y = I_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ harmonikli akımın temel bileşenini gösterir. Bu temel akım bileşeni lineer olmayan sistemde yük akımından çıkarılırsa yalnızca harmonikli akımlar elde edilir.

$$\begin{aligned} I_{Yükakımı(a)} &= I_{1.Harmonik(a)} + I_{2.3.4...Harmonik(a)} \\ I_{Yükakımı(b)} &= I_{1.Harmonik(b)} + I_{2.3.4...Harmonik(b)} \\ I_{Yükakımı(c)} &= I_{1.Harmonik(c)} + I_{2.3.4...Harmonik(c)} \end{aligned} \quad (7.3)$$

denk.(7.3)'den

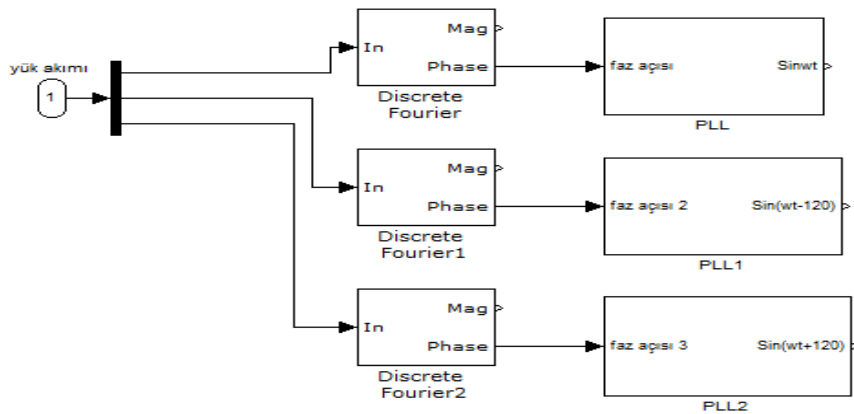
$$\begin{aligned} I_{Yükakımı(a)} - I_{1.Harmonik(a)} &= I_{2.3.4...Harmonik(a)} \\ I_{Yükakımı(b)} - I_{1.Harmonik(b)} &= I_{2.3.4...Harmonik(b)} \\ I_{Yükakımı(c)} - I_{1.Harmonik(c)} &= I_{2.3.4...Harmonik(c)} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Denk.(7.4)'de elde edilen harmonikli akımlar sisteme ters ve eşit büyüklükte basıldığında harmonik kompanzasyonu sağlanmış olur. FAKT algoritmasında ilk başta her faz için yük akımı alınarak temel yani birinci harmoniğin büyüklüğü ve faz açısı bulunur.

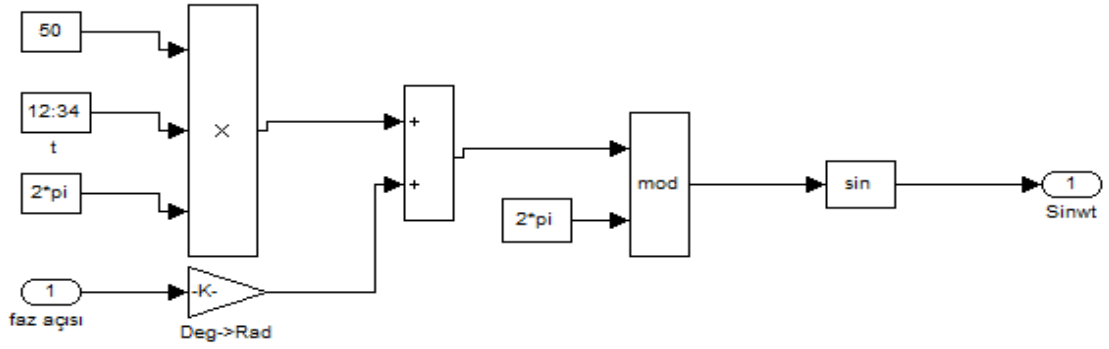


Şekil 7.6. Her bir yük akımının fourier dönüşüm ile faz açısı ve büyüklüğünü bulan Matlab/Simulink bloğu

Faz açısı bilinen sinyali faz kilitlemeli döngüye (PLL) yollanarak bu faz açısına sahip olan sinüs dalga bileşenleri üretilir. Şekil 7.7'de, yük akımı sinyalinin faz açısı hesaplanması ve sinyalin faz kilitlemeli döngüye iletilmesine ilişkin blok verilmiştir. Faz kilitlemeli döngü iç yapısı ise Şekil 7.7'de verilmiştir.

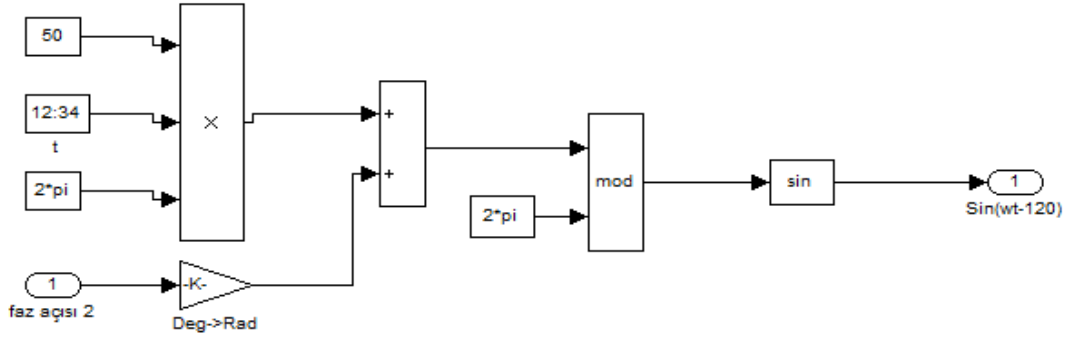


Şekil 7.7. Gelen yük akımı sinyalinin faz açısı hesaplanması ve sinyalin faz kilitlemeli döngüye yollanıp bu faz açısına göre sinüs dalgası üreten Matlab/Simulink bloğu

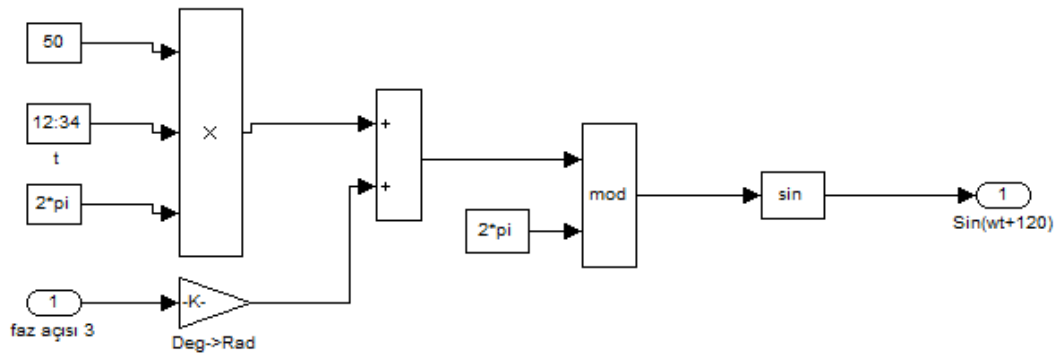


Şekil 7.8. Yük akımının I_a faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü

Şekil 7.8’de, Şekil 7.9’da ve Şekil 7.10’da her bir akımın faz açısına göre sinüs bileşenleri üretilir. Burada her bir faz açısı bilgisine göre $\sin(\omega t)$, $\sin(\omega t-120)$, $\sin(\omega t+120)$ gibi matematiksel fonksiyonlar otomatik olarak hesaplanmaktadır



Şekil 7.9. Yük akımının I_b faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü



Şekil 7.10. Yük akımının I_c faz açısına göre sinüs bileşeni üreten faz kilitlemeli döngü

Fourier dönüşümü alındıktan sonra ve PLL den geçildikten sonra otomatik olarak elde edilen $\sin(\omega t)$, $\sin(\omega t-120)$, $\sin(\omega t+120)$ gibi matematiksel değerleri, her fazın 1. harmonik akım büyüklüğüyle çarptığımızda her bir yük fazına ait 1. harmonik akım değeri hesaplanmış olur. Ancak elde edilen sinüs değerleri I_1 ile çarpmadan önce sistemdeki kayıpları geri vermek için denk.(7.5)' deki gibi $I_{kayıp}$ sisteme eklenmelidir (Jain vd., 2005). Şekil 7.11' de yük akımları ve $I_{kayıp}$ ile her bir yük harmoniğinin temel bileşenini hesaplayan Matlab/Simulink bloğu gösterilmiştir.

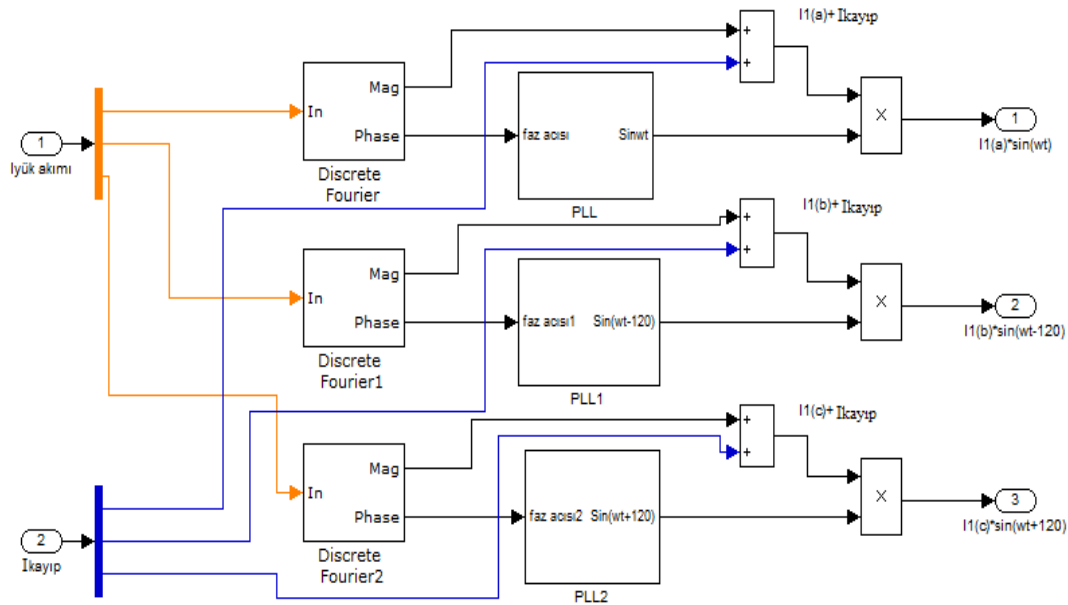
$n=1$ için

$$I_1 = I_1 + I_{kayıp} \quad (7.5)$$

$$I_1 \cdot \text{harmonik}(a) = \left((I_1 + I_{kayıp}) * \sin(\omega t + \phi_{1a}) \right)$$

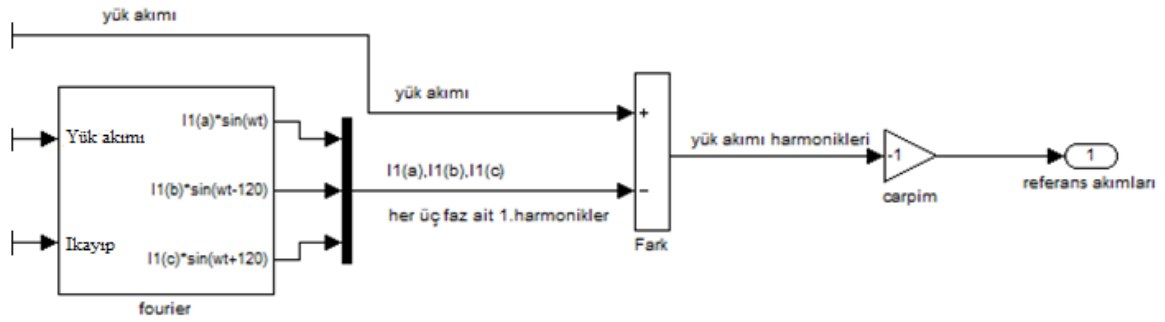
$$I_1 \cdot \text{harmonik}(b) = \left((I_1 + I_{kayıp}) * \sin(\omega t + \phi_{1b}) \right) \quad (7.6)$$

$$I_1 \cdot \text{harmonik}(c) = \left((I_1 + I_{kayıp}) * \sin(\omega t + \phi_{1c}) \right)$$



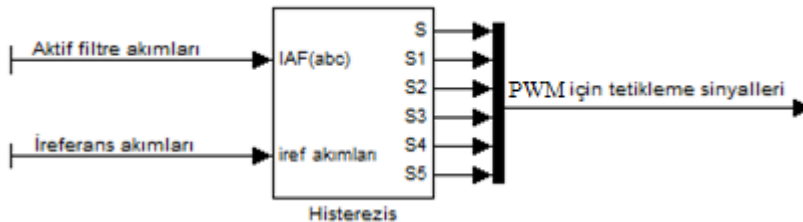
Şekil 7.11. Her bir yük akımının 1. temel harmoniğini bulan Matlab/Simulink bloğu

Son olarak elde edilen a, b, c fazı birinci harmonik bileşenleri denk.(7.4)'de olduğu gibi yük akımından çıkarılarak her bir faz için sistemde istenmeyen harmonik akımlar bulunur. Bu akımların şebekedeki harmonik akımları yok etmesi için ters fakat eşit büyüklükte şebekeye basılması lazımdır. Yük akımından elde edilen ve temel harmoniğin dışındaki bu harmonik akımlar terslenerek referans akımları elde edilir. Şekil 7.12'de referans akımlarının oluşturulmasına ilişkin Matlab/Simulink bloğu verilmiştir.



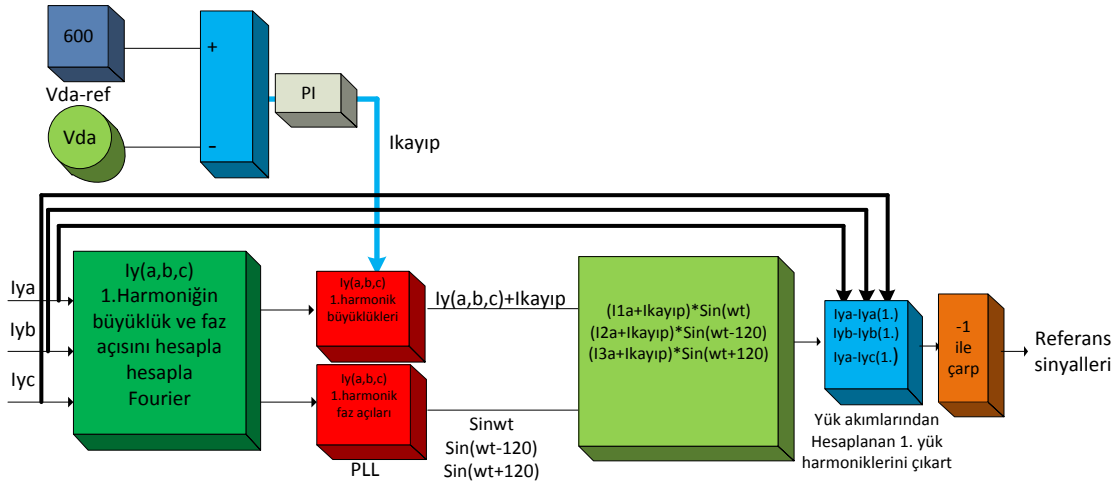
Şekil 7.12. Yük akımlarından temel harmoniğin çıkarılması ile referans akımlarını oluşturan Matlab/Simulink bloğu

Aktif filtre akımlarından, elde edilmiş olan referans akımları farkı alınarak hata sinyali oluşturulur. Bu hata sinyali harmonik akımları yok etmek için histerezis banda gönderilir. Histerezis bandı her faz için gelen hata sinyalini bant sınırlarına göre denetler ve buna göre darbe genişlik modülasyonundaki (PWM) yarı iletken elemanlar için tetikleme sinyallerini üretir. PWM ise gelen tetikleme sinyallerine göre yarı iletken anahtarlarını açıp kapatarak hem aktif filtre akımlarının referans akımlarını takip etmesini sağlar hem de kendi ürettiği akımları şebekeye doğru basarak şebekedeki harmonik akım bozulumunu elimine eder.



Şekil 7.13. PWM için tetikleme sinyallerinin oluşması

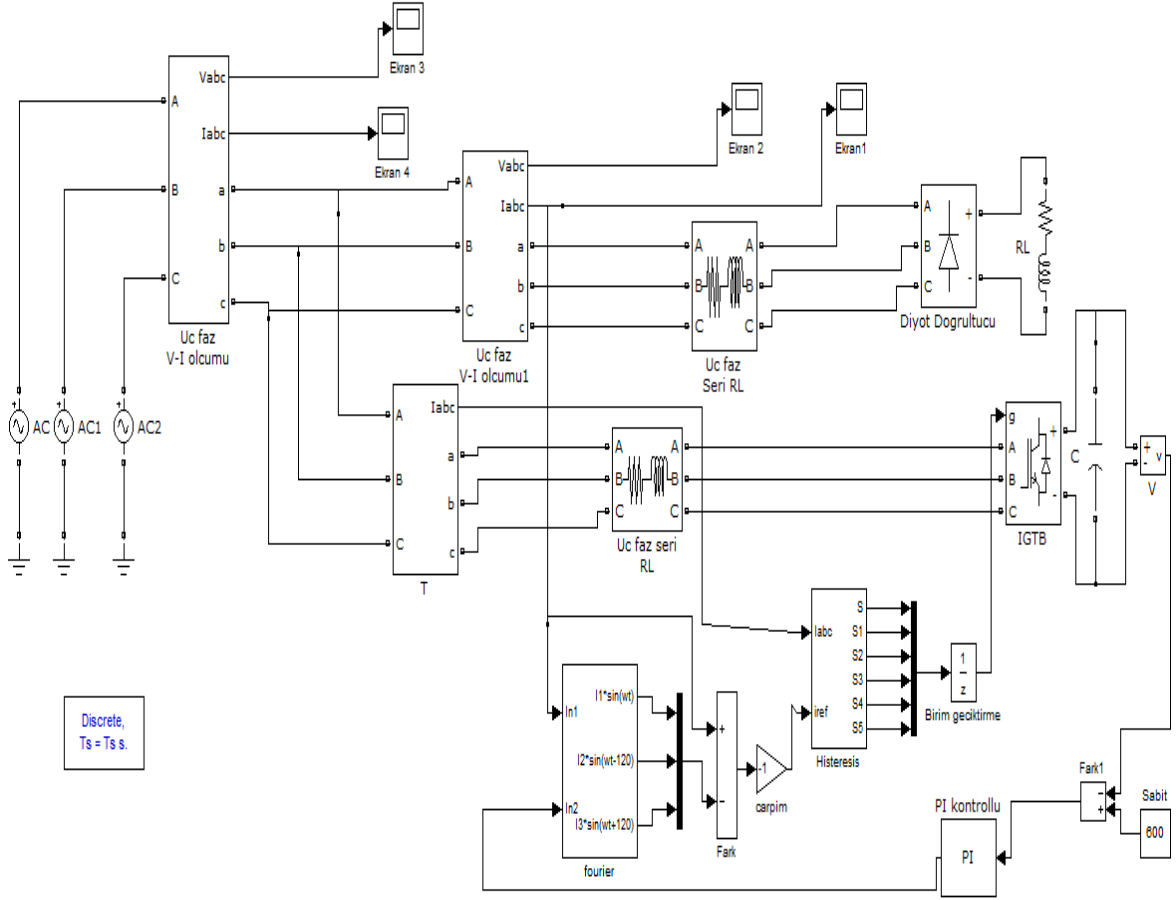
Şekil 7.13'te gelen aktif filtre akımları ile referans akımlarının farkı alınarak PWM için tetikleme sinyallerini üreten blok gösterilmiştir. Şekil 7.14'te ise FATK paralel AGF'nin genel işletim algoritması verilmiştir. FATK Matlab/Simulink bloğu ise Şekil 7.15'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen FATK'üne ilişkin 3 fazlı paralel aktif güç filtreleri ve doğrusal olmayan yük elemanlarının seçilen parametre değerleri Tablo 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Fourier analizi taban kontrolleri ile referans akımlarının oluşması

Tablo 7.1. Fourier ve senkron tabanlı denetim algoritmalarının Matlab/Simulink parametreleri

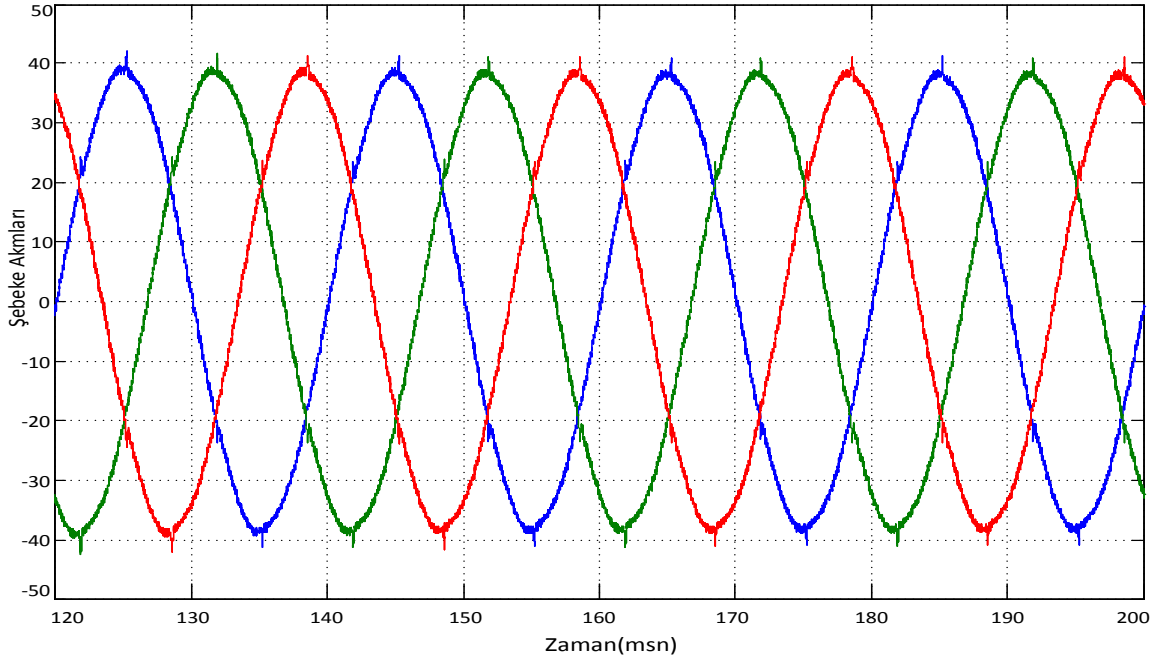
Parametre		Değeri
Kaynak	Gerilimi $V_s(a,b,c)$	220 V_{RMS} /Faz nötr
	Frekansı (f)	50 Hz
Yük	Empedansı (R_Y, L_Y)	15 Ω , 1mH
3 Fazlı_3Telli PAGF	Kondansatör değeri	3000 μ F
	DA Ref Gerilimi (V_{DA})	600V
	Histeresiz bant aralığı	eps/5 A
	Empedans (R_F, L_F)	0.1 Ω , 1mH
PI Parametreleri(K_P, K_I)		0.77, 28



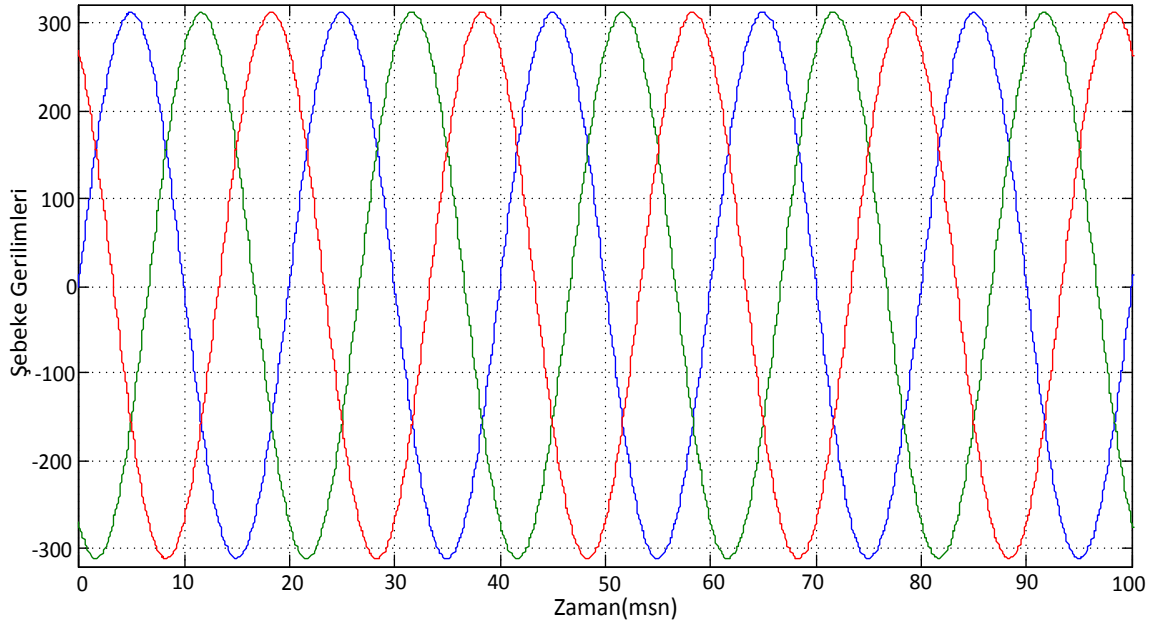
Şekil 7.15. Fourier analizi taban kontrollü Matlab/Simulink şekli

7.2.1. Fourier Analizi Taban Kontrollü Paralel Aktif Güç Filtresi Simülasyonu Sonuçları

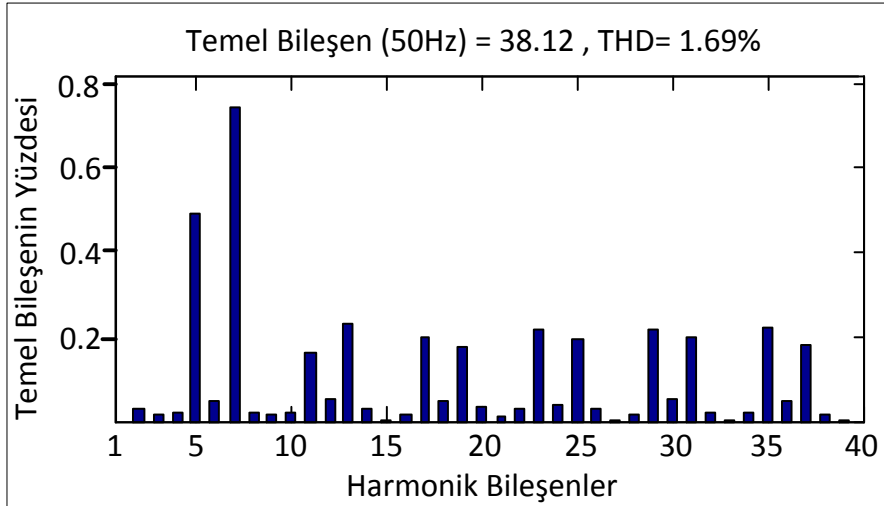
FAKT algoritması uygulandıktan sonraki şebeke akımları ve şebeke gerilimlerinin grafikleri ve düzeltilen şebeke akımlarının THD değerleri Şekil 7.16’da verilmiştir. Şekil 7.17’de ise paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke gerilimlerinin dalga şekilleri göstermektedir. Şekil 7.2 ve 7.16’dan görüleceği gibi, bozulmuş olan şebeke akımlarının dalga şekilleri PAGF bağlandıktan sonra oldukça düzelmiştir.



Şekil 7.16. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımları



Şekil 7.17. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke gerilimleri



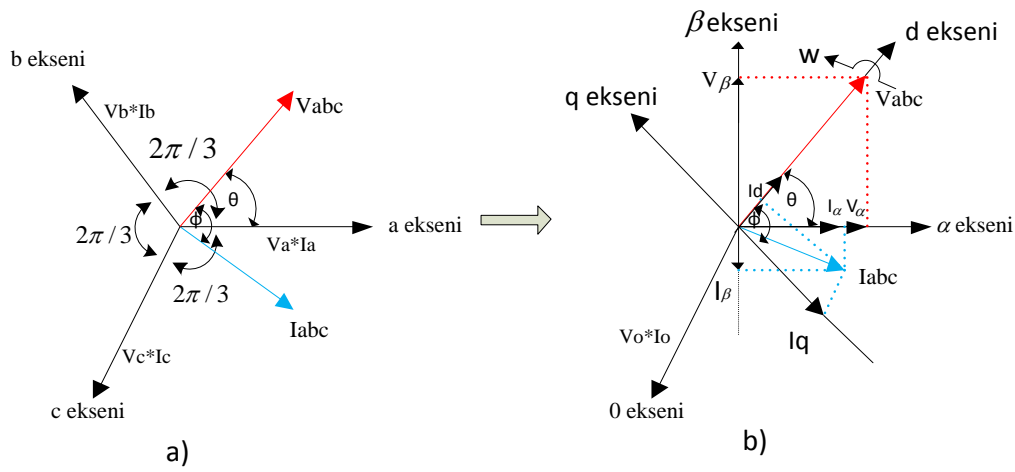
Şekil 7.18. Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımının THD değeri

Aynı zamanda Şekil 7.4 ve şekil 7.18' e bakıldığında bozulmuş olan akımların THD değerinin % 29.11' den % 1.69' a indirildiği görülmektedir. Yani lineer olmayan yükün ürettiği harmonik akımlarla bozulmuş olan şebeke akımı, PAGF bağladıktan sonra saf sinüzoidal dalga şekline çok yaklaşmıştır. Elde edilen THD değeri IEEE 519-1992 standardında belirtilen akım harmonik sınır değerinin çok altında olduğu gözlemlenmiştir.

7.3. Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü Analizi İle 3 Fazlı 3 Telli Paralel Aktif Güç Filtre Tasarımı

Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü (SRYTK) ile harmonik kompanzasyon 1991 yılında S. Bhattacharya tarafından önerilmiştir. Literatürde, SRYTK birçok AGF çalışması yapılmıştır. a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm yapabilmek için sistem gerilim senkron bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem gerilimiyle senkron olabilmek için PLL yapıları kullanılmaktadır. PLL girişine kaynak gerilimleri uygulanarak üretilen ωt , sistemin ωt ile senkronize olduğunda d-q-0 senkron referans yapı, sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. d-q-0 yapıda gerilim vektörünün açılal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açılal konumunu göstermektedir (Kesler ve Özdemir, 2010).

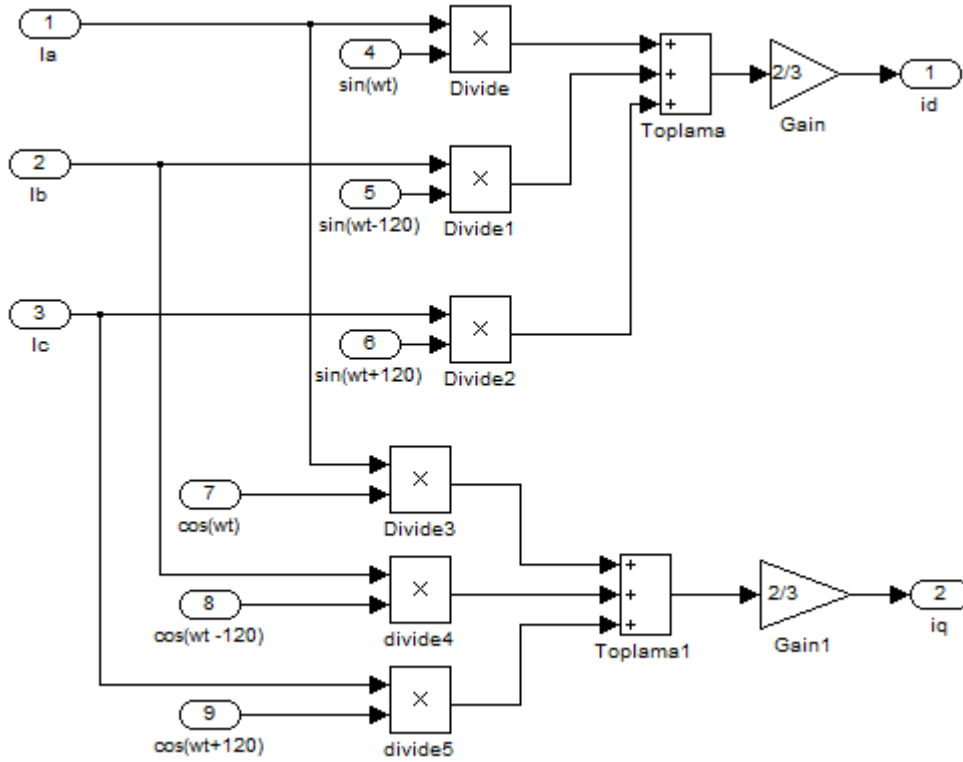
SRYTK AGF uygulamalarında, 3-fazlı a-b-c koordinatlarında akımlar veya gerilimler, sistem gerilimiyle senkron dönen referans yapıya çevrilmektedir. SRYTK yöntemiyle doğrusal olmayan yük durumlarında yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlar tespit edilmekte ve AGF sistemi bu harmonikli akımları yok etmek için sisteme eşit büyüklükte ve ters fazda akımlar üreterek nötr akımı, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır. Şekil 7.19.a'da verilen a-b-c koordinatlarından Şekil 7.19.b 'de verildiği gibi durağan referans yapı α - β -0 koordinatlarına ve dönen referans yapı d-q-0 koordinatlarına dönüşümü birlikte verilmektedir (Kesler ve Özdemir, 2010).



Şekil 7.19. (a) a-b-c koordinatlarından (b) α - β -0 durağan referans yapıdan d-q-0 senkron referans yapıya dönüşüm

Durağan referans yapıda α - β -0 eksenleri dönmemektedir. Sistem gerilim ve akım vektörleri yer değiştirdikçe bu vektörlerin α - β -0 eksenlerindeki değerleri değişmektedir. Dönen referans yapı sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. Bu nedenle sistem gerilim vektörünün açısal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açısal konumunu göstermektedir. Bu referans yöntemi temel olarak 3 adımdan oluşmaktadır. İlk olarak 3 fazlı sistemdeki I_a , I_b , I_c yük akımlarını denk.(7.7) kullanarak senkron dönen referans yapıya dönüştürmektir (Bozabalı, 2009). Şekil 7.20'de bu formülasyonun MATLAB/Simulink bloğu verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ya} \\ I_{yb} \\ I_{yc} \end{bmatrix} \quad (7.7)$$



Şekil 7.20. I_a , I_b , I_c yük akımlarından I_d ve I_q 'yu elde etmede kullanılan matlab/ simulink bloğu

Buradaki I_d ve I_q akımları lineer olan yüklerde sadece DA bileşene sahiptir. Fakat lineer olmayan yüklerde I_d ve I_q akımları AA ve DA bileşene sahip olmaktadır (Kesler ve Özdemir, 2010).

$$I_q = \bar{I}_q + \tilde{I}_q \quad (7.8)$$

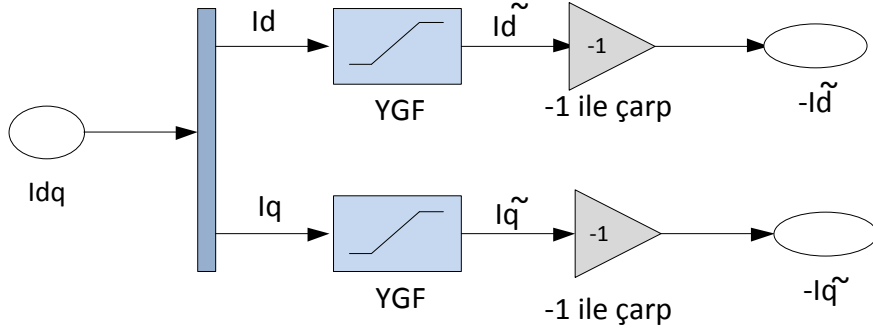
$$I_d = \bar{I}_d + \tilde{I}_d \quad (7.9)$$

Sistemlerde I_d ve I_q yükleriyle sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılmak isteniyorsa akımın I_q bileşeni, sadece harmonik kompanzasyon yapılmak isteniyorsa I_d ve I_q akımlarının AA bileşenleri (\tilde{I}_d, \tilde{I}_q), reaktif güç ve harmonik akım kompanzasyonu birlikte yapılmak isteniyorsa bu akımların \tilde{I}_d ve I_q bileşenleri referans alınmalıdır (Kesler ve Özdemir, 2010). Diğer kompanzasyon tipleri için gerekli akım bileşenleri Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2. Kompanzasyon tipleri için gerekli akım bileşenleri

Kompanzasyon Tipi	Gerekli Akım bileşenleri
Reaktif Güç kompanzasyonu	I_q
Harmonik Akım kompanzasyonu	\tilde{I}_d, \tilde{I}_q
Harmonik Akım ve Reaktif Güç kompanzasyonu	\tilde{I}_d, I_q
Nötr akımı kompanzasyonu	I_0

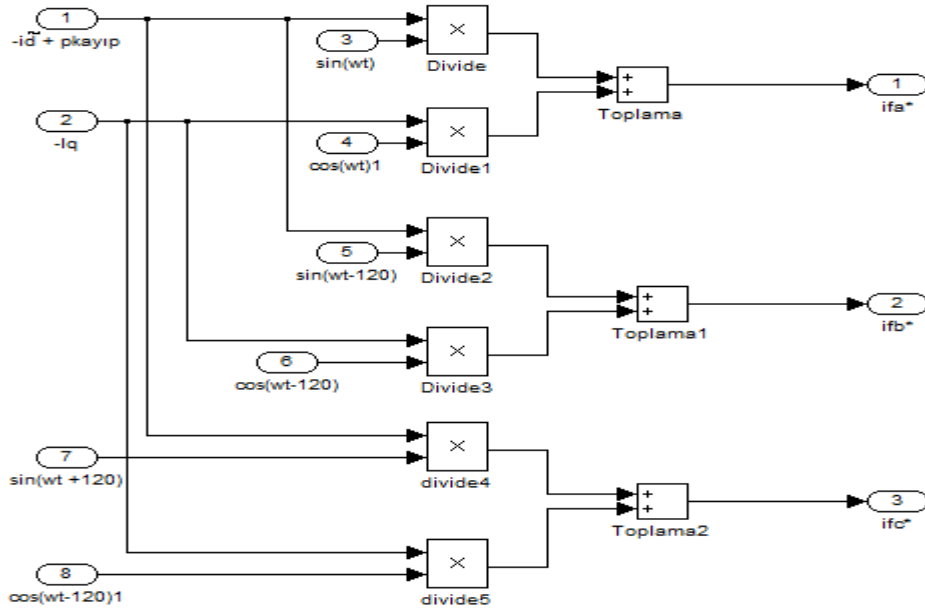
SRYTK’deki ikinci adım, AGF’nin yapması gereken kompanzasyon çeşidine göre I_d ve I_q akım bileşenlerinin bulunmasıdır. Bu tezde yalnızca harmonik kompanzasyonu sağlamak için I_d ve I_q akımlarının AA bileşenleri bulunması gerekmektedir. I_d ve I_q akımlarının AA bileşenlerini bulmak için gelen I_d ve I_q akımlarını doğrudan yüksek geçiren filtre kullanarak AA bileşenlerini elde edilebilir.



Şekil 7.21. I_d ve I_q akımlarının AA bileşenlerinin bulunmasını sağlayan blok

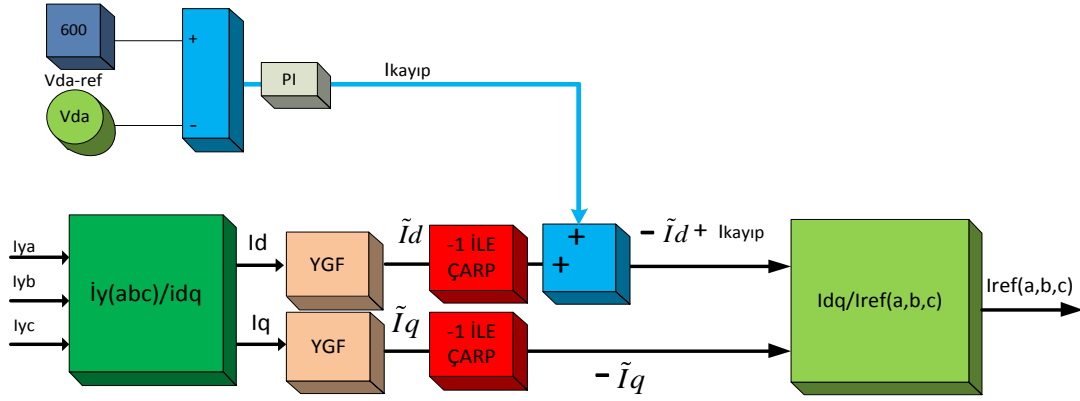
SRYTK algoritmasındaki son adım ise \tilde{I}_d ve \tilde{I}_q 'nin denk.(7.10)'daki dq-abc dönüşümünü kullanarak referans sinyallerinin elde edilmesidir (Bozabalı , 2009).

$$\begin{bmatrix} I_{ref(a)} \\ I_{ref(b)} \\ I_{ref(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{\tilde{d}} + I_{kayıp} \\ -I_{\tilde{q}} \end{bmatrix} \quad (7.10)$$



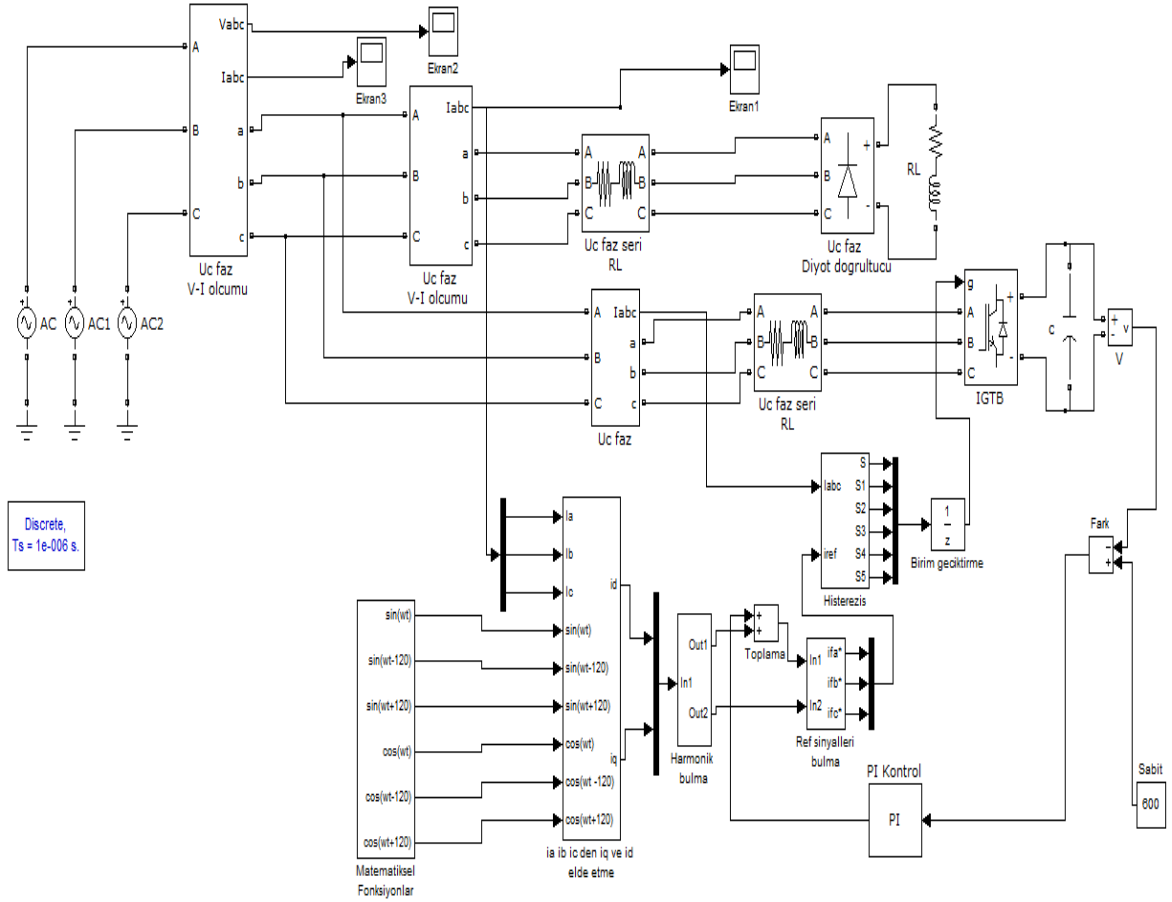
Şekil 7.22. I_d ve I_q ' den $I_{ref(a)}$, $I_{ref(b)}$ ve $I_{ref(c)}$ referans bileşenlerinin hesaplanması

Şekil 7.22’de, I_d ve I_q ’nın AA bileşenleri ve matematiksel fonksiyonlar kullanılarak referans akımlarını hesaplayan Matlab/Simulink bloğu gösterilmiştir. Şekil 7.23’de ise senkron referans yapı kontrol teorisinin genel algoritması verilmiştir.



Şekil 7.23. Senkron referans yapı tabanlı kontrol algoritması

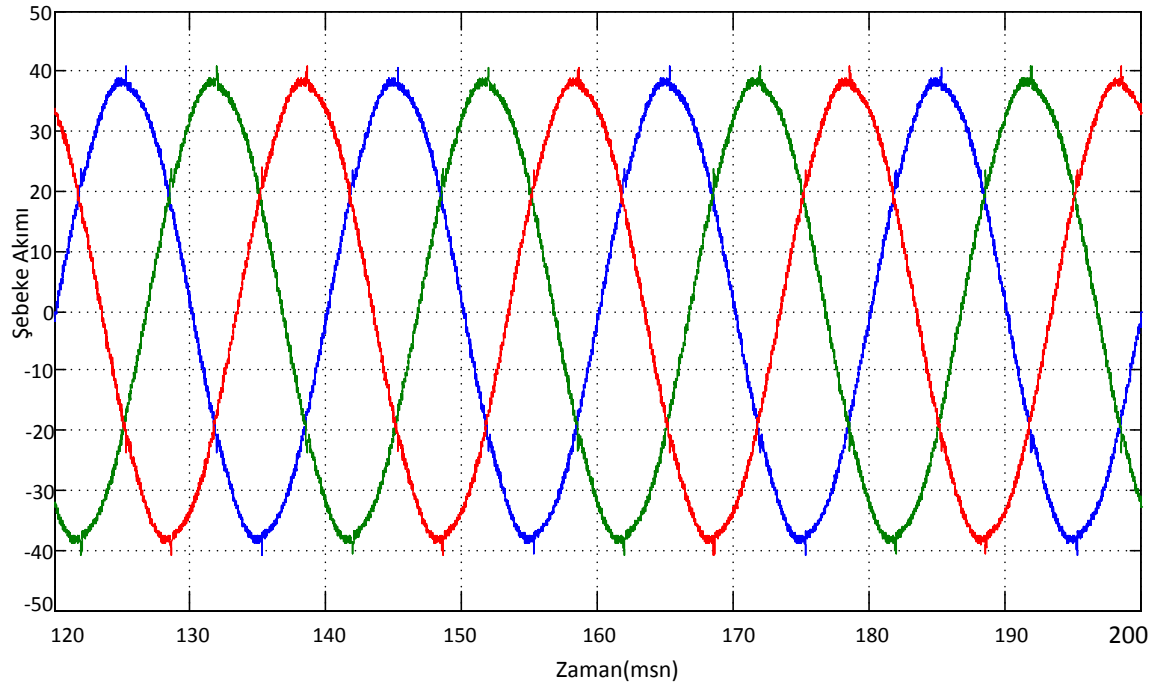
Elde edilen referans akımları fourier dönüşümünde olduğu gibi şebeke harmoniklerini elimine etmek için her faz için aktif filtre akımından çıkarılarak histeresis akım kontrol denetleyiciye yollarılır. Şekil 7.24’te SRYTK algoritmasının Matlab/Simulink bloğu gösterilmiştir.



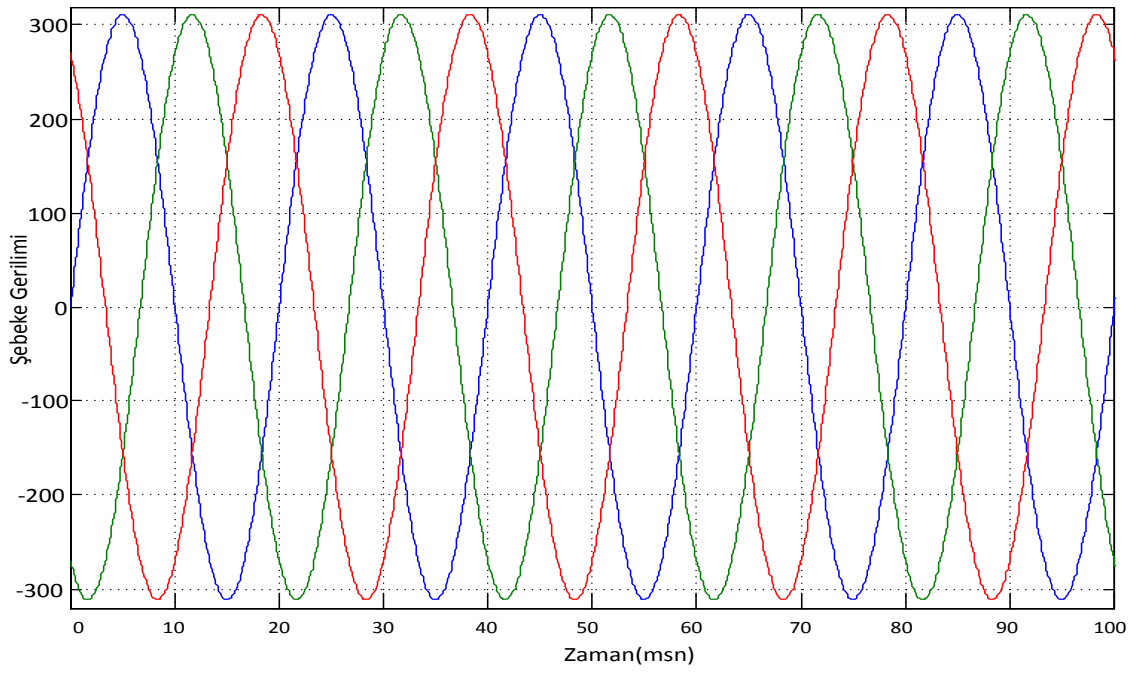
Şekil 7.24. Senkron referans yapı tabanlı kontrol algoritmasının Matlab/Simulink bloğu

7.3.1. Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü Paralel Aktif Filtre Simülasyon Sonuçları

SRYTK algoritmalı PAGF uygulandıktan sonraki sırası ile şebeke akımları, şebeke gerilimleri dalga şekilleri ve düzeltilmiş olan şebeke akımının THD değerleri elde edilmiştir. Şekil 7.25’de SRYTK algoritmalı PAGF bağlandıktan sonraki şebeke akımlarının dalga şekillerini göstermektedir. Şekil 7.26’da ise SRYTK algoritmalı PAGF bağlandıktan sonraki şebeke gerilimindeki dalga şekilleri verilmiştir. Bu dalga şekillerden görüleceği gibi lineer olmayan yük kullanımı ile bozulmuş olan şebeke akımları SRYTK algoritmalı PAGF’nin kullanımı ile oldukça düzelmiştir.

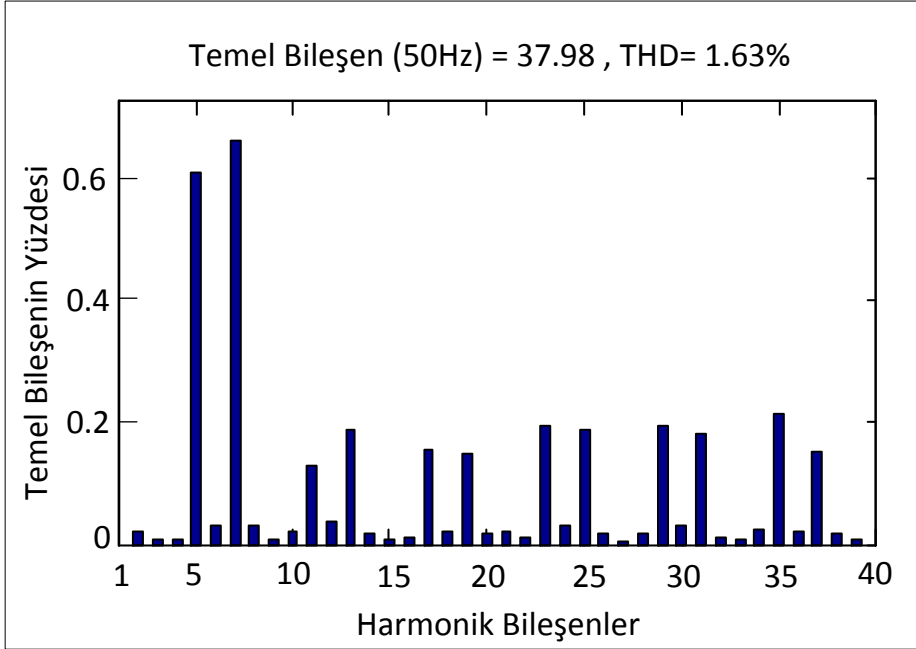


Şekil 7.25. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımları



Şekil 7.26. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke gerilimleri

Şekil 7.27’de ise düzeltilmiş olan şebeke akımının THD değeri verilmektedir. SRYTK algoritmalı PAGF bağlandıktan sonraki bozulmuş olan şebeke akımı değeri % 29.11’den % 1.63’e indirildiği Şekil 7.4 ve Şekil 7.27 ’den görülmektedir.



Şekil 7.27. Senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi bağlandıktan sonraki şebeke akımları THD değeri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde meydana gelen akım harmoniklerinin meydana gelme sebepleri, kaynakları ve sistem üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmıştır. Daha sonra güç sistemlerinde önemli etkiler bırakan bu akım harmoniklerinin filtreleme yöntemleri ve bu filtreleme yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. Son olarak, 3 fazlı 3 telli sistemler için Fourier Analizi Taban Kontrollü ve Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü paralel aktif güç filtresi tasarımı yapılarak uygulama ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Harmonikler üzerine gerçekleştirilen inceleme işlemleri ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- ✓ Harmonikler modern elektroniğin yan ürünü olarak oluşup, günümüzde gittikçe artan bir sorun haline gelmektedir.
- ✓ Harmoniklerin şebekelerde ısınma, hasas elektronik cihazlarda bozulma gibi bir çok etkisi bulunmaktadır.
- ✓ Harmoniklerin etkileri sınırlandırmak zorunlu hale gelmiştir. Bazı standart organizasyonları bu yükler için konu sınırlarına sahiptir. Bunlardan biride IEEE-519 standartlarıdır. Akım için belirlenen THD %5, gerilim için belirlenen THD değeri ise %3 tür.
- ✓ Harmoniklerin elenmesi için çeşitli yollar kullanılmaktadır. Bunların arasındaki en etkili yol aktif güç filtreleridir. Harmonik akım kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı dengeleme ve nötr akım kompanzasyonu gibi akım tipi harmoniklerin elenmesi için paralel aktif güç filtreleri daha uygundur.
- ✓ Gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, gerilim dengelenmesi, gerilim düşmelerinin kaldırılması için seri aktif güç filtreleri daha etkili bir yöntemdir.
- ✓ Harmonik kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, dengesizlik kompanzasyonu, kaynak ve lineer olmayan yük arasındaki izolasyon gibi birleşik sorunlarda hibrit veya birleşik güç kalite düzenleyicileri kullanılabilir. Birleşik güç kalite düzenleyicileri güç sorunları için en iyi çözümü sağlarlar. Fakat bu filtrelerin kontrollerinin kompleks olması ve fiyatlarının yüksek olması gibi dezavantajları vardır. Hibrit filtrelerin uygun fiyatlara sahip olması ve etkili kompanzasyonları sağlamasından ötürü güç kalite artırımı için daha iyi bir seçenek olarak düşünülür.

Gerçekleştirilen 3 fazlı 3 telli sistemler için Fourier Analizi Taban Kontrollü ve Senkron Referans Yapı Taban Kontrollü paralel aktif güç filtresi tasarım simülasyon çalışmalarında ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Fourier analizi taban kontrollü algoritmaya sahip paralel aktif güç filtresi ile lineer olmayan yükün şebekede meydana getirdiği harmonik akımın THD değeri % 29.11'den % 1.69'a indirilmiştir. Böylece çok yüksek harmonik içeren şebeke akımının harmonik özelliği ortadan kaldırılmıştır.
- ✓ Senkron referans yapı taban kontrollü algoritmaya sahip paralel aktif güç filtresi ile harmonik içeren şebeke akımın THD değeri % 29.11'den % 1.63'e indirilmiştir. Böylece Fourier analizi taban kontrollü algoritmaya benzer olarak şebeke var olan harmonikli akımların etkisi elimine edilmiştir.
- ✓ Sabit durumlu ve dengeli 3 fazlı 3 telli sistemlerde senkron referans yapı tabanlı paralel aktif güç filtresi, Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresine göre daha iyi sonuç vermiştir.
- ✓ Elde edilen sonuçlara göre yüksek harmonik içeren akım harmonikleri için hem Senkron referans yapı taban kontrollü algoritmaya sahip paralel aktif güç filtresi ile hem de Fourier analizi taban kontrollü paralel aktif güç filtresi ile standartlarda belirlenen akım harmoniklerin seviyesinin çok altında bir harmonik eliminasyonu gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Akagi, H., 1994. Trends in Active Power Line Conditioners, Power Electronics, IEEE Transactions on, **9**, 263–268.

Akagi, H., 1996. New Trends in Active Filters For Power Conditioning, Industry Applications, IEEE Transactions on, **32**, 1312–1322.

Akagi, H., 2000. Active and Hybrid Filters for Power Conditioning, Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on, Tokyo, TIT, 4-8 Dec 2000, TU26 - TU36 vol.1 (in Japan).

Akagi, H., 2005. Active Harmonic Filters, Proceedings of the IEEE, **93**, 2128–2141.

Aredes, M., Heumann, K. and Watanabe, H.E., 1998. *An Universal Active Power Line Conditioner*, Power Delivery, IEEE Transactions on, **13**, 545–551.

Atan, N., and Hussien, F.Z., 2008. An Improvement of Active Power Filter Control Methods in Non-Sinusoidal Condition, Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International, Bangi, UTN, 1-3 Dec. 2008, 345–350 (in Malaysia).

Başman, F., 2006. Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonikler ve Filtreleme, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Bhattacharya, S., and Divan, D., 1995. Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system, Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE, Madison, WU, 8-12 Oct 1995, 2531-2540.

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

Brod, M.D. and Novotny, W.D., 1985. Current Control of VSI-PWM Inverters, Industry Applications, IEEE Transactions on, **21**, 562–570.

El-Habrouk, M., Darwish, K.M. and Mehta, P., 2000. Active power filters: A review, Electric Power Applications, IEE Proceedings -, **147**, 403– 413.

Filiz, C., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler Ve Filtreleme Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Fujita, H. and Akagi, H., 1998. The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters, Power Electronics, IEEE Transactions on, **13**, 315 – 322.

Fujita, H. and Akagi, H., 1991. A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-Series Connection of Passive and Active Filters, Industry Applications, IEEE Transactions on, **27**, 1020–1025.

Gezegin, C., 2006. Harmonikleri Süzülmesi Ve Tepkin Güç Kompanzasyonu İçin Melez Koşut Etkin Güç Süzgeçleri, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Grady, M.W., Samotyj, J.M. and Noyola, H.A., 1990. Survey of Active Power Line Conditioning Methodologies, Power Delivery, IEEE Transactions on, **5**, 1536–1542.

Henderson, D.R. and Rose, J.P., 1994. Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers, Industry Applications, IEEE Transactions on, **30**, 528–532.

Huang, S.J. and Wu, C.J., 1999. A Control Algorithm for Three-Phase Three-Wired Active Power Filters Under Nonideal Mains Voltages, Power Electronics, IEEE Transactions on, **14**, 753–760.

Jain, S., Agarwal, P. Gupta, O.H. and Agnihotrin, G., 2005. Modeling of Frequency Domain Control of Shunt Active Power Filter using MATLAB Simulink and Power System Blockset, Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on, Roorkee, IIT, 29 Sept 2005, 1124-1129 (in India).

Jou, -L.H., 1995. Performance comparison of the three-phase active-power-filter algorithms, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, **142**, 646–652.

Jou, L.H., Wu, C.J. and Chang, J.Y., 2005. A Novel Active Power Filter for Harmonic Suppression, Power Delivery, IEEE Transactions on, **20**, 1507–1513.

Kale, M., 2004. Paralel Aktif Güç Filtresi ile Harmonik Akım ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Karuppanan, P., Ram, K.S. and Mahapatra, K.-K., 2011. Three Level Hysteresis Current Controller based Active Power Filter for Harmonic Compensation, Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on, Rourkela, NIT, 23-24 Marc 2011, 407 – 412 (in India).

Kesler, M. ve Özdemir, E., 2010. 3-Fazlı 4-Telli Sistemlerde BGKD ile Güç Kalitesinin İyileştirilmesi, **25**, 681-691.

Key, S.T. and Lai, S.J., 1993. Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Systems, Industry Applications, IEEE Transactions on, **29**, 688–695.

Kocatepe, C. Uzunoğlu, M. ve Yumurtacı, R., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Lada, Y.M., Bugis,I. and Talib, N.H.Md.**, 2010. Simulation a Shunt Active Power Filter using MATLAB\Simulink, Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO),2010 4th International, Shah Alam, UTMM, 23-24 June 2010, 371-375 (in Malaysia).
- Li, D., and Tian, J.**, 2008. A Novel Active Power Filter for the Voltage-Source Type Harmonic Source, Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, Wuhan, HUST, 17-20 Oct. 2008, 2077 – 2080 (in China).
- Peng, Z.F., Akagi,H. and Nabae, A.**, 1990. A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, Industry Applications, IEEE Transactions on, **26**, 983–990.
- Peng, Z.F.**, 1998. Application issues of active power filters, Industry Applications Magazine, IEEE, **4**, 21–30.
- Peng, Z.F. and Adams, J.D.**, 2001. Harmonic Sources and Filtering Approaches, Industry Applications Magazine, IEEE, **7**, 18–25.
- Phipps, K.J., Nelson, P.J. and Sen, K.P.**, 1994. Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems, Industry Applications,IEEE Transactions on, **30**, 476–484.
- Prusty, R.S., Ram, K.S. Subudhi, D.B. and Mahapatra, K.K.**, 2011, Performance Analysis of Adaptive Band Hysteresis Current Controller for Shunt Active Power Filter , Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on, Rourkela, NIT, 23-24 March 2011,425–429 (in India).
- Sezer, M.**, 2006. Üç Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Filtre, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A.**, 1998. A New Control Approach to Three-phase Active Filter for Harmonics and Reactive Power Compensation, Power Systems, IEEE Transactions on, **13**, 133–138.
- Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A.**, 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, **46**, 960–971.
- Singh, B., Verma, V. Chandra, A. and Al-Haddad, K.**, 2005. Hybrid filters for power quality improvement, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, **152**, 365–378.
- Subjak, S.J. and McQuilkin, S.J.**, 1990. Harmonics-Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update, Industry Applications, IEEE Transactions on, **26**, 1034–1042.
- Terbobri, G.G., Saidon, F.M. and Khanniche, S.M.**, 2000, Trends of Real Time Controlled Active Power Filters, Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 475), UWS, 18-19 Sep 2000, 410–415 (in UK).

Turunen, J., Salo, M. and Tuusa, H., 0-0-0, Comparison of Series Hybrid Active Power Filters Based on Experimental Tests, Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, Tampere, TUT, 0-0-0, 10 pp. - P.10 (in Finland).

Uçar, M., 2005. 3-Fazlı 4-Telli Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı ve Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

UR1-1, <http://www.alamedaelectric.com/Modicon%20Documents/AC%20Drive%20Power%20System%20Harmonics.pdf>, 10 Kasım 2011.

Wagner, E.V., Balda, C.J. Griffith, C.D. McEachern, A. Barnes, M.T. Hartmann, P.D. Phileggi, J.D. Emmanuel, E.A. Horton, F.W. Reid, E.W. Ferraro, J.R. and Jewell, T.W., 1993. Effects of Harmonics on Equipment, Power Delivery, IEEE Transactions on, **8**, 672–680.

Xia, Y.X., and Han, X., 2006. A Novel Active Power Filter for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation, Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on, Changsha Hunan, CUST, 24-26 May 2006, 1–3 (in China) .

Yıldız, N.Ş., 2006. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Elektrik Enerjisinde Kalitenin Yükseltilmesi , Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

Zhang, S., Li, D. and Wang, X., 2010. Control Techniques for Active Power Filters, Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on, Shenyang, NU, 25-27 June, 3493 – 3498 (in China).

ÖZGEÇMİŞ

Düzgün AKMAZ, 20.11.1985’de Tunceli’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Tunceli’de tamamladı. 2002 yılında Cumhuriyet Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Mustafa Kemal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü 2008 yılında bitirdi. Tunceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak 2009 yılında işe başladı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.