

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ TABANLI AKTİF GÜÇ FİLTRESİ  
TASARIMI VE UYGULAMASI**

**KORHAN KARAARSLAN**

**KOCAELİ 2018**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

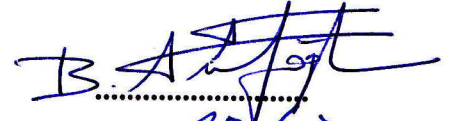
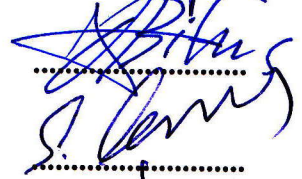
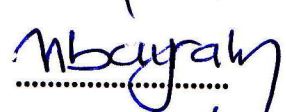

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ TABANLI AKTİF GÜÇ FİLTRESİ**  
**TASARIMI VE UYGULAMASI**

**KORHAN KARAARSLAN**

**Yrd.Doç.Dr. Birol ARİFOĞLU**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ**  
**Jüri Üyesi, İstanbul Kültür Üniversitesi**  
**Yrd.Doç.Dr. Sabri ÇAMUR**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof.Dr. Mehmet BAYRAK**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**  
**Doç.Dr. Ali Bekir YILDIZ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 03.01.2018**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmelere paralel olarak doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması yük profilinin önemli derecede değişmesine ve ciddi güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır. Önemli bir güç kalitesi problemi olan harmonikler, çalışmaların üzerinde yoğunlaştığı bir konu haline gelmiştir. Harmoniklerin filtrenmesinde geleneksel olarak kullanılan pasif filtrelerin yetersizliğinden dolayı aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. Çok seviyeli eviricilerin, avantajlarından dolayı aktif güç filtresi uygulamalarında sıklıkla tercih edildiği yapılan literatür incelemesi sonucunda belirlenmiştir. Bu tezde, literatürde var olan çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici, bir aktif güç filtresi uygulamasında ilk defa kullanılarak harmonik filtreleme yapılmaktadır. Kullanılan eviriciye ait anahtarlama stratejisi yeniden düzenlenerek, önerilen seri ve paralel aktif güç filtresi uygulamalarına ait simülasyon ve deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

Çalışmalarım süresince desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen ve beni yönlendiren tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Birol ARİFOĞLU'na, tezin her aşamasında katkı sağlayan değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Ersoy BEŞER'e, destek ve önerileri ile yardımcı olan Yrd.Doç.Dr. Sabri ÇAMUR'a, tez çalışması esnasında bana yol gösteren değerli hocam Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ'e, tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan değerli eşim Yrd.Doç.Dr. Mehlika ŞENGÜL KARAARSLAN'a, sabır ve desteklerinden ötürü aileme teşekkür ederim.

“Çok Seviyeli Evirici Tabanlı Aktif Filtre Tasarımı ve Uygulaması” adlı doktora tezi 2014/060 nolu Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Protokolü'nde alınan kararla desteklenmiştir.

Aralık – 2017

Korhan KARAARSLAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ .....	1
1. HARMONİKLER .....	11
1.1. Giriş.....	11
1.2. Fourier Serileri ve Fourier Dönüşümü .....	11
1.3. Harmonik Standartları.....	16
1.4. Harmonik Filtreler .....	17
1.4.1. Pasif filtreler .....	17
1.4.2. Aktif güç filtreleri .....	20
2. AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ .....	22
2.1. Aktif Filtrelerin Sınıflandırılması .....	22
2.1.1. Paralel aktif güç filtresi .....	23
2.1.2. Seri aktif güç filtresi.....	23
2.1.3. Hibrit aktif güç filtresi.....	23
2.1.4. Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi (BGKD).....	25
2.2. Aktif Güç Filtresi Yapısı.....	26
2.3. Aktif Güç Filtrelerinde Kullanılan Evirici Topolojileri.....	27
2.3.1. Gerilim/Akım beslemeli eviriciler .....	27
2.3.2. Bir ve üç fazlı eviriciler.....	29
2.3.3. Çok seviyeli eviriciler .....	32
3. TASARLANAN AKTİF GÜÇ FİLTRESİ.....	35
3.1. Tasarlanan Aktif Güç Filtresinde Kullanılan Çok Seviyeli Evirici .....	35
3.1.1. Seviye modülü (SM) .....	35
3.1.2. H-köprü modülü .....	35
3.1.3. Kaskat Bağlı Yarım H-köprü Çok Seviyeli Evirici.....	36
3.2. Seri Aktif Güç Filtresi.....	40
3.3. Paralel Aktif Güç Filtresi .....	48
4. TASARLANAN AKTİF GÜÇ FİLTRESİ HARMONİK FİLTRELEME PERFORMANSININ SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARI.....	55
4.1. Tasarlanan Aktif Güç Filtresi Prototipinin Tanıtılması .....	55
4.1.1. Seviye modülü (SM) .....	58
4.1.2. H-köprü modülü (HM).....	59
4.1.3. Sıfır geçiş algılama devresi .....	60
4.1.4. Kontrol birimi .....	60
4.2. Seri Aktif Güç Filtresi Uygulaması .....	61
4.2.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deney sonuçları .....	63

4.2.1.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması .....	66
4.2.2. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deney sonuçları .....	66
4.2.2.1. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması .....	69
4.3. Paralel Aktif Güç Filtresi Uygulaması.....	69
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	74
KAYNAKLAR .....	78
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	85



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kare dalga Fourier Serileri açılımı a) Temel harmonik, b) İlk 5 harmonik bileşen toplamı, c) İlk 10 harmonik bileşen toplamı, d) İlk 50 harmonik bileşen toplamı .....	14
Şekil 1.2.	Simetrik kare dalganın Fourier dönüşümü a) Simetrik kare dalga, b) AFD dönüşümü .....	16
Şekil 1.3.	Seri filtre ve güç sistemine bağlantısı .....	18
Şekil 1.4.	Paralel filtre ve güç sistemine bağlantısı .....	19
Şekil 1.5.	Pasif filtre çeşitleri .....	20
Şekil 1.6.	Seri aktif güç filtresini oluşturan temel birimler .....	21
Şekil 2.1.	Paralel aktif güç filtresinin prensip şeması .....	23
Şekil 2.2.	Seri aktif güç filtresinin prensip şeması .....	23
Şekil 2.3.	Hibrit aktif güç filtresi: Paralel aktif güç filtresi ve paralel pasif filtrenin birlikte kullanılması .....	24
Şekil 2.4.	Hibrit aktif güç filtresi: Seri aktif güç filtresi ve seri pasif filtrenin birlikte kullanılması .....	24
Şekil 2.5.	Seri aktif güç filtresi ve pasif filtrenin birlikte kullanılması .....	25
Şekil 2.6.	Paralel aktif güç filtresi ve pasif filtrenin birlikte kullanılması .....	25
Şekil 2.7.	UPQC konfigürasyonları .....	26
Şekil 2.8.	Paralel aktif güç filtresi blok şeması .....	26
Şekil 2.9.	Evirici birimi prensip şeması, a) akım kaynaklı evirici, b) gerilim kaynaklı evirici .....	27
Şekil 2.10.	Gerilim kaynaklı evirici tabanlı bir UPQC .....	28
Şekil 2.11.	Akım kaynaklı evirici tabanlı bir UPQC .....	28
Şekil 2.12.	Bir fazlı UPQC: 2 H-köprü konfigürasyonu .....	29
Şekil 2.13.	Bir fazlı UPQC: 3 kollu konfigürasyon .....	29
Şekil 2.14.	Bir fazlı UPQC: Yarım köprü konfigürasyonu .....	30
Şekil 2.15.	Üç faz üç telli evirici topolojisi .....	30
Şekil 2.16.	Üç faz dört telli evirici topolojisi: Ayrık kondansatörlü, 2C .....	31
Şekil 2.17.	Üç faz dört telli topoloji: Dört kollu, 4L BGKD konfigürasyonları .....	31
Şekil 2.18.	Üç faz dört telli topoloji: Üç H-köprülü, 3HB .....	32
Şekil 2.19.	a) Kaskat bağlı çok seviyeli evirici b) Diyot kenetlemeli evirici c) Flying kapasitörlü evirici .....	33
Şekil 3.1.	Seviye modülü prensip şeması .....	35
Şekil 3.2.	H-köprü modülü prensip şeması .....	36
Şekil 3.3.	7-seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü eviricinin prensip şeması .....	36
Şekil 3.4.	Seri aktif güç filtresi prensip şeması .....	41
Şekil 3.5.	Seri AGF'ye ait örnek referans çıkış gerilimi dalga şekli .....	43
Şekil 3.6.	Seri aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici bloğunun tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a) $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=0$ ), b) $V_1 < 0, \sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=-0$ ), c) $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=-V_d$ ), d) $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=V_d$ ), e) $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), f) $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=2V_d$ ), g) $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), h) $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$	

	( $V_{inverter}=3V_d$ ), i) $V_1 < 0, \sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=-V_d$ ), j) $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=V_d$ ), k) $V_1 < 0,$ $\sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), l) $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=2V_d$ ), m) $V_1 < 0, \sum V_h < 0$ ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), n) $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$ ( $V_{inverter}=3V_d$ ) .....	45
Şekil 3.7.	Paralel aktif güç filtresi prensip şeması.....	49
Şekil 3.8.	Örnek referans gerilim sinyalinin zamana göre değişimi.....	50
Şekil 3.9.	Dalga şekillerinin zamana göre değişimi, a)Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 2 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=2$ ), c) Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, d) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=3$ ) .....	51
Şekil 3.10.	Paralel aktif güç filtresi uygulamasında 7-seviyeli evirici biriminin tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a) $V_S > 0, V_F = 0,$ b) $V_S < 0, V_F = 0,$ c) $V_S > 0, V_F = V_d,$ d) $V_S < 0, V_F = -V_d,$ e) $V_S > 0, V_F = 2V_d,$ f) $V_S < 0, V_F = -2V_d,$ g) $V_S > 0, V_F = 3V_d,$ h) $V_S < 0, V_F = -3V_d$ .....	53
Şekil 4.1.	Tasarlanan çok seviyeli eviriciye ait prensip devre şeması.....	56
Şekil 4.2.	Tasarlanan çok seviyeli eviricinin güç katı devresi ile işlemci- IGBT sürücü devreleri arayüzüne ait baskı devre şemaları .....	57
Şekil 4.3.	Tasarlanan evirici birimi prototipinin fotoğrafı .....	58
Şekil 4.4.	CM150DY-24A IGBT modülü ve devre şeması.....	58
Şekil 4.5.	CONCEPT sürücü kartı ve sürücü modül fotoğrafı .....	59
Şekil 4.6.	IGBT sürücü ile üretilen kapı sinyalleri .....	59
Şekil 4.7.	Sıfır geçiş algılama devresi (ZCD).....	60
Şekil 4.8.	dsPIC30F6010 için tasarlanan baskı devre .....	61
Şekil 4.9.	Seri aktif güç filtresi uygulaması için hazırlanan deneysel sisteme ait şematik diyagram .....	62
Şekil 4.10.	Seri aktif güç filtresi uygulaması için geliştirilen kontrol algoritması blok diyagramı.....	63
Şekil 4.11.	Yük gerilimi (PCC gerilimi) ve harmonik gerilimlerinin toplamına ait dalga şekilleri, simülasyon (50 V/div, 2.5 ms/div) .....	64
Şekil 4.12.	Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, simülasyon, a) $n=7,$ b) $n=15,$ c) $n=31,$ (50 V/div, 2.5 ms/div) .....	64
Şekil 4.13.	Yük gerilimine (PCC gerilimi) ait dalga şekli, deneysel (50 V/div, 2.5 ms/div).....	65
Şekil 4.14.	Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, deneysel, a) $n=7,$ b) $n=15,$ c) $n=31,$ (50 V/div, 2.5 ms/div) .....	65
Şekil 4.15.	Yük gerilimi (PCC gerilimi) ve harmonik gerilimlerinin toplamına ait dalga şekilleri, simülasyon (50 V/div, 2.5 ms/div) .....	67
Şekil 4.16.	Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, simülasyon, a) 7-seviyeli evirici kullanıldığında, b) 15-seviyeli evirici kullanıldığında, c) 31-seviyeli evirici kullanıldığında, (50 V/div, 2.5 ms/div).....	67
Şekil 4.17.	Yük gerilimine (PCC gerilimi) ait dalga şekli, deneysel (50 V/div, 2.5 ms/div).....	68

Şekil 4.18. Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, deneysel, a) 7-seviyeli evirici kullanıldığında, b) 15-seviyeli evirici kullanıldığında, c) 31-seviyeli evirici kullanıldığında, (50 V/div, 2.5 ms/div).....	68
Şekil 4.19. Paralel aktif güç filtresi simülasyon sonuçları a) referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 2 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı .....	70
Şekil 4.20. Paralel aktif güç filtresi simülasyon sonuçları a) referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı .....	70
Şekil 4.21. İki seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri .....	71
Şekil 4.22. Dört seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri .....	72



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Bazı periyodik fonksiyon ve Fourier Serileri açılımları.....	13
Tablo 3.1. Çıkış gerilimi seviye sayısı ve anahtarlama elemanı sayısının seri bağlı seviye modüllerine göre değişimi.....	38
Tablo 3.2. Seviyeli sayısı (n) olan çok seviyeli eviricilerin karşılaştırılması.....	39
Tablo 3.3. Seviyeli modülü sayısı (m) olan çok seviyeli eviricilerin karşılaştırılması .....	40
Tablo 3.4. Anahtarlama durumlarına göre oluşan çıkış gerilimi seviyeleri .....	44
Tablo 4.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deneysel çalışma sonucu elde edilen yük gerilimi THB değerleri .....	66
Tablo 4.2. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deneysel çalışma sonucu elde edilen yük gerilimi THB değerleri .....	69

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$h$	: Harmonik mertebesi, (1,2,3,...)
$t$	: Zaman, (s)
$\omega$	: Açısal hız, (rad)
$A_0$	: Sabit terim (Doğru bileşen veya ortalama değer)
$A_h, B_h$	: $f(t)$ fonksiyonunun harmonik bileşen katsayıları
$C_h$	: $f(t)$ fonksiyonunun $h$ . harmonik katsayısı
$\phi_h$	: $f(t)$ fonksiyonunun $h$ . harmoniğinin faz açısı
$N$	: Örnek sayısı
$\Delta\omega$	: Örnek alma adımı
$V_{Et}$	: Çıkış geriliminin etkin değeri, (Volt)
$V_{1Et}$	: Çıkış geriliminin 1. harmoniğinin etkin değeri, (Volt)
$n$	: Çıkış gerilimi seviye sayısı
$m$	: Seviye modülü sayısı
$r$	: Anahtarlama elemanı sayısı
$V_d$	: Birinci seviye modülü gerilimi ( temel seviye gerilimi), (Volt)
$V_{max}$	: Çıkış gerilimi maksimum değeri, (Volt)
$V_{PCC}$	: Ortak bağlantı noktası gerilim değeri
$V_{hPCC}$	: $V_{PCC}$ gerilimindeki harmonik bileşenlerin toplamı
$V_{ref}$	: Referans gerilim değeri, (Volt)
$\Delta t$	: Tarama hızı
$t_{max}$	: Maksimum tarama hızı, (s)
$t_{sample}$	: Örnekleme zamanı, (s)
$f_f$	: Temel frekans değeri, (Hertz)
$S, Q$	: Tetikleme sinyalleri
$I_y$	: Yük akımı, (Amper)
$I_{\text{ş}}$	: Şebeke akımı, (Amper)
$I_f$	: Filtre akımı, (Amper)
$V_{dc}$	: Gerilime ait doğru bileşen, (Volt)
$V_s$	: Sinüzoidal kaynak gerilim değeri, (Volt)
$V_F$	: Filtre çıkış gerilimi, (Volt)
$R_s$	: Sinüzoidal kaynağa seri bağlı direnç değeri, (Ohm)

## Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
AFD	: Ayrık Fourier Dönüşümü
AGF	: Aktif Güç Filtresi
DA	: Doğru Akım
DGA	: Darbe Genişlik Ayarlı
HM	: H-Köprü Modülü

IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineering (Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü)
PCC	: Point of Common Coupling ( Ortak Bağlantı Noktası)
SM	: Seviye Modülü
SVC	: Statik VAR Kompanzatör
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozunumu)
UPQC	: Unified Power Quality Conditioner (Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi)
ZCD	: Zero Crossing Detector (Sıfır Geçiş Algılayıcı)



## ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ TABANLI AKTİF GÜÇ FİLTRESİ TASARIMI VE UYGULAMASI

### ÖZET

Bu tez çalışmasında öncelikle literatürde var olan aktif güç filtresi uygulamaları hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelemeler neticesinde birçok avantajlarından dolayı ön plana çıkan çok seviyeli eviricilerin aktif güç filtresi uygulamalarında tercih edildiği görülmüştür. Bu noktadan yola çıkarak, çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici yapısı harmonik filtreleme amacıyla aktif güç filtresi uygulamasında ilk defa kullanılmıştır. Bu evirici yapısı, anahtarlama elemanı sayısı bakımından literatürde aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılan diğer çok seviyeli eviriciler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda avantajları ortaya koyulan evirici için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Farklı harmonik bozunuma sahip yük durumları için yapılan simülasyonlarda seri ve paralel aktif güç filtresi uygulamaları ile akım ve gerilim harmonikleri filtrelenmiştir. Evirici çıkış gerilimi seviye sayısının farklı olduğu durumlar için simülasyonlar tekrarlanmıştır. Simülasyonlardan sonra, bir aktif güç filtresi evirici birimi prototipi imal edilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla simülasyonu gerçekleştirilen tüm durumlar pratik olarak tekrarlanmıştır.

Çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici yapısına ait anahtarlama sinyallerini elde etmek amacıyla yeni bir anahtarlama stratejisi geliştirilmiştir. Bu strateji geliştirilen formüller yardımıyla matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici tabanlı aktif güç filtresi uygulamaları için yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalarda toplam harmonik bozunum değerinin seviye modülü sayısına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca, anahtarlama elemanı sayısı, anahtarlama frekansı, verim, kontrol kolaylığı ve çıkış filtresi gereksinimi gibi konular dikkate alındığında önerilen aktif güç filtresinin avantajlarının olduğu yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar ile ispatlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif Güç Filtreleri, Çok Seviyeli Eviriciler, Harmonik Bozunum.

## **DESIGN AND APPLICATION OF MULTILEVEL INVERTER BASED ACTIVE POWER FILTER**

### **ABSTRACT**

In this thesis, existing studies about active power filtering in the literature are examined. It is observed that multilevel inverters, which come to foreground due to their many advantages are often preferred in active power filter applications. In this thesis, half-bridge cascaded multilevel inverter topology is used for the first time in active power filtering for harmonic compensation. This inverter topology is compared with other multilevel inverters used in active power filter applications in the literature in terms of the number of switching elements. Simulation studies are carried out for the inverter, which is advantageous in comparison. Current and voltage harmonics are filtered through series and parallel active power filter applications in simulations for loading conditions with different harmonic distortion. Simulations are repeated in cases where the number of inverter output voltages is different. After the simulations, an active power filter inverter unit is realized. In order to make comparisons, all simulated cases are practically repeated.

A new switching strategy is developed to obtain switching signals for the half-bridge cascaded multilevel inverter. This strategy is expressed mathematically through developed formulas.

It is observed that the total harmonic distortion decreases with the number of level modules in simulations and experimental studies for the half-bridge cascaded multilevel inverter based active power filter applications. Furthermore, it is proven by simulations and experimental studies that the proposed active power filter has advantages in terms of the number of switching elements, switching frequency, efficiency, ease of control and output filter requirement.

**Keywords:** Active Power Filters, Multilevel Inverters, Harmonic Distortion.

## GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan talebin sürekli olarak artış göstermesi, bu enerjinin günümüzde yaşamımızın önemli bir parçası haline gelmesine neden olmuştur. Öyle ki, kişi başına tüketilen enerji miktarı ülkelerin gelişmişlik düzeyinin bir göstergesi olarak görülmektedir. Elektrik enerjisi talebindeki bu artış, elektrik mühendisliğinde “güç kalitesi” adıyla anılan daha güvenilir ve kaliteli bir enerji kavramını ortaya çıkarmıştır.

Elektrik enerjisinin iletiminden dağıtımına kadar her aşamasında güç kalitesini etkileyecek parametrelerin göz önünde bulundurulmaları gerekmektedir. Doğrusal olmayan karakteristiğe sahip elemanların meydana getirdiği harmonikler, önemli güç kalitesi parametrelerinden biridir.

Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler anahtarlamalı güç kaynakları, ark ve pota ocakları, motor sürücüleri, doğrultucular ve DA/DA dönüştürücüler gibi doğrusal olmayan birçok yükün kullanımını artırmıştır. Bu yüklerin kullanımındaki artış, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesi problemlerinin artmasına bağlı olarak elektrik enerjisi kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artışına paralel olarak değişen yük profili, önemli bir güç kalitesi parametresi olan akım ve gerilim harmoniklerini daha ciddi bir problem ve bu alanda çalışmaların yoğunlaştığı önemli bir konu başlığı haline getirmiştir.

Güç kalitesi problemlerinin giderek artmasına ek olarak, klasik bir çözüm olan pasif filtrelerin çok yer kaplamaları, sadece belirlenen harmonik bileşen için filtreleme imkanı sunmaları, yük değişimlerine cevap verememeleri, güç kayıplarının fazla olması, performanslarının şebeke empedansına bağlı olması ve en önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturmaları harmoniklerden kaynaklı problemlerin giderilmesinde aktif güç filtrelerine olan ilgiyi arttırmıştır.

Harmoniklerin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, rezonansların bastırılması ve gerilim regülasyonu gibi birçok problemin çözümünde uygulama imkanı bulan aktif güç filtreleri, örneklenen yük akım ve/veya gerilim dalga şekillerinden bir takım

kontrol teknikleriyle üretilen referans akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin kontrollü yarı-iletken güç anahtarları yardımı ile üretilmesi ve sisteme enjekte edilmesi prensibine göre çalışmaktadır [1]. Bu çalışma prensibine dayanarak aktif güç filtrelerinin harmonik belirleme, kontrol ve evirici birimi olmak üzere üç ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Genellikle, harmonik belirleme birimi ile kontrol birimi bir arada tanımlanmaktadır.

Literatürde yer alan aktif güç filtresi çalışmaları detaylı incelendiğinde, çalışmaların yukarıda bahsedilen aktif güç filtresini oluşturan birimler etrafında yoğunlaştığı görülmüştür. İncelenen çalışmaların bir kısmı, harmonik belirleme biriminde kullanılan farklı harmonik belirleme algoritmaları ile referans sinyalin oluşturulmasını konu almıştır. Harmonik belirleme birimi çıkışında elde edilen referansa ait tetikleme sinyallerinin elde edilmesini sağlayan ve farklı kontrol tekniklerinin uygulandığı kontrol birimi ise araştırmaların yoğunlaştığı bir diğer konu başlığıdır. Bir kısım çalışmalarda ise farklı topolojilere sahip aktif güç filtresi evirici birimlerinin, araştırmaların odak noktasını oluşturduğu görülmüştür.

Bu bağlamda, yarı-iletken güç anahtarları sayısı azaltılarak uygulanan kontrol yönteminin karmaşıklığını ortadan kaldırmaya yönelik farklı evirici birimlerine sahip birçok aktif güç filtresi uygulaması yapılmıştır [2]. Anahtarlama frekansı, yarı-iletken güç anahtarları üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresi, verim, elektromanyetik etkileşim, harmonik bozunum ve çıkış filtresi gerekliliği gibi birçok özellik de dikkate alındığında çok seviyeli evirici topolojilerinin aktif güç filtresi uygulamalarında sıklıkla tercih edildiği görülmüştür [3-5]. Literatürde diyot kenetlemeli ve flying kapasitörlü çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtrelerini konu alan çalışmalar bulunmasına karşın [6,7], aktif güç filtresi uygulamalarında en sık karşılaşılan topolojinin çok seviyeli kaskat bağlı H-köprü evirici olduğu belirlenmiştir. Bu evirici topolojisinin aktif güç filtresi çalışmalarında tercih edilmesinin nedenleri arasında yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalara elverişli olması, yarı-iletken güç anahtarları üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresinin az olması ve çıkış gerilimi toplam harmonik bozunumu (THB) değerinin düşük olması sayılabilir [8-11].

Aktif güç filtrelerinde kullanılan harmonik belirleme yöntemleri, kontrol teknikleri ve evirici topolojilerini konu alan literatür çalışmalarına aşağıda yer verilmiştir.

[6]'da 6,6 kV'luk bir motor sürücü devresinin önünde kullanılan üç fazlı tam dalga doğrultucunun yaratmış olduğu harmonik akımların hibrit bir aktif güç filtresi ile kompanzasyonu önerilmiştir. Aktif güç filtresinde kullanılan evirici topolojisi üç-seviyeli diyot kenetlemeli eviricidir. Aktif güç filtresine ait gerekli kompanzasyon gücü kullanılan pasif filtre ile düşürülmüştür. Bu sayede, aktif güç filtresi maliyeti azaltılmış ve uygulamanın daha ekonomik olması sağlanmıştır.

[12]'de bir fazlı, 5-seviyeli, gerilim kaynaklı evirici tabanlı bir paralel aktif güç filtresi kullanılarak harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Ayrıca, doğru akım (DA) barasının gerilim regülasyonunu sağlayan bir çalışma sunulmuştur. Diyot kenetlemeli eviricilerde 5-seviye elde edebilmek için 8 yarı-iletken güç anahtarına ihtiyaç varken önerilen yapı ile anahtar sayısı 6'ya indirilmiştir. Aynı zamanda kenetleme diyotlarına da ihtiyaç bulunmadığı belirtilmiştir.

[13]'te üç fazlı, 5-seviyeli diyot kenetlemeli aktif güç filtre uygulamasında reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme amacıyla dolaylı akım kontrol tekniği ve kestirimci akım kontrol tekniği olmak üzere iki farklı kontrol tekniği sunulmuştur.

[14]'te üç seviyeli, nötr noktası-kenetlemeli, gerilim kaynaklı evirici tabanlı aktif güç filtresinde DA uzay vektör kontrolü uygulaması anlatılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi, referans kompanzasyon akımını, DA barası geriliminin kontrolünü gerçekleştirerek dolaylı olarak üretmektedir. Aktif güç filtreleri, anahtarlama olayı sonucu yüksek frekanslı harmonik akım bileşenlerine neden olmaktadır. Bu akımların diğer yükleri etkilemesini önlemek için tipik olarak evirici ile kaynak arasına endüktans yerleştirilmektedir. Bu çalışmada ise, anahtarlama frekansı çevresindeki harmonik akımları azaltmak amacıyla ikinci dereceden LCL filtre uygulaması kullanılmıştır.

[7]'te doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik akımların dengeli ve dengesiz yük durumlarında flying kapasitörlü gerilim kaynaklı evirici tabanlı bir aktif güç filtresi ile kompanze edilmesi anlatılmıştır. Güç anahtarları üzerindeki gerilim stresini azaltmak amacıyla 3-seviyeli bir evirici kullanılmıştır. Harmonik filtreleme, reaktif güç kompanzasyonu ve DA barası gerilim kontrolünü gerçekleştirebilmek için iki farklı kontrol çevrimi anlatılmıştır.



[15]'te 27-seviyeli bir evirici kullanılarak aktif güç filtresi ve aktif güç üretme kapasitesine sahip Statik VAR Kompanzator (SVC) uygulaması sunulmuştur. Eviricide doğru gerilim kaynağı olarak kondansatör yerine fotovoltaik hücreler kullanılarak aktif güç üretme ve uzun süreli kesintilerde yükü besleme imkanı yaratılmıştır. Evirici, her fazda üç adet olmak üzere H-köprü modüllerden oluşmuştur ve bu modüller dönüştürme oranları için katları olan transformatörler üzerinden şebekeye bağlanmış durumdadır.

[16]'da üç fazlı, 4-seviyeli flying kapasitörlü evirici için doğrudan kestirimci kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen çalışmada, kondansatör gerilimlerinin dengelenmesi modülasyon tekniği kullanılmadan çevrimdışı hesaplanan tablolar aracılığı ile yapılmıştır. Böylelikle akım kontrollü eviricide düşük anahtarlama frekanslarında çalışma ve düşük gerilim stresleri elde edilmiştir. Ayrıca, düşük frekanslarda çalışan aktif güç filtresinde ara harmoniklerin üretilmediği belirtilmiştir.

[17]'de 9-seviyeli kaskat bağlı hibrit bir aktif güç filtresi uygulaması anlatılmıştır. Son yıllarda, uygulamalarına sıkça rastlanılan çok seviyeli eviricilerde kullanılan kaskat bağlı H-köprü topolojisinde transformatörlerin dönüştürme oranları 3'ün katları şeklinde seçilerek kaynak ve yarı-iletken eleman sayısı azalmıştır. Bu sayede, H-köprü düşük frekanslarda çalıştırılmış, anahtarlama kayıpları azaltılmış ve daha yavaş yarı-iletken elemanların kullanımına imkan yaratılmıştır. Her 9-seviyeli aktif güç filtresi aynı DA barası kondansatörüne bağlı iki H-köprüden oluşmuştur. H-köprüler, alternatif akım barasına bağımsız ve dönüştürme oranları için katları olan transformatörler üzerinden bağlanmıştır. H-köprü sayısı, (n) ile ifade edilerek çıkış geriliminde  $3^n$  seviye oluşturulmuştur. Dönüştürme oranı 3 olan H-köprüye ana konverter, 1 olana ise yardımcı konverter denilmiştir.

[18]'de yüksek di/dt çalışma şartları altında örnekleme ve hesaplama gecikmelerinden olumsuz etkilenen klasik PI akım kontrolörünün dezavantajlarının, dead-beat kontrol algoritması temel alınarak ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Kontrol sistemi gecikme zamanı, modifiye edilmiş Smith kestirimcisi kullanılarak kompanze edilmiştir. Aktif güç filtresinde evirici olarak Darbe Genişlik Ayarlı (DGA) evirici kullanılmıştır.

[19]'da 9-seviyeli asimetrik kaskat bağı eviricinin harmonik akımların giderilmesi amacıyla aktif güç filtresi uygulamasında kullanılması durumunda bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Çok seviyeli asimetrik eviricilerin, simetrik eviricilere göre temel bir avantajı bulunmaktadır. Aynı eleman sayısına sahip simetrik eviricilere göre, asimetrik eviriciler çıkış gerilim seviyesinin daha fazla olmasını sağlamaktadır. Ancak, kullanılan asimetrik doğru gerilim kaynakları beraberinde denetimi de zorlaştırmakta veya hücrelerin farklı anahtarlama frekanslarında çalışması gerekliliğini doğurmaktadır. Çalışmada kullanılan evirici, farklı doğru gerilim seviyesine sahip iki adet H-köprü modülden oluşmuştur. Modüllerin DA tarafındaki bara gerilimleri oranlarının 1:3 olarak belirlenmesi ile 5-seviyeli bir çıkış yerine 9-seviyeli bir çıkış gerilimi dalga şekli elde edilmiştir.

[20]'de bir fazlı hücrelerden oluşan çok seviyeli üç fazlı birleşik güç kalitesi düzenleyicisi (Unified Power Quality Conditioner - UPQC) için geliştirilen ayrık zamanlı lineer kontrol yöntemi anlatılmıştır. Kontrolörün parametrelerini seçmek amacıyla klasik bir yaklaşım olan köklerin yer eğrisi yöntemi kullanılmıştır. UPQC'yi oluşturan seri aktif güç filtresinin çalışmasını sınırlandıran elektriksel değişken, transformatör dönüştürme oranına bağlı olan toplam akım olarak belirtilmiştir. Aynı şekilde, paralel aktif güç filtresinde ise yarı-iletken elemanların yük gerilimine maruz kaldığı ifade edilmiştir. Önerilen konfigürasyon ile bu sınırlandırmalar çok sayıda güç hücresi kullanılarak ortadan kaldırılmıştır.

[21]'de diyot kenetlemeli modüler çok seviyeli evirici topolojisi önerilmiştir. Önerilen topoloji, yarım-köprü hücrelerin kaskat bağlantısına dayanmaktadır. Her hücrenin doğru gerilim barasına bir kenetleme diyodu eklenerek hücrenin kondansatör gerilimi, komşu iki hücre ile kenetlenebilmiştir. Aynı zamanda, önerilen enerji geri-besleme devresi kapalı bir kenetleme devresi oluşturacak şekilde alt ve üst hücrelerin bağlanması için kullanılmıştır. Önerilen topolojide, gerekli sensör sayısı önemli derecede azaltılmıştır.

[22]'de üç fazlı, transformatörsüz bir aktif güç fitresi önerilmiştir. Üç fazlı doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik akımların kompanzasyonu için geliştirilen konfigürasyon asimetrik kaskat H-köprü modüllerden oluşturulmuştur. Herhangi bir yardımcı devre kullanmadan modüllerdeki doğru gerilim oranını kontrol edebilmek

için temel, üçüncü ve beşinci harmonik sıfır-dizi bileşen akımlarının enjeksiyonuna dayalı yeni bir kontrol stratejisine değinilmiştir. Önerilen yapı ve kontrol stratejisi ile dengesiz üç fazlı doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir.

[23]'te mevcut harmonik belirleme yöntemlerinde uzun gecikme zamanı ve şebeke frekansı değişimlerine karşı hassasiyetlerin bulunduğu belirtilmiştir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla çalışmada, PLL tabanlı seçici harmonik belirleme yöntemi anlatılmıştır. İdeal bir harmonik belirleme yöntemi harmoniklerin genlik, frekans, faz açısı ve oluşum zamanı gibi karakteristik değerlerini hızlı ve doğru bir şekilde belirleyebilmelidir. Ayrıca, çalışma koşullarının değişimi, yöntemin uygulanması, işlem kapasitesi ve veri depolama gibi konular da dikkate alınmalıdır. Önerilen yöntem, DGA evirici tabanlı paralel aktif güç filtresi uygulamasında kullanılmıştır.

[24]'te sinüzoidal olmayan gerilim durumunda üç faz üç telli paralel aktif güç filtresi ile harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunun yapıldığı bir çalışma sunulmuştur. Referans kompanzasyon akımını hesaplamak için p-q teorisi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca, referans akımın hesaplanması ele alınarak kompanze edilecek güce dayalı ve kompanzasyondan sonra istenen kaynak akımına dayalı olmak üzere iki farklı hedef için gerekli denklemler belirtilmiştir. Daha sonra, referans akımın hesaplanması sinüzoidal olmayan gerilim durumlarında incelenmiştir.

[25]'te kaskat H-köprü çok seviyeli eviriciler, orta gerilim sürücülerinde THB'yi azaltmak amacıyla alternatif bir çözüm yöntemi olarak gösterilmiştir. Ancak, her H-köprü için izole güç kaynaklarına olan ihtiyaç kaskat H-köprü eviricilerin bir problemidir. Bunu aşmak amacıyla asimetrik yapı ile aynı seviye için daha az izole kaynak ihtiyacı yaratılabilmektedir. Bu çalışmada, seri aktif güç filtresi olarak kullanılan yardımcı H-köprüler ile yüksek frekans bağlantısı (toroid) yardımıyla tek bir güç kaynağı yeterli olmuştur. Tüm çıkış gerilimleri için seviye sayısının sabit kalması amacıyla motor gerilimini sabit tutabilecek değişken bir DA kaynağı gerektiği belirtilmiştir. 2 kW'lık 27-seviyeli asimetrik kaskat H-köprü evirici 23-seviyeli olarak çalıştırılmıştır.

[26]'da üç fazlı paralel aktif güç filtresi uygulamasında referans akım sinyalinin elde edilmesi için kullanılan kontrol stratejileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan tüm

stratejiler dengeli ve sinüzoidal gerilim durumunda harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilmektedir. Ancak, dengesiz ve harmonikli gerilim durumunda bu stratejilerin yetersiz kaldığı durumlar ortaya konmuştur.

[27]'de üç fazlı sistemlerde dengesiz ve sinüzoidal olmayan kaynak gerilimi durumu için geliştirilen bir kontrol algoritması tanıtılmıştır. Geliştirilen bu algoritma ile güç faktörünün 1 olması sağlanmış aynı zamanda THB akım limit değerlerinin altında bir kompanzasyon yapılmıştır.

[28]'de anlık reaktif güç teorisi ele alınmıştır. Bu strateji, üç faz 4 telli sistemlerde kompanzasyon amacıyla uygulanmıştır. Ek olarak, faz koordinat sisteminde eşdeğer bir formül geliştirilmiştir. Sonuç olarak, bu formül ile anlık reaktif güç teorisi aynı sonuçları vermesine rağmen geliştirilen formülün basit ve sade olması herhangi bir kaynak durumunda kullanımını kolaylaştırmıştır.

[29]'da üç faz 3 telli sistemlerde seri aktif güç filtresi için yeni bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Önerilen kontrol algoritması p-q teorisine dayanmaktadır. Referans sinyalin direkt olarak elde edilmesi önerilen kontrol algoritmasının diğer kontrol algoritmalarından daha basit bir yapıda olmasını sağlamıştır.

[30]'da hibrit aktif güç filtresi uygulaması için yeni bir kontrol stratejisi tanıtılmıştır. Hibrit filtre, seri aktif güç filtresi ve paralel pasif filtreden oluşmaktadır. Geliştirilen kontrol algoritması ile reaktif güç kompanzasyonu ve asimetrik yük durumunda harmonik filtreleme yapılabilir. Bu strateji pasif filtre kompanzasyon karakteristiğini sistem empedansına bağlı kalmadan iyileştirebilmektedir ve böylelikle rezonans problemlerinin önüne geçilmiştir.

[31]'de sistem güvenilirliğini ve evirici kapasitesini azaltmak amacıyla kontrol edilebilir harmonik empedansa dayalı yeni bir seri hibrit aktif güç filtresi önerilmiştir. Kullanılan seri transformatörün primer sargılarının temel bileşen hariç diğer frekanslardaki bileşenlere yüksek empedans göstermesiyle bu bileşenler pasif filtre üzerinden geçmeye zorlanmıştır.

[32]'de seri hibrit aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılan üç farklı kontrol stratejisi teorik olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, durum model denklemleri çıkartılmıştır. Bu stratejiler; kaynak akımı belirleme, yük gerilimi belirleme ve her iki stratejinin birleştirildiği akım ve gerilim belirleme algoritmalarıdır. Durum denklemleri çıkarılan aktif filtrenin dinamik analizleri yapılabilmektedir. Böylelikle, kontrol için bir dizayn kılavuzu oluşturulabilmektedir.

[33]'te üç faz gerilimleri gücün farklı bileşenlerini gösterecek şekilde vektörlere ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırma sayesinde elde edilen formüller, seri hibrit aktif güç filtresi referans geriliminin kolaylıkla elde edilmesini sağlamıştır.

[34]'te üç fazlı 5-seviyeli kaskat bir evirici, paralel aktif güç filtresi olarak kullanılmıştır. 2-seviyeli bir evirici için kullanılan kondansatör gerilim kontrol tekniği harmonik belirleme yöntemi olarak tercih edilmiştir. Kaynak akımını temel alan kestirimci bir akım kontrol tekniği uygulanmıştır. Modülasyon tekniği olarak ise iki farklı uzay vektör modülasyon tekniği kullanılmıştır. Kullanılan çok seviyeli evirici, H-köprü modüllerden oluşmaktadır ve her modüldeki doğru akım kaynağının değeri eşit olarak seçilmiştir.

[35]'te kaskat H-köprü çok seviyeli evirici tabanlı seri aktif güç filtresi ile güç kalitesi iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Senkron referans çerçeve teorisi tabanlı bir kontrol stratejisi ile aktif filtre tarafından enjekte edilen gerilim sayesinde gerilim çökmesi, kaynak gerilimi dengesizliği ve harmonik filtreleme yapılmıştır. Her fazda 2 adet H-köprü evirici kullanılarak çıkışta 5 seviyeli bir gerilim dalga şekli elde edilmiştir.

[36]'da birbirlerine seri bağlı gerilim kaynaklı H-köprü eviricilerden meydana gelen asimetrik çok seviyeli bir evirici oluşturulmuştur. Bu çalışmada, aktif güç filtresi pasif bir filtre ile beraber kullanılarak bir hibrit güç filtresi oluşturulmuştur. H-köprü eviricilerde gerilim kaynaklarının değeri ikilik sisteme göre belirlendiğinden çıkışta simetrik eviricilere göre daha fazla seviye elde edilebilmiştir.

[37]'de asimetrik kaskat çok seviyeli evirici tabanlı paralel aktif güç filtresi önerilmiştir. H-köprü modüllerindeki kondansatör gerilimleri 1, 2 ve 6 oranlarında seçilerek çıkışta 9 seviye elde edilmiştir. Yüksek anahtarlama frekansı, sadece küçük gerilimli modülde gerçekleştirilmiştir.

[38]'de H-köprü modüllerden oluşan çok seviyeli eviricide ilk seviye modülünde bir kondansatör, diğer seviye modüllerinde ise gerilim kaynağı kullanılmıştır. Uygun bir kontrol yöntemi kullanılarak ilk modüldeki kondansatör geriliminin sabit tutulması sağlanmıştır. 15-seviyeli evirici üzerinde deney ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

[39]'da simetrik kaskat çok seviyeli eviriciler aktif güç filtresi ve reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında kullanılabilir. Bu durumlarda, doğru gerilim kaynaklarına ihtiyaç yoktur ancak kondansatör gerilimleri kontrol edilmelidir. Bu çalışmada, kondansatör gerilimlerini kontrol etmek amacıyla bir modülasyon tekniği önerilmiştir.

[40]'da anahtarlama elemanı azaltılmış bir fazlı 5-seviyeli yeni bir evirici topolojisi tanıtılmıştır. Anahtarlama için bir fonksiyon geliştirilmiş ve yük akımını sinüzoidal yapmak için bir harmonik filtre gibi çalıştırılmıştır.

Çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtreleri için yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen kazanımlardan yola çıkarak literatüre farklı bir bakış açısı ile katkıda bulunabilmek amacıyla geliştirilen doktora tez çalışmasının amacı;

- i. Literatürde aktif güç filtrelerini konu alan çalışmalarda kullanılan çok seviyeli evirici yapılarına bir yenisini ekleyerek anahtarlama elemanı sayısı, verim, anahtarlama frekansı ve çıkış filtre gereksinimi gibi konularda diğer çok seviyeli evirici topolojilerine göre avantaj sağlamak ve bu sayede literatüre katkıda bulunmak,
- ii. Reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, vb. problemlerin giderilmesi için ileride yapılması planlanan çalışmalara alt yapı oluşturmak.

Bu amaçla, tezin giriş bölümünde konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve tezin amacına yer verilmiştir.

Birinci bölümde, harmonikler, Fourier dönüşümleri ve harmonik standartlarına değinilmiş ve toplam harmonik bozunumunun tanımı yapılmıştır. Ayrıca, harmonik filtreleme amacıyla kullanılan pasif filtreler anlatılmıştır.

İkinci bölümde, aktif güç filtresi tanımı yapılarak çalışma prensibi anlatılmıştır. Devre yapılarına ve sisteme bağlantı şekillerine göre aktif güç filtreleri sınıflandırması

verilmiştir. Son olarak, aktif güç filtrelerinde kullanılan çok seviyeli eviricilerden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, tasarlanan aktif güç filtresinde kullanılan çok seviye evirici, kendisini oluşturan modüller yardımıyla tanıtılmıştır. Seri ve paralel aktif güç filtresi uygulamaları için evirici çalışma durumlarını gösteren tüm topolojiler verilmiştir. Ayrıca, seri aktif güç filtresi uygulamasında gerekli çıkış gerilimini üretmek için yeni bir anahtarlama algoritması geliştirilen formüller yardımıyla tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde, harmonik filtreleme amacıyla tasarlanan aktif güç filtreleri harmonik bozunumu farklı olan yük durumlarında simüle edilmiştir. Yapılan simülasyonlar, prototipi yapılan aktif güç filtresi ile laboratuvar ortamında pratik olarak tekrarlanmıştır. Ayrıca, yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar, seviye modülü sayısının farklı olduğu eviriciler için yinelenmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölümde, doktora tez çalışmasında elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

## 1. HARMONİKLER

### 1.1. Giriş

Harmonik ifadesinin ortaya çıkması fiziksel özdeğer problemlerine dayanmaktadır. Fransız fizikçi ve matematikçi Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) trigonometrik seriler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yaptığı bu çalışmalarda, ses dalgalarının boşlukta zamanın fonksiyonu şeklinde yayılan elektromanyetik dalgalar olmasından esinlenerek periyodik sinyallerin, temel frekansın tam katlarındaki sinüzoidal sinyallerin toplamından oluştuğunu gösteren bir seri formüle etmiştir. Serinin ilk teriminden sonra gelen tüm terimler harmonik olarak nitelendirilmektedir. Bir müzik aletinin sesi, bir ortamdaki ısı akışı, mekanik bir yapıdaki vibrasyonlar veya bir duvar saati sarkacının hareketi periyodik sinyaller olarak düşünülebilir. Elektrik enerjisinin kalitesi açısından bakıldığında, periyodik sinyal ile akım ve gerilimin zamana bağlı fonksiyonları akla gelmektedir. Elektriksel anlamda harmonik kavramı, ilk olarak 20. yüzyılın ikinci yarısında gündeme gelmesine rağmen, yük profilinin gün geçtikçe doğrusal olmayan karakteristiğe bürünmesi nedeniyle popülaritesini korumuş ve ciddi bir araştırma alanı olarak günümüzde de ilgi görmeyi sürdürmüştür.

### 1.2. Fourier Serileri ve Fourier Dönüşümü

Elektrik güç sistemlerindeki zamana bağlı akım ve gerilim ifadeleri, sinüzoidal sürekli hal durumu için tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan elemanlardan dolayı harmonikler söz konusu olduğunda, bu büyüklüklerin yeniden tanımlanması gerekmektedir.

Belirli bir frekansa sahip sinüzoidal olmayan sinyalde, temel frekanslı sinüzoidal dalganın yanında çok sayıda farklı frekanslı sinüzoidal bileşenler bulunmaktadır. Söz konusu ilave bileşenlerin frekansı, temel frekansın tam katıdır ve harmonik bileşen olarak adlandırılır [41]. Sinüzoidal olmayan periyodik sinyalin bütün harmonik bileşenleri, Fourier Serileri analizi sayesinde bulunabilir. Periyodik bir fonksiyonun Fourier Serileri analizi ile elde edilen trigonometrik Fourier Serileri açılımına ait genel ifade,



$$f(t) = \frac{A_0}{T} + \sum_{h=1}^{\infty} (A_h \cos(h\omega t) + B_h \sin(h\omega t)) \quad (1.1)$$

şeklinde verilir.

Burada,

$h$  : Harmonik mertebesi (1,2,3,...)

$t$  : Zaman

$\omega$  : Açısal hız

$A_0$  : Sabit terim (Doğru bileşen veya ortalama değer)

$A_h, B_h$  :  $f(t)$  fonksiyonunun harmonik bileşen katsayıları olarak ifade edilir.

$A_0, A_h, B_h$  katsayıları,

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) dt \quad (1.2)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (1.3)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (1.4)$$

eşitlikleri ile belirlenir [42].

Denklem (1.5) ve (1.6) ışığında  $f(t)$  fonksiyonu, Denklem (1.7)'de görüldüğü gibi trigonometrik Fourier serileri ile elde edilmiş olur;

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (1.5)$$

$$\phi_h = \arctan\left(\frac{B_h}{A_h}\right) \quad (1.6)$$

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (C_h \sin(h\omega t + \phi_h)) \quad (1.7)$$

Burada,

$C_h$  : f(t) fonksiyonunun h. harmonik katsayısı

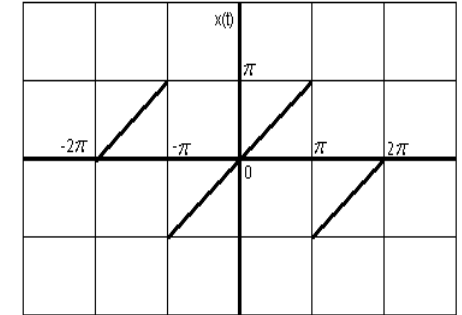
$\phi_h$  : f(t) fonksiyonunun h. harmoniğinin faz açısı olarak ifade edilir.

Fourier Serileri analizi ile zaman domenindeki sinyal, frekans domenine dönüştürülmektedir. Bu sayede sinyalin içerisinde herhangi bir frekanstaki sinüzoidal dalganın genlik ve faz miktarı belirlenebilmektedir. Tablo 1.1’de bazı periyodik fonksiyonlara ait seri açılımları ve grafikleri verilmektedir.

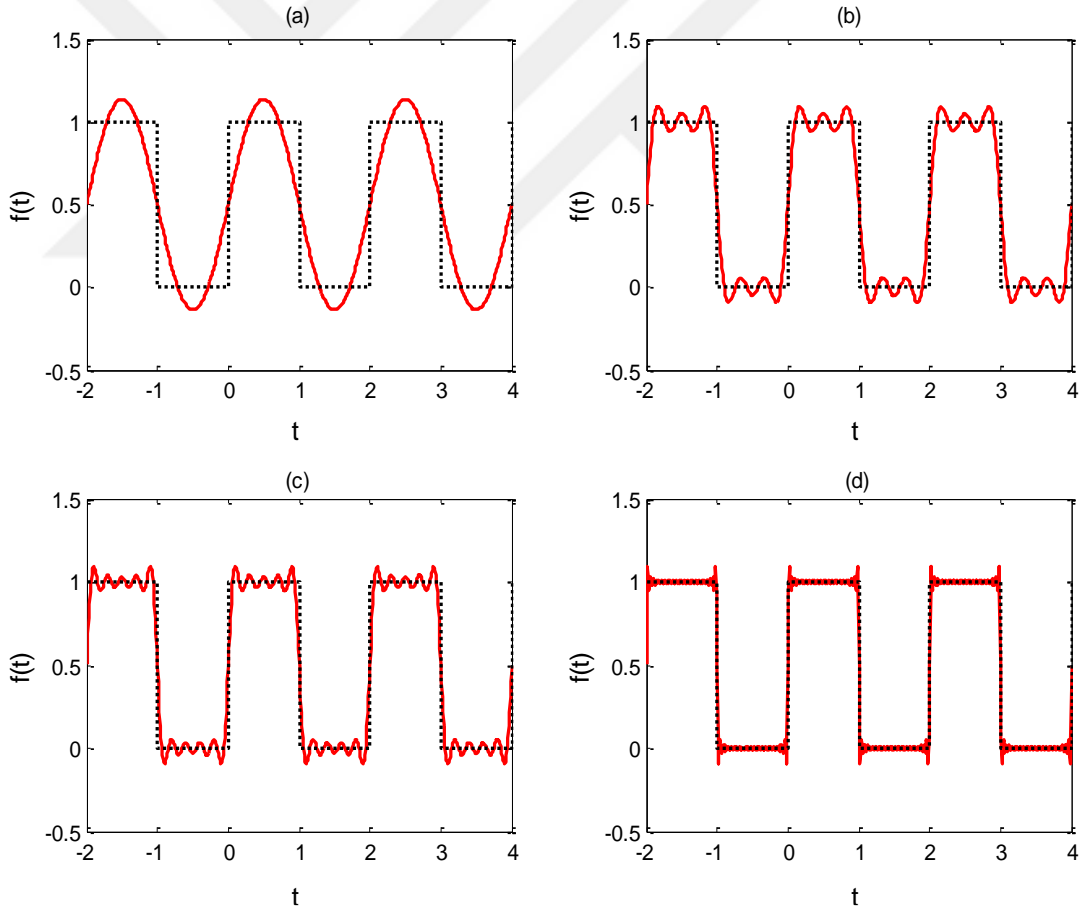
Tablo 1.1. Bazı periyodik fonksiyon ve Fourier Serileri açılımları

Periyodik fonksiyon ve seri açılımı	Grafığı
$x(t) = \begin{cases} 1 & , 0 < t < \pi \\ -1 & , -\pi < t < 0 \end{cases}$ $x(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin(t) + \frac{\sin(3t)}{3} + \frac{\sin(5t)}{5} + \dots \right)$	
$x(t) = t, \quad 0 < t < 2\pi$ $x(t) = \pi - 2 \left( \sin(x) + \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} + \dots \right)$	
$x(t) = \begin{cases} t, & 0 < t < \pi \\ 2\pi - t, & \pi < t < 2\pi \end{cases}$ $x(t) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \left( \frac{\cos(t)}{3^2} + \frac{\cos(3t)}{5^2} + \dots \right)$	

Tablo 1.1.(Devam) Bazı periyodik fonksiyon ve Fourier Serileri açılımları

$x(t) = t \quad , \quad -\pi < t < \pi$ $x(t) = 2 \left( \sin(x) - \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} + \dots \right)$	
---	--

Tablo 1.1'den de anlaşılacağı üzere, serideki sonsuz sayıda terimlerin toplamı sinyalin kendisini vermektedir. Seçilen örnek bir kare dalga fonksiyonunun Fourier Serileri analizi sonucunda elde edilen harmonik bileşenlerinin toplamından oluştuğunu göstermek amacıyla Şekil 1.1'deki gibi bir grafik takımı kullanılmıştır.



Şekil 1.1. Kare dalga Fourier Serileri açılımı a) Temel harmonik, b) İlk 5 harmonik bileşen toplamı, c) İlk 10 harmonik bileşen toplamı, d) İlk 50 harmonik bileşen toplamı

Fourier daha sonra yaptığı çalışmalar ile periyodik olmayan sinyallerin de periyodik sinyallerin integrali şeklinde yazılabileceğini göstermiştir. Periyodik olmayan sinyaller, periyodik sinyallerin periyotlarının sonsuza gitmesi halinde matematiksel olarak gösterilebilir. Fourier serilerinin periyodik olmayan işaretlere genişletilmesi olarak bilinen bu dönüşüme Fourier Dönüşümü adı verilir. Fourier dönüşümlerine ait matematiksel eşitlikler Denklem (1.8) ve Denklem (1.9)'daki gibidir;

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.8)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (1.9)$$

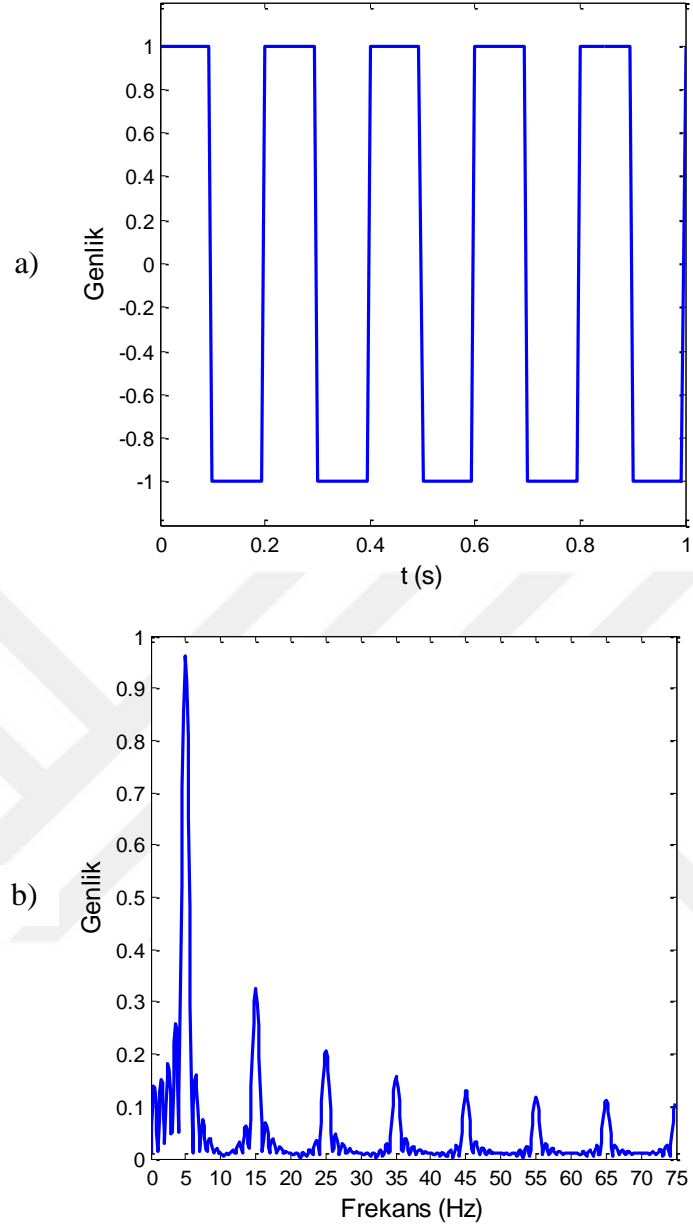
Fourier serileri ve Fourier dönüşümü, zaman domenindeki sinyallerin frekans domeninde gösterilmesi için kullanılır. Sinyal bileşenlerinin dağılımı, sinyalin harmonik spektrumu olarak isimlendirilir.

Sürekli sinyaller sonsuz noktadan oluştuğu için sayısal sistemlerde işlenememektedir. Bu nedenle frekans domeninin de ayrık olması gerekir. Hem zaman domeninin hem de frekans domeninin ayrık olduğu dönüşüme Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) denir. Fourier dönüşümü eşitlikleri, Denklem (1.10) ve Denklem (1.11)'deki eşitliklere dönüşür;

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad , k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.10)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad , n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.11)$$

Burada, ( $\Delta\omega=2\pi/N$ ) frekans bölgesindeki örnek alma adıdır. Bu adım ne kadar küçük ise frekans bölgesindeki örnek sıklığı o derece fazladır. Spektrumun çözünürlüğü ne kadar yüksek ise ( $\Delta\omega=2\pi/N$  ne kadar küçükse) AFD sonucu, sinyale o derece yaklaşır. Şekil 1.2'de bir simetrik kare dalga sinyali ve bu sinyalin AFD sonucu görülmektedir.



Şekil 1.2. Simetrik kare dalganın Fourier dönüşümü  
a) Simetrik kare dalga, b) AFD dönüşümü

### 1.3. Harmonik Standartları

Harmoniklerin sınırlandırılması, şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesi ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için önem taşımaktadır. Bu amaçla, oluşturulan standartlarda iki farklı yaklaşım görülmektedir. Bu yaklaşımlardan ilki, International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından tercih edilen ve doğrusal olmayan yükün bağlandığı noktaya uygulanan standartlardır. Diğer yöntem ise, Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) tarafından benimsenen ve

ortak bağlantı noktasına (Point of Common Coupling - PCC) uygulanan standartlardır. IEC 1000-3-2 ve IEEE 519-1992 standartlarında belirtilen Total Harmonic Distortion (THD) değerleri, akım ve gerilim dalga şekillerindeki THB'yi ifade eder. THB, harmonik içeren bir dalga şeklinin temel frekanslı sinüzoidal bir dalgadan ne ölçüde uzaklaştığını göstermektedir. THB'nin değeri, gerilim dalga şekli için Denklem (1.12) veya Denklem (1.13) ifadelerinden yararlanılarak bulunur;

$$THB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{hEt}^2}}{V_{1Et}} \quad (1.12)$$

veya

$$THB = \frac{\sqrt{V_{Et}^2 - V_{1Et}^2}}{V_{1Et}} \quad (1.13)$$

Burada,

$V_{Et}$  : Çıkış geriliminin etkin değeri

$V_{1Et}$  : Çıkış geriliminin 1. harmoniğinin etkin değeri

olarak ifade edilir [9]. Gerilimin etkin değeri,

$$V_{Et} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (1.14)$$

şeklinde Denklem (1.14) ifadesi ile bulunur. Denklem (1.12), Denklem (1.13) ve Denklem (1.14) ifadeleri akım dalga şekli için de geçerlidir.

## 1.4. Harmonik Filtreler

Güç sistemlerinde harmonik akımlarını ve gerilimlerini engellemek amacıyla sisteme ilave edilen devrelere harmonik filtreler denir. Harmonik filtreler, pasif filtreler ve aktif filtreler olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

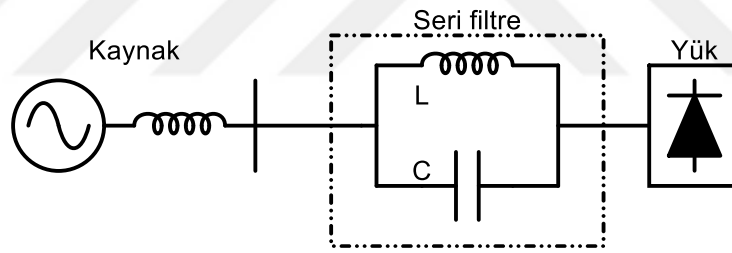
### 1.4.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler endüktans, direnç ve kondansatörlerin kombinasyonundan oluşan ve filtrelenmek istenen harmonik frekansına ayarlı düzeneklerdir. Aktif filtrelere göre

maliyetleri daha düşük ve kullanımları yaygındır. Fakat sistemle olumsuz etkileşimlerin oluşma ihtimali yüksektir. Bu nedenle tasarımları aşamasında çok dikkatli davranılmalıdır. Güç sistemine bağlantısına göre iki tür pasif filtre vardır.

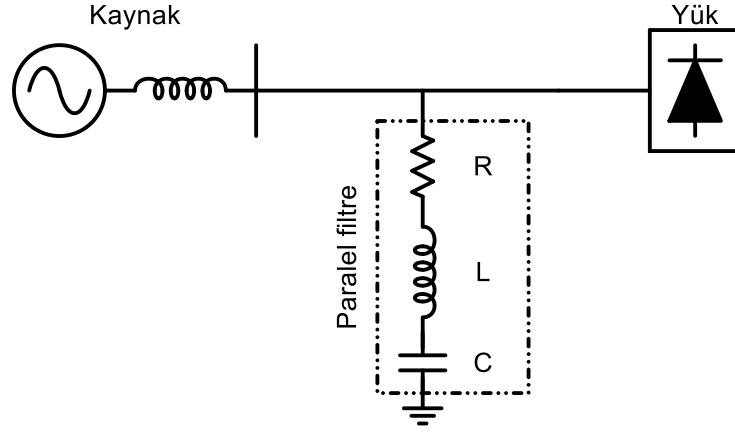
Seri pasif filtreler, yüke seri olarak bağlanırlar. Seri bağlanan endüktans ve kondansatörün değeri istenen harmonik frekansında yüksek bir empedans oluşturacak şekilde ayarlanır. Bu şekilde harmonik akımının akışı önlenmiş olur. Temel frekansta, seri filtre düşük empedans göstererek temel bileşen akımının akmasına izin verir.

Seri filtreler, sadece bir mertebedeki harmonik akımını (örneğin üçüncü harmonik ) sınırlayabilirler ve özellikle sıfır dizi bileşenlerini yok etme şansının olmadığı bir fazlı devrelerde kullanılırlar. Seri pasif filtrelerin en büyük dezavantajı, yüke seri bağlı olduklarından yük akımının tamamını taşımak zorunda olmalarıdır. Ayrıca aşırı akım koruma düzeneğine de ihtiyaç vardır. Bu yüzden, seri filtreler şönt filtrelere göre daha az kullanılırlar [43]. Şekil 1.3'te seri pasif filtrenin güç sistemine bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 1.3. Seri filtre ve güç sistemine bağlantısı

Paralel pasif filtreler, ekonomik olması ve genellikle yeterli seviyede düzeltme yapabildiği için en çok kullanılan pasif filtre çeşididir. Güç sistemine paralel bağlanarak ayarlandığı frekansta istenen harmonik akımına düşük empedanslı bir yol oluşturmak suretiyle harmonikli akımın büyük bir kısmını sistemden izole ederler. Şekil 1.4'te paralel pasif filtrenin güç sistemine bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 1.4. Paralel filtre ve güç sistemine bağlantısı

Paralel pasif filtreler, harmonik değerlerin bastırılmasının yanında güç faktörünün düzeltilmesini de sağlarlar. Gerçekte, güç faktörü düzeltmek amacıyla kullanılan kondansatörler filtreli kompanzasyonu gerçekleştirmek için kullanılırlar.

Paralel pasif filtrelerin dikkat edilmesi gereken özelliklerinden biri, rezonans noktasının altında keskin bir paralel rezonans noktası oluşturmasıdır. Bu frekansın harmonik değerlerinin, yüksek harmonik mertebelerinden uzak olmasına özen gösterilmelidir. Filtreler genellikle filtrelenecek istenen harmonik frekansının altında bir değere ayarlanırlar. Böylelikle seri rezonans frekansının yükselmesine neden olabilecek sistem parametrelerindeki değişiklikler için bir güvenlik payı bırakılmış olur. Eğer filtreler tam olarak istenen frekansa ayarlanırlarsa, sıcaklık veya herhangi bir arıza nedeniyle kondansatör ve endüktanslardaki değişiklikler paralel rezonans noktasının bu değere kaymasına neden olabilirler. Bu da filtre yerleştirilmeden oluşabilecek duruma göre çok daha kötü bir olaya neden olur [43].

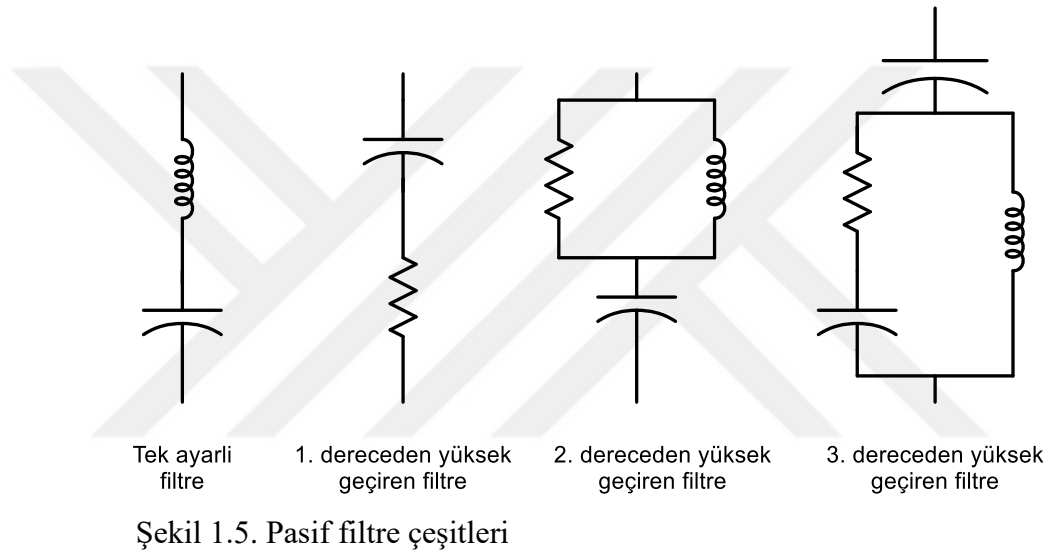
Bu rezonans problemini yok etmek için filtreler, harmonik mertebesi en düşük olan harmoniklerden başlayarak sisteme ilave edilirler. Örneğin, yedinci harmoniği yok etmek için kullanılan bir filtrenin yanına genellikle beşinci harmonik için de filtre yerleştirmek gerekmektedir. Sadece yedinci harmonik için yerleştirilen bir filtrenin oluşturduğu rezonans frekansı beşinci harmonik frekansına çok yakın değerler almaktadır.

Pasif filtreler daima kısa devre reaktansı  $X_{SC}$ 'nin sabit kalacağı baraya yerleştirilmelidir. Çünkü sistem empedansı değiştikçe paralel rezonans da hareket edecektir. Örneğin, bir güç sistemi sadece yedek üretim birimiyle çalıştığında oluşacak



rezonans frekansı, şebekeye bağlı olarak çalıştığı duruma göre daha düşük değerlerde gerçekleşecektir. Bunun nedeni, generatör empedansının şebekenin empedansından daha büyük olmasıdır. Bu durumda etkili olmayan bir harmonik büyüyebilir. Dolayısıyla, yedek üretim sistemleri devreye alınırken filtreler sistemden ayrılır [43].

Pasif filtreler çalışma prensiplerine göre alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren ve band durduran filtreler olmak üzere dört farklı grup altında toplanabilir. Şekil 1.5'te bir tek ayarlı filtre ve farklı topolojilerdeki yüksek geçiren filtre devreleri görülmektedir.

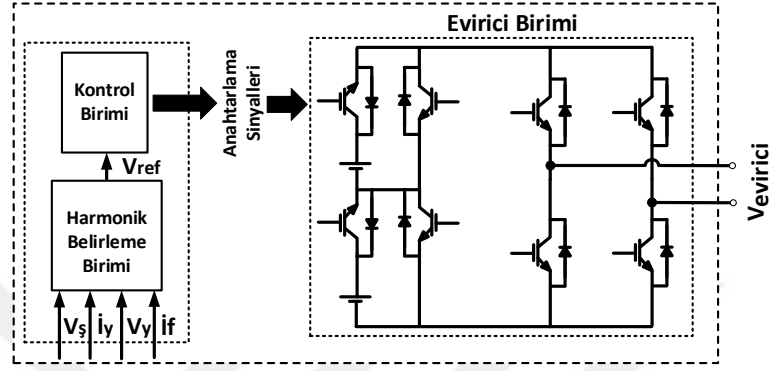


#### 1.4.2. Aktif güç filtreleri

Pasif filtreler, kurulum maliyetlerinin düşük olması, tasarımlarının kolay olması, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtrelemeyi birlikte yapabilmesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, güç kalitesi problemlerinin giderek artmasına ek olarak klasik bir çözüm olan pasif filtrelerin çok yer kaplamaları, sadece belirlenen harmonik bileşen için filtreleme imkanı sunmaları, yük değişimlerine cevap verememeleri, yüksek güç kaybına neden olmaları, performanslarının şebeke empedansına bağlı olması ve en önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturmaları harmoniklerden kaynaklı problemlerin giderilmesinde aktif güç filtrelerine olan ilgiyi arttırmıştır.

Esas olarak, aktif güç filtresi topolojileri kontrollü güç yarı-iletkenleri, enerji depolayabilen pasif devre elemanları ve bir kontrol sisteminden oluşmaktadır. Buna

göre, aktif güç filtrelerinin harmonik belirleme, kontrol ve evirici birimi olmak üzere üç ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Genellikle, harmonik belirleme birimi ile kontrol birimi bir arada tanımlanmaktadır. Şekil 1.6, bir aktif güç filtresini oluşturan temel birimleri göstermektedir [44].



Şekil 1.6. Seri aktif güç filtresini oluşturan temel birimler

Güç sistemindeki değişimlere otomatik olarak adapte olabilen ve pasif filtrenin dezavantajlarını ortadan kaldıran aktif güç filtrelerinin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Gerilim ve akımdaki THB değerlerini çok küçük değerlere indirmeleri
- Pasif filtrelere göre geniş bir harmonik filtreleme aralığına sahip olmaları
- Reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesi
- Verimlerinin yüksek oluşu
- Üç fazlı sistemlerde nötr hattı akımlarını azaltmaları
- Yük değişimlerine cevap verebilmeleri

Aktif güç filtrelerinin belirtilen avantajlarının yanı sıra bu alanda yapılan araştırmaların devam etmesi ve pasif filtrelerle kıyaslandığında kurulum maliyetlerinin daha fazla olması bir dezavantaj olarak belirtilebilir.

## 2. AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ

Harmonikler; kayıpların artması, koruma ve ölçüm devrelerinin hatalı çalışması, devre elemanlarında aşırı ısınma ve paralel rezonans gibi birçok istenmeyen probleme neden olmaktadır. Harmoniklerin bu olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması için uygulanan çözümlerin en başında pasif harmonik filtreler gelmektedir.

Pasif devre elemanlarının (direnç-kondansatör-endüktans) farklı bağlantı şekilleriyle elde edilen farklı filtre topolojileri mevcuttur. Pasif filtrelerdeki temel amaç, akım ve/veya gerilim harmoniklerine sistem empedansı ile karşılaştırıldığında ya çok küçük bir direnç göstererek (paralel rezonans) yeni bir yol açmak ya da çok büyük bir empedans göstererek (seri rezonans) tıkaç görevi görmektir. Pasif harmonik filtreler ekonomik bir çözüm olmakla birlikte; çok yer kaplamaları, belirlenen harmonik bileşenler için filtreleme imkanı sunmaları, performanslarının şebeke empedansına bağlı olması ve en önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturmaları gibi belirgin dezavantajlar sunmaktadır. Güç kalitesindeki bozulmaların giderek artması ve pasif filtrelerin bu olumsuz yönleri harmoniklerden kaynaklı problemlerin giderilmesinde aktif çözümlere olan ilgiyi artırmıştır.

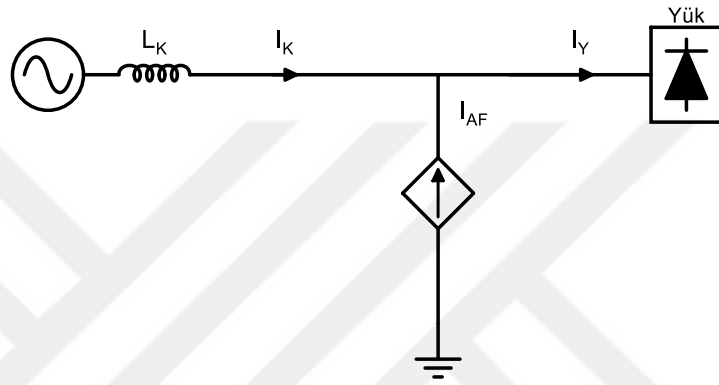
Aktif güç filtreleri, harmoniklerin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, rezonansların bastırılması ve gerilim regülasyonu gibi güç kalitesini artıracak birçok uygulamaya imkan sağlamaktadırlar. Aktif güç filtrelerinin bu yetenekleri, devre yapılarına ve sisteme bağlantı şekillerine göre değişiklik göstermektedir.

### 2.1. Aktif Filtrelerin Sınıflandırılması

Aktif güç filtreleri sisteme bağlantı şekillerine göre seri, paralel, hibrit ve Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyici olmak üzere dört grupta sınıflandırılmaktadır. Paralel aktif güç filtreleri çoğunlukla akım harmoniklerinin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonu amacıyla; seri aktif güç filtreleri ise çoğunlukla gerilim harmoniklerinin süzülmesi, gerilim regülasyonu ve harmonik izolasyonu amacıyla kullanılmaktadırlar.

### 2.1.1. Paralel aktif güç filtresi

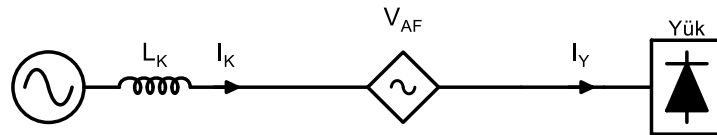
Paralel aktif güç filtresi adından da anlaşılacağı gibi sisteme paralel bağlı olarak çalışır. Yükün çektiği harmonikli akımları tanımladıktan sonra bunlarla aynı genlikte fakat ters fazdaki akımları sisteme enjekte eder. Paralel aktif güç filtresi, akım kaynağı gibi davranan doğrusal olmayan yükler için etkilidir. Paralel aktif filtre ile reaktif güç kompanzasyonu ve akım dengesizlikleri giderilebilir. Şekil 2.1’de bir fazlı paralel aktif güç filtresinin güç sistemine bağlantısını gösteren bir prensip şema gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Paralel aktif güç filtresinin prensip şeması

### 2.1.2. Seri aktif güç filtresi

Seri aktif güç filtresi sisteme bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif güç filtresi ile gerilim harmonikleri elimine edilir. Harmonikli gerilim kaynağı gibi davranan kaynaklar için etkilidir. Seri aktif güç filtresi ile gerilim dengesizlikleri ve dalgalanmaları önlenir. Aynı zamanda gerilim regülasyonu sağlanır. Şekil 2.2’de bir fazlı seri aktif güç filtresinin güç sistemine bağlantısını gösteren bir prensip şema gösterilmektedir.

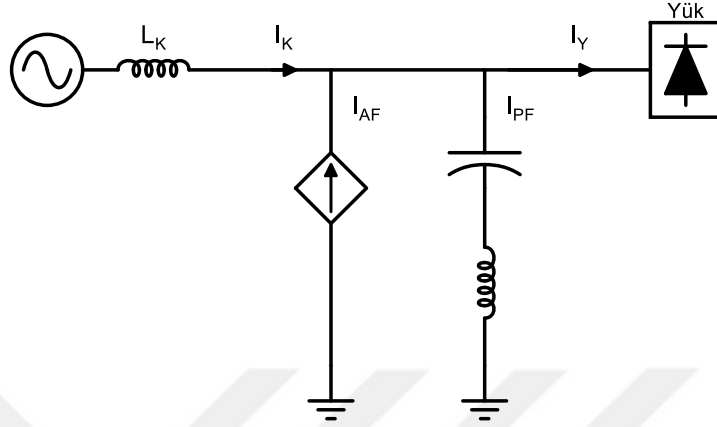


Şekil 2.2. Seri aktif güç filtresinin prensip şeması

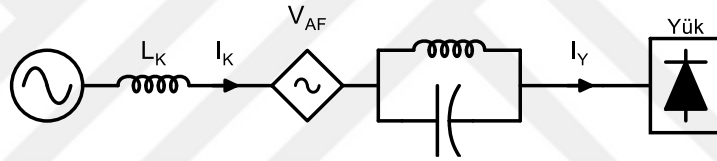
### 2.1.3. Hibrit aktif güç filtresi

Aktif ve pasif filtrelerin bir arada hibrit aktif güç filtresi olarak kullanılmasının nedeni maliyeti düşürmek ve verimi yükseltmektir. Genellikle, pasif filtre istenilen bir

frekanstaki harmoniği bastırmak için ayarlanır ve böylelikle aktif filtre kapasitesi düşürülür. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te seri ve paralel aktif güç filtrelerinin pasif filtrelerle birlikte oluşturduğu hibrit güç filtreleri görülmektedir.

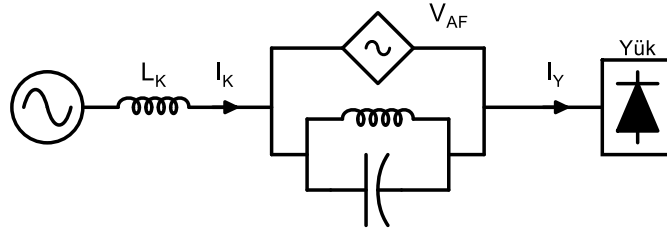


Şekil 2.3. Hibrit aktif güç filtresi: Paralel aktif güç filtresi ve paralel pasif filtrenin birlikte kullanılması

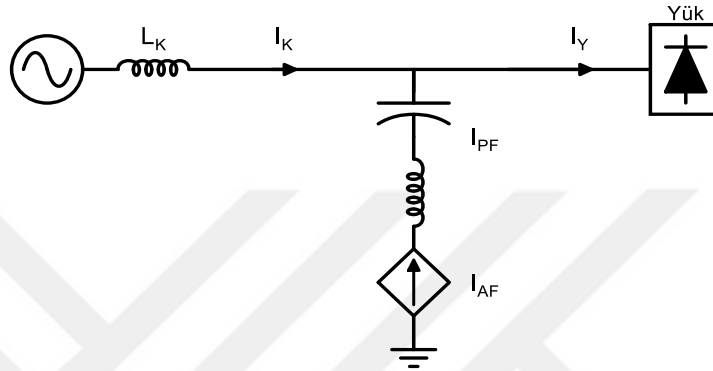


Şekil 2.4. Hibrit aktif güç filtresi: Seri aktif güç filtresi ve seri pasif filtrenin birlikte kullanılması

Aktif filtrelerle yapılan uygulamalarda karşılaşılan problemlerden biri olarak seri aktif güç filtrelerinden geçen yüksek temel akım ile paralel aktif güç filtrelerinde görülen yüksek temel gerilim değerinden bahsedilmelidir. Bunu önlemek için seri aktif güç filtresi pasif filtre ile paralel bağlanır. Burada dikkat edilmesi gereken rezonans durumudur. Paralel aktif güç filtresi üzerindeki yüksek gerilimi önlemek amacıyla da paralel pasif bir filtre ile beraber kullanılır. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da temel akım ve temel gerilim değerlerine maruz kalan aktif güç filtrelerinin pasif filtrelerle iyileştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Seri aktif güç filtresi ve pasif filtrenin birlikte kullanılması

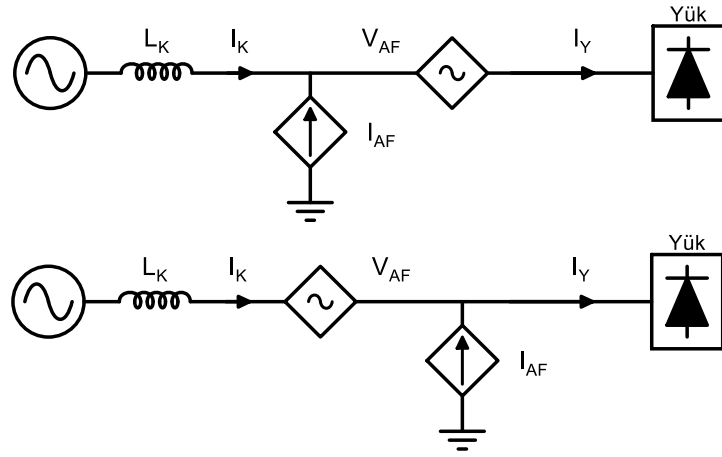


Şekil 2.6. Paralel aktif güç filtresi ve pasif filtrenin birlikte kullanılması

#### 2.1.4. Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi (UPQC)

Seri ve paralel aktif güç filtrelerinin bir arada kullanılmasıyla oluşan Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi (UPQC), güç kalitesi problemlerine karşı çok etkili olmaktadır. Seri aktif güç filtresi gerilim harmoniklerini bastırırken paralel aktif güç filtresi de akım harmoniklerini kompanze eder. Genellikle, enerji depolama elemanı iki filtre arasında ortak kullanılır.

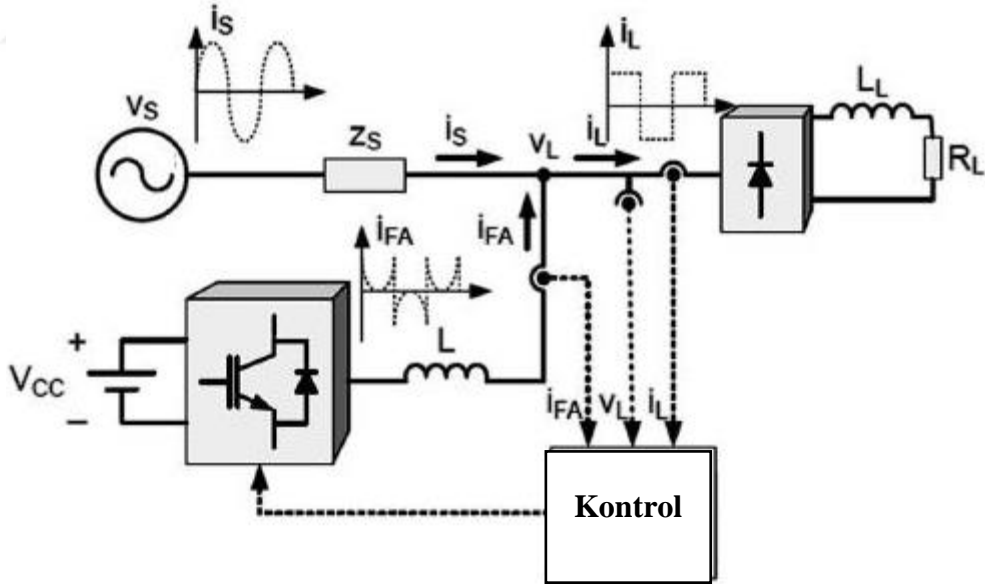
İki tip UPQC bulunmaktadır. İlk tipte paralel aktif güç filtresi kaynağa yakın bağlanırken seri aktif güç filtresi ise yüke yakın kısımdadır. Seri aktif güç filtresi yük harmonik gerilimlerini kompanze ederken, paralel aktif güç filtresi de akım harmoniklerini kompanze eder, güç faktörünü düzeltir veya dengesiz yükü dengelemek amacıyla kullanılır. İkinci tip UPQC’de paralel aktif güç filtresi yüke yakın noktaya bağlanarak akım harmonikleri kompanze edilir. Kaynağa yakın bağlanan seri aktif güç filtresi ise kaynak gerilim harmoniklerini bastırır veya gerilimi regüle eder [45]. Bahsedilen konfigürasyonlara ait prensip şemaları Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. UPQC konfigürasyonları

## 2.2. Aktif Güç Filtresi Yapısı

Aktif güç filtresi evirici birimi, kontrol birimi ve harmonik belirleme birimi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 2.8’de aktif güç filtresi blok şeması görülmektedir. Harmonik belirleme birimi, genellikle kontrol birimi ile birlikte gösterilmektedir.

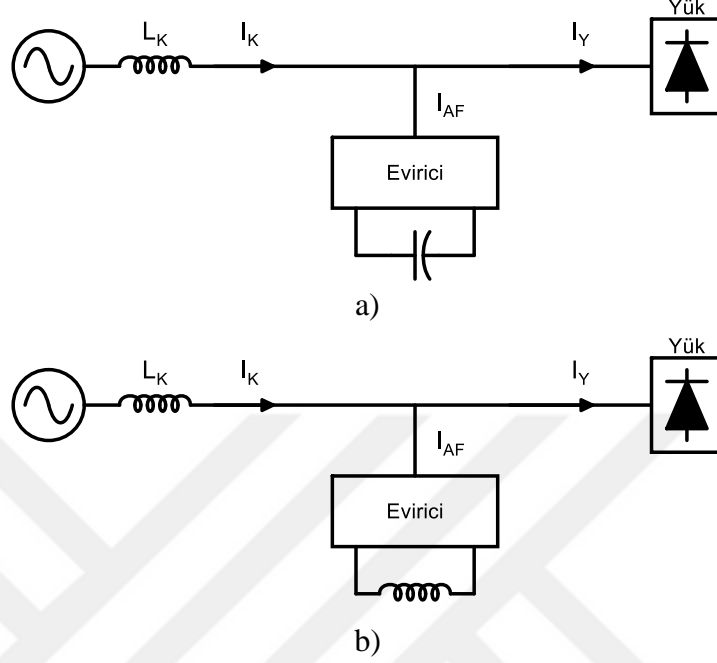


Şekil 2.8. Paralel aktif güç filtresi blok şeması

Evirici birimi, akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı evirici kullanılarak gerçekleştirilebilir. Her iki evirici çeşidinin prensip şeması Şekil 2.9’da verilmiştir.

Dengesiz olan sistemlerde, maksimum esneklik ve performans için her faz başına ayrı ayrı eviricilerin kullanılması uygundur. Gerilim veya akım kaynaklı evirici seçimi,

maliyete, harmonik kaynağına ve istenilen harmonik distorsiyonu düzeltme miktarına bağlıdır.



Şekil 2.9. Evirici birimi prensip şeması, a) akım kaynaklı evirici, b) gerilim kaynaklı evirici

Kontrol devresinin girişinde, harmonik belirleme biriminde belirlenmiş referans filtre sinyalleri, çıkışında ise evirici tetikleme sinyalleri bulunur.

Harmonik belirleme birimi, harmoniklerin belirlenmesi için geliştirilmiş algoritmaların yürütüldüğü kısımdır. Literatürde harmonik belirleme amacıyla geliştirilmiş birçok yöntem mevcuttur.

### 2.3. Aktif Güç Filtrelerinde Kullanılan Evirici Topolojileri

Yapılan literatür araştırması sonucunda, aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılan evirici topolojileri DA giriş veya besleme kaynağı, faz sayısı, uygulanan kontrol yöntemi ve izolasyon durumuna göre sınıflandırılabilir.

#### 2.3.1. Gerilim / Akım beslemeli eviriciler

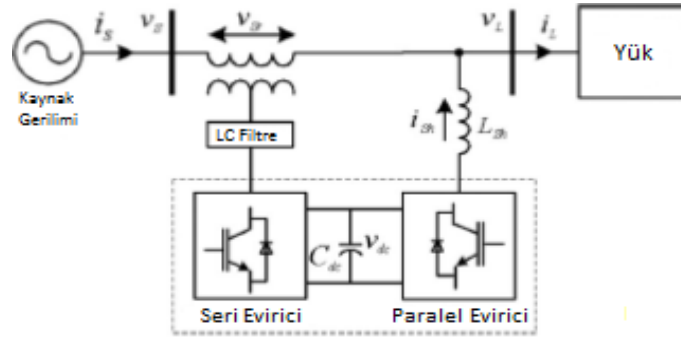
DA giriş veya besleme kaynağı açısından gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı eviriciler olarak iki gruba ayrılırlar. Gerilim veya akım kaynaklı evirici seçimi maliyete, harmonik kaynağına ve istenilen harmonik distorsiyonu düzeltme miktarına bağlıdır.



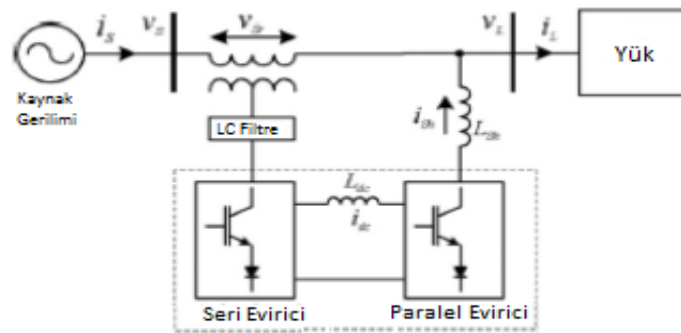
Girişlerinde bir DA gerilim kaynağı olan gerilim kaynaklı eviricilerde, genellikle üretilen çıkış geriliminin de bir alternatif akım (AA) gerilim kaynağı olduğu kabul edilir. Ancak, eviricilerin çıkış gerilimlerinde, kontrol yöntemine bağlı bir harmonik içerik mevcuttur. Düşük güçlü uygulamalarda harmonik miktarı fazla olan kare dalga eviriciler kullanılırken, büyük güçlerde harmonik miktarı düşük olan DGA eviriciler ve çok seviyeli eviriciler daha çok tercih edilmektedir [46].

Akım kaynaklı eviricilerde, yeterince büyük değerli bir endüktans evirici girişine seri bağlanarak, akımın bir periyot içerisinde yaklaşık olarak sabit kalması sağlanmaktadır.

Uygulamada en çok kullanılan yapı, gerilim kaynaklı eviricidir. Ayrıca bu eviriciler, akım kaynaklı eviricilere göre düşük maliyetlidir ve boyutları küçüktür. Gerilim kaynaklı eviriciler bütün sistem için uygulanabilirken, akım kaynaklı eviricilerin kayıplarının yüksek olmasından dolayı bireysel yüklere uygulanması daha uygundur. Akım kaynaklı eviriciler çok seviyeli topolojilerde kullanılamamaktadır. Gerilim kaynaklı eviricilerin en önemli dezavantajı ise kontrol sistemlerinin karmaşık olmasıdır [2]. Bir UPQC uygulamasında kullanılan gerilim ve akım kaynaklı eviriciler Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.10. Gerilim kaynaklı evirici tabanlı bir UPQC

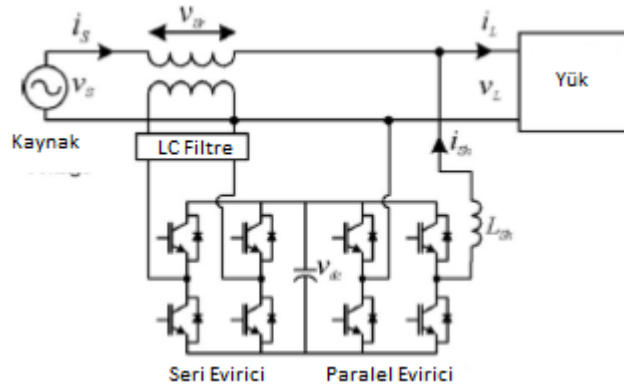


Şekil 2.11. Akım kaynaklı evirici tabanlı bir UPQC

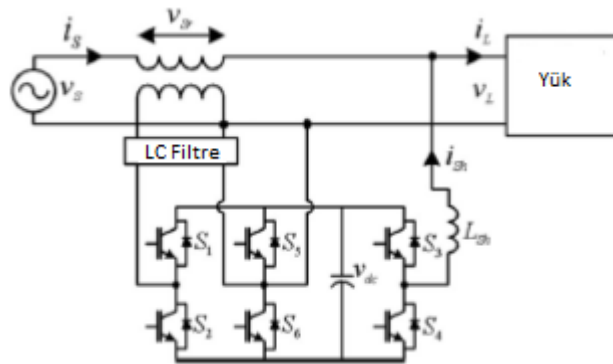
### 2.3.2. Bir ve üç fazlı eviriciler

Aktif güç filtreleri, faz sayısına bağlı olarak bir fazlı ve üç fazlı olmak üzere iki grupta sınıflandırılırlar. Literatürde bir ve üç fazlı sistemlerde kullanılan aktif güç filtreleri için farklı topolojiler geliştirildiği görülmektedir.

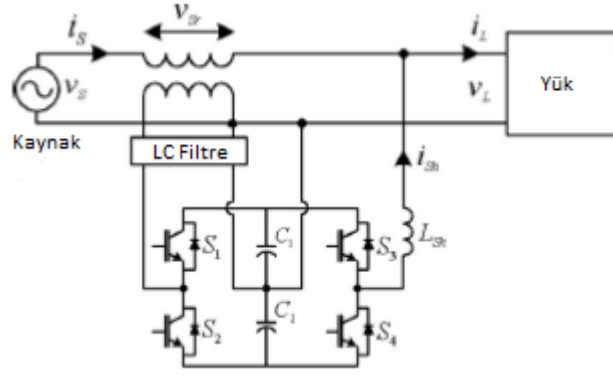
Örnek olarak, bir fazlı UPQC uygulamasında sıkça karşılaşılan topolojiler aşağıda gösterilmiştir. Şekil 2.12’de UPQC’yi oluşturan seri ve paralel aktif güç filtresi için H-köprü eviriciler kullanılmıştır. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te, kullanılan anahtarlama eleman sayısını azaltmak amacıyla geliştirilmiş farklı topolojiler görülebilmektedir. Azalan anahtarlama elemanı sayısı UPQC’nin kompanzasyon performansını etkilemektedir [2].



Şekil 2.12. Bir fazlı UPQC: İki H-köprü konfigürasyonu

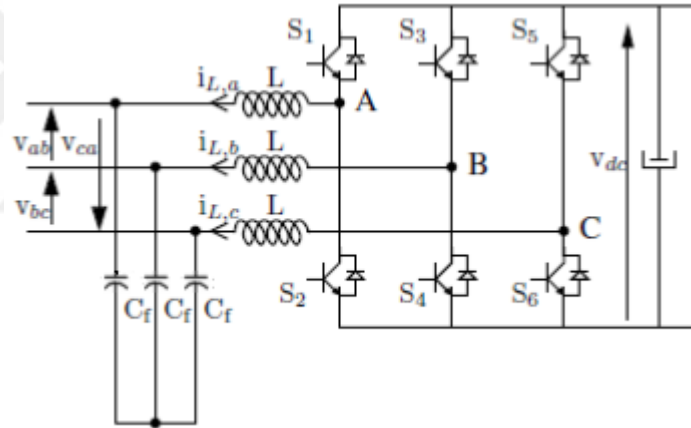


Şekil 2.13. Bir fazlı UPQC: 3-kollu konfigürasyon



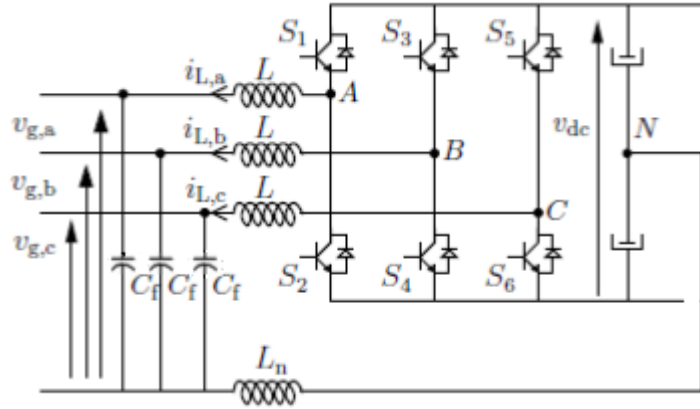
Şekil 2.14. Bir fazlı UPQC: Yarım-köprü konfigürasyonu

Üç fazlı nötr hattı bulunmayan sistemler için aktif güç filtrelerinde kullanılan eviricilerde en sık karşılaşılan gerilim kaynaklı evirici topolojisi Şekil 2.15'te gösterilmiştir [47].



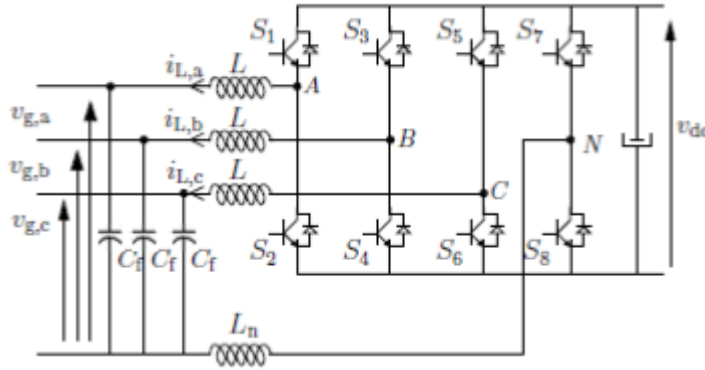
Şekil 2.15. Üç faz üç telli evirici topolojisi

Şekil 2.16'da gösterilen üç fazlı nötr hattı bulunan sistemler için geliştirilen 2C topolojisi DA barasındaki kapasitenin iki eşit parçaya ayrılması ile elde edilmektedir. Kapasitelerin orta noktasının geriliminin sıfır olması istenir ve bu nokta nötr hattı bağlantısı için kullanılır [2, 47]. Bu topolojide kapasiteler üzerindeki gerilimlerin eşit olmaması durumunda gerilim dalgalanmaları görülmektedir ve bu olumsuzluğu gidermek için bir kontrol gerekmektedir.



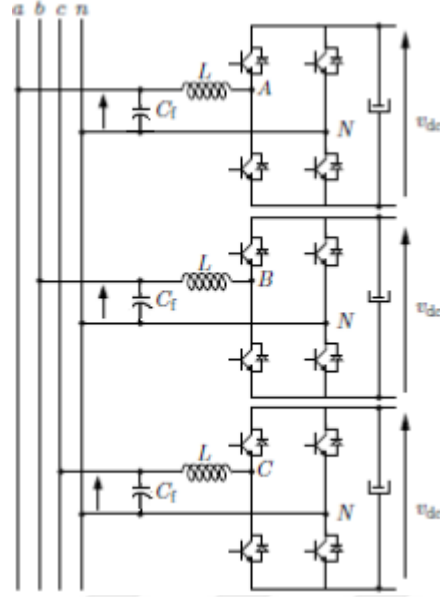
Şekil 2.16. Üç faz dört telli evirici topolojisi: Ayrık kondansatörlü, 2C

Şekil 2.17’de gösterilen 4L topolojisinde dördüncü kolun orta noktası nötr hattı bağlantısını oluşturmak için kullanılır. 2C topolojisindeki olumsuzluklardan kurtulmak amacıyla fazlardan iki adet anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Bu da kontrolde karmaşıklığa neden olmaktadır [2, 47].



Şekil 2.17. Üç faz dört telli topoloji: Dört kollu, 4L

Şekil 2.18’de gösterilen 3HB topolojisi ise yüksek gerilim uygulamalarında, aktif güç filtresinde gerekli gerilim seviyesinin  $\sqrt{3}$  oranında azaltılmasına imkan sağlamakla beraber artan anahtarlama elemanı sayısı, boyut ve maliyet açısından diğer topolojilere göre daha az tercih edilmektedir [2].



Şekil 2.18. Üç faz dört telli topoloji: Üç H-köprülü, 3HB

### 2.3.3. Çok seviyeli eviriciler

Eviricilerin bir yükü veya şebekeyi beslediği sistemlerde aranan ortak özellik, evirici çıkış geriliminin harmonik seviyelerinin çok düşük olması, başka bir deyişle gerilim dalga şeklinin sinüs formuna olabildiğince yaklaşmış olmasıdır. Çok seviyeli eviricilerin çıkış geriliminin dalga şekli, sinüs sinyalinin merdiven basamaklı haline benzemektedir. Seviye sayısı arttıkça evirici çıkış geriliminin değişimi sinüs sinyaline daha çok benzemektedir ve çıkış geriliminin kalitesi yükselmektedir [34,48,49].

Çok seviyeli eviriciler kademeli gerilim seviyelerine sahip olduğundan anahtarlama elemanları üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresi oldukça azdır.

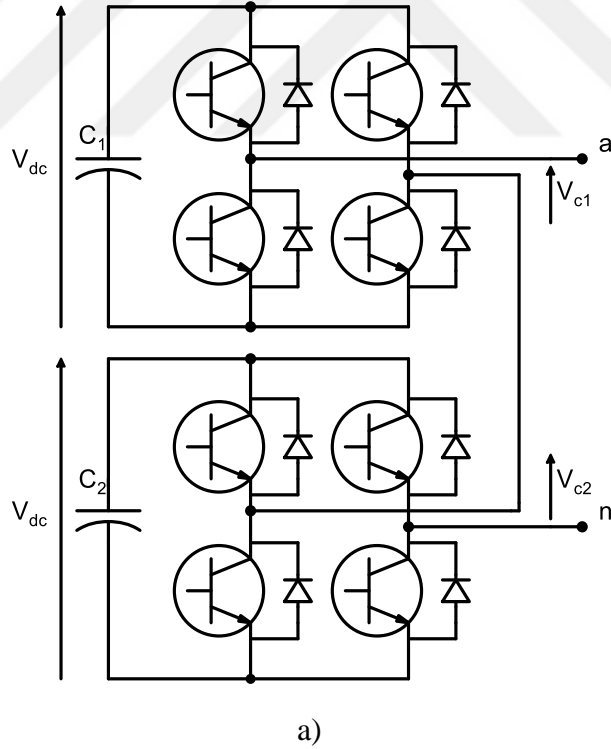
Çok seviyeli eviricilerin çıkış dalga şekli basamaklı olduğu için klasik kare dalga evirici ile karşılaştırıldığında harmonikleri oldukça düşüktür. Seri bağlanan çok seviyeli konverter modülleri, bir fazlı tam köprü modüllerdeki her bir anahtarın  $dv/dt$  gerilim stresini azaltmakta, bu durum da yüksek gerilimli ve/veya yüksek güçlü uygulamalar için çok seviyeli eviricilerin kullanımını elverişli hale getirmektedir [8,34,48].

Çok seviyeli eviriciler, çıkış geriliminde basamak darbeleri oluşturarak az harmonik bozunumuna sahip gerilim üretirler. Harmonik bileşenleri daha da azaltmak amacıyla

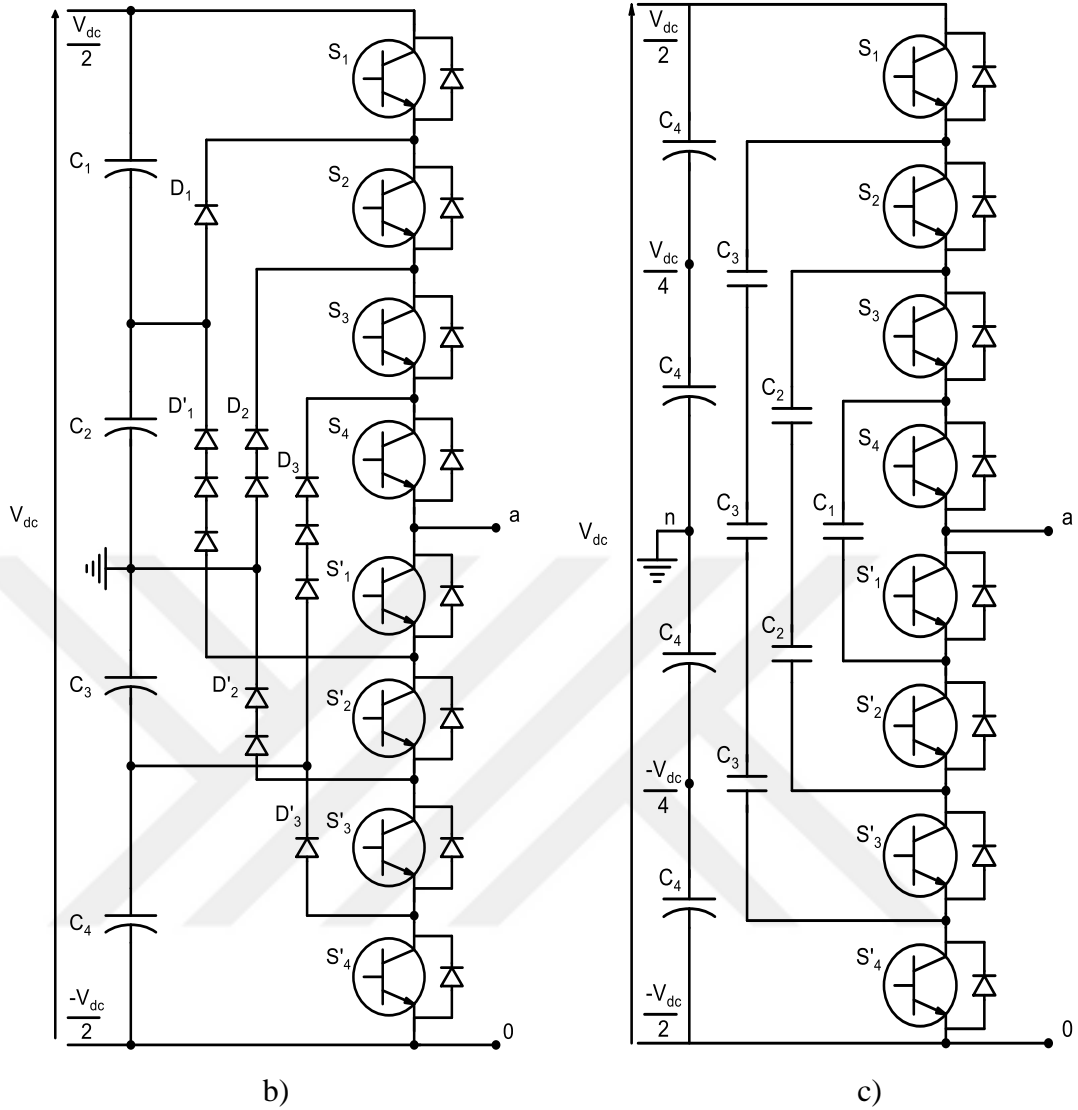
literatürde çok seviyeli eviriciler üzerinde farklı sinüzoidal DGA yöntemleri ve uzay vektör DGA yöntemleri uygulanmaktadır. Fakat kullanılan DGA yöntemleri, denetimi karmaşıktır ve anahtarlama frekansını arttırmaktadır. Ayrıca seviye sayısı arttıkça anahtarlama elemanı sayısı da artmakta dolayısıyla eviricinin denetimi zorlaşmaktadır [48].

Çok seviyeli eviriciler sinüs formunda çıkış gerilimi üretebilmenin yanında istenilen harmoniklere sahip çıkış gerilimi de üretebilmektedirler. Bu sayede çok seviyeli eviriciler aktif filtre uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Ayrıca çok seviyeli eviriciler istenilen genlik, frekans ve faz açısında gerilim üretme yeteneğine sahip olması nedeniyle kompanzasyon uygulamalarında da yer almaktadır [48].

Literatürde yer alan çok seviyeli evirici topolojileri temel olarak üç grupta sınıflandırılabilir [9]; a) Kaskat bağlı eviriciler, b) Diyot kenetlemeli eviriciler, c) Flying Kapasitörlü eviriciler.



Şekil 2.19. a) Kaskat bağlı çok seviyeli evirici, b) Diyot kenetlemeli evirici, c) Flying kapasitörlü evirici



Şekil 2.19. (Devam) a) Kaskat bağlı çok seviyeli evirici, b) Diyot kenetlemeli evirici, c) Flying kapasitörlü evirici

Literatürde diyot kenetlemeli evirici tabanlı aktif güç filtresi uygulamalarının yer aldığı çalışmalar mevcuttur [50,51]. Aynı şekilde, flying kapasitörlü topolojiye sahip aktif güç filtresi çalışmaları da görülmüştür [7,52]. Literatür araştırması sonucunda, aktif güç filtresi uygulamalarında en sık karşılaşılan topolojinin kaskat bağlı çok seviyeli evirici olduğu belirlenmiştir [8-11,34,49].

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici topolojisinin aktif güç filtresi (AGF) çalışmalarında tercih edilmesinin nedenleri arasında yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalarda elverişli olması, anahtarlama elemanı üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresinin azalması, kullanılacak yarı-iletken eleman sayısının düşürülmesi ve çıkış harmonik seviyesinin azaltılması sayılabilir [8,34,48,49].

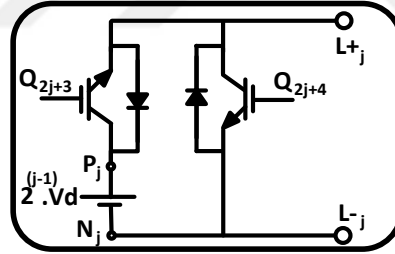
### 3. TASARLANAN AKTİF GÜÇ FİLTRESİ

Bu bölümde, tasarlanan aktif güç filtresinde kullanılan kaskat bağlı yarım H-köprü eviricinin yapısı ve çalışma prensibi anlatılacaktır. Evirici çıkışında istenilen dalga şeklinin elde edilebilmesi amacıyla seri aktif güç filtresi uygulamaları için geliştirilen denetim algoritmaları bu bölümde ele alınacaktır.

#### 3.1. Tasarlanan Aktif Güç Filtresinde Kullanılan Çok Seviyeli Evirici

##### 3.1.1. Seviye modülü (SM)

Tasarlanan aktif güç filtresinde kullanılan çok seviyeli eviriciyi oluşturan modüllerden biri olan seviye modülünün prensip şeması Şekil 3.1’de görülmektedir. Yarım H-köprü yapısına sahip seviye modülü, 2 anahtarlama elemanı ve 1 kaynaktan meydana gelmektedir.

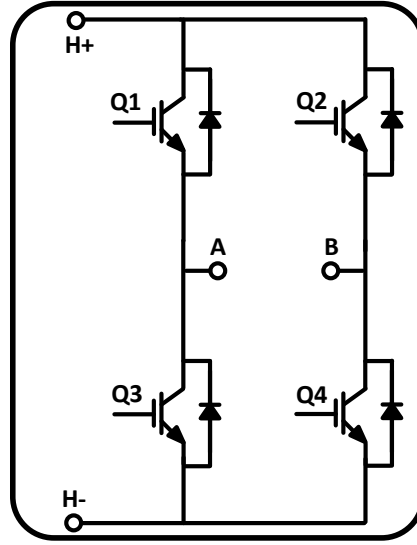


Şekil 3.1. Seviye modülü prensip şeması

##### 3.1.2. H-köprü modülü

Şekil 3.2’de H-köprü modülünün prensip şeması görülmektedir. H-köprü modülünün yapısı geleneksel H-köprü evirici yapısındadır. H-köprü modülü, çok seviyeli eviricinin sabit olan kısmıdır.

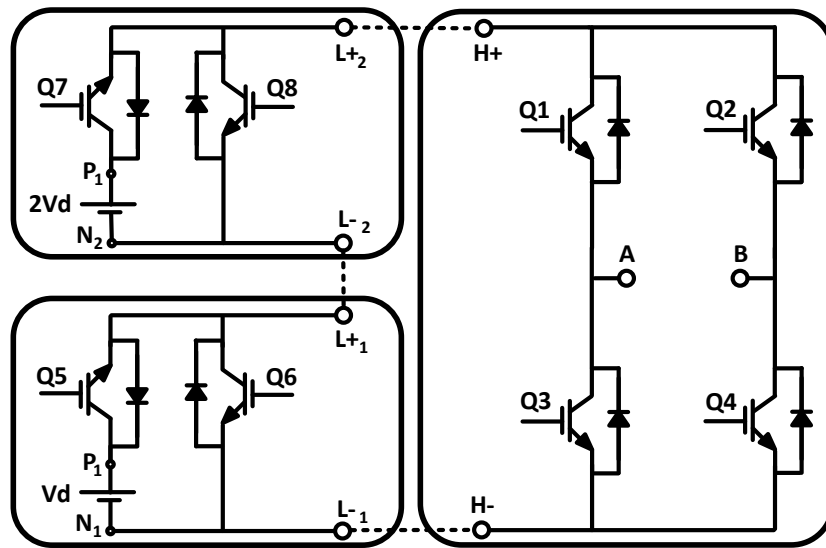




Şekil 3.2. H-köprü modülü prensip şeması

### 3.1.3. Kaskat bağlı yarım H-köprü çok seviyeli evirici

Şekil 3.3'te aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılacak kaskat bağlı çok seviyeli eviricinin prensip şeması görülmektedir. Evirici çıkış gerilimindeki seviyeler, temel olarak yarım H-köprü yapılarının birbirine seri olarak bağlanmasıyla elde edilmektedir. Eviricinin, seviye modülleri ve H-köprü modülü olmak üzere iki farklı kısımdan oluştuğu Şekil 3.3'ten görülebilmektedir. Eviricinin, 2 seviye modülüne sahip olduğu prensip şeması ile 7 seviyeli çıkış gerilimi elde edilebilmektedir [48].



Şekil 3.3. 7-seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü eviricinin prensip şeması

Burada,

$n$  : Çıkış gerilimi seviye sayısı

$m$  : Seviye modülü sayısı

$r$  : Anahtarlama elemanı sayısı

olmak üzere seviye modülü sayısına ( $m$ ) bağlı olarak elde edilebilecek en yüksek seviye sayısı,

$$n = 2^{(m+1)} - 1 \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) ile bulunmaktadır. Seviye modülü sayısına ( $m$ ) bağlı olarak devrede kullanılan anahtarlama elemanı sayısı ise,

$$r = 2m + 4 \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) ile hesaplanmaktadır [48].

Çıkış geriliminde istenilen seviye sayısı ve maksimum gerilim değerine göre birinci seviye modülünde kullanılacak kaynağın gerilimi ( $V_d$ ), Denklem (3.3) kullanılarak bulunmaktadır.  $V_d$  gerilimine, birinci seviye modülü gerilimi veya temel seviye gerilimi denmektedir. Birinci seviye modülünden sonra bağlanacak her seviye modülünde kullanılacak gerilim kaynağının değeri temel seviye geriliminin  $2^{(j-1)}$  katı olmaktadır [11].

$$V_d = \frac{2 \cdot V_{\max}}{n - 1} \quad (3.3)$$

Seviye sayısına bağlı olarak kullanılacak seviye modülü sayısı ( $m$ ) ise Denklem (3.4)'te görüldüğü gibi Denklem (3.1)'den çekilerek,

$$m = \lceil \log_2(n + 1) \rceil - 1 \quad (3.4)$$

şeklinde bulunabilmektedir. Her bir seviye modülünde bulunan kaynağın gerilimi ise  $2^{(j-1)} \cdot V_d$  olarak ifade edilmektedir. Burada  $j$ ,

$j = 1, 2, 3, \dots, m$  şeklinde tanımlanmaktadır [48].

Seviye modülü sayısına ( $m$ ) bağlı olarak çıkış gerilim seviye sayısı ( $n$ ), Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmaktadır. Tablo 3.1’de verilen modül sayısına bağlı olarak çıkış gerilimi seviye sayısı,  $m$  adet modül ile elde edilebilecek en yüksek seviye sayısını göstermektedir. İstenildiğinde veya gerektiğinde bu evirici tasarımı ile ara değerde seviye sayısı da elde edilebilmektedir. Örneğin, seviye modülü sayısı 5 olan bir evirici tasarımı ile en yüksek 63 seviyeli bir gerilim dalga şekli elde edilebildiği gibi 33, 37, 41, ..., 59, 61 seviyeli gerilim dalga şekilleri de elde edilebilmektedir. Tablo 3.1’deki anahtar sayıları incelendiğinde, seviye modülü sayısına bağlı olarak anahtarlama elemanı sayısı ( $r$ ), Denklem (3.2) sayesinde tasarlanacak her bir evirici için kolayca bulunabilmektedir [48].

Tablo 3.1. Çıkış gerilimi seviye sayısı ve anahtarlama elemanı sayısının seri bağlı seviye modüllerine göre değişimi

Seviye Modülü	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4	SM 5	...	SM ( $m$ )
Kaynak Oranı	$1.V_d$	$2.V_d$	$4.V_d$	$8.V_d$	$16.V_d$	...	$2^{(m-1)}.V_d$
	3						
	6						
		7					
		8					
			15				
Seviye Sayısı			10				
Anahtar Sayısı				31			
				12			
					63		
					14	...	
						...	$2^{(m+1)} - 1$
							$2m+4$

Literatürde yer alan çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtrelerinin, evirici biriminde kullanılan anahtarlama elemanı bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Kaskat bağlı yarım H-köprü evirici yapısında, aynı seviyeli çıkış gerilimi üretmek için diğer evirici

yapılarına göre daha az anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Başka bir açıdan bakıldığında, belirli bir anahtarlama elemanı karşılaştırma için kullanıldığında kaskat yarım H-köprü evirici yapısı ile daha fazla seviye elde edilebilmektedir. Tablo 3.2’de, diyot kenetlemeli ve flying kapasitörlü çok seviyeli evirici topolojilerinde anahtarlama elemanlarından başka çok sayıda kenetleme diyodu ve kapasitörlere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Kaskat bağlı H-köprü eviriciler simetrik ve asimetrik olarak sınıflandırılmaktadır. Kaskat bağlı modüllerdeki gerilim kaynağının değeri eşit ise evirici simetrik kaskat bağlı H-köprü evirici olarak adlandırılır. En az bir modüldeki gerilim kaynağının değeri diğer modüllerinkinden farklı ise evirici asimetrik yapıdadır. Tablo 3.2’deki yer alan Kaskat-1 topolojisi simetrik kaskat bağlı H-köprü evirici yapısındadır. Kaskat-2 topolojisi, kaskat bağlı modüllerinde biri diğerinin iki katı olacak şekilde gerilim kaynaklarına sahiptir. Kaskat-3 topolojisi ise, dönüştürme oranı üçün katları olan transformatörlere sahip olan asimetrik kaskat bağlı H-köprü eviricidir.

Tablo 3.2. Seviyeli sayısı (n) olan çok seviyeli eviricilerin karşılaştırılması

Topoloji	Anahtarlama elemanı sayısı	Kenetleme diyotları sayısı	Flying Kapasitör sayısı
Diyot kenetlemeli	$2(n-1)$	$(n-1)(n-2)$	0
Flying kapasitörlü	$2(n-1)$	0	$(n-1)(n-2)/2$
Kaskat -1	$2(n-1)$	0	0
Kaskat -2	$4\log_2(n+1)-4$	0	0
Kaskat -3	$4\log_3(n)$	0	0
Önerilen	$2\log_2(n+1)+2$	0	0

Tablo 3.3’te, önerilen topoloji ile farklı topolojilere sahip kaskat bağlı H-köprü eviricilerin modül sayısına bağlı olarak ayrıntılı bir karşılaştırması yapılmıştır. Örneğin, modül sayısı 4 olan evirici topolojileri göz önüne alındığında Kaskat-1, Kaskat-2 ve Kaskat-3 topolojileri 16 anahtarlama elemanı kullanmaktadır. Buna karşın, Kaskat-1 topolojisinde 9, Kaskat-2 topolojisinde 31 ve Kaskat-3 topolojisinde ise 81 seviyeli çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Önerilen yapıda ise modül sayısı 4

olarak seçildiğinde 14 anahtarlama elemanı ile 63 seviyeli çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Ancak, 16 anahtarlama elemanı yapılan karşılaştırma için dikkate alındığında önerilen evirici topolojisi ile 127 seviyeye ulaşılabilir.

Tablo 3.3. Seviyeli modülü sayısı (m) olan çok seviyeli eviricilerin karşılaştırılması

Topoloji	Seviye sayısı (n)		Seviye modülü sayısı (m)						
	Anahtarlama elemanı		2	3	4	5	6	...	m
Kaskat-1	n		5	7	9	11	13	...	$2m+1$
	r		8	12	16	20	24	...	$4m$
Kaskat-2	n		7	15	31	63	127	...	$2^{(m+1)}-1$
	r		8	12	16	20	24	...	$4m$
Kaskat-3	n		9	27	81	243	729	...	$3^m$
	r		8	12	16	20	24	...	$4m$
Önerilen	n		7	15	31	63	127	...	$2^{(m+1)}-1$
	r		8	10	12	14	16	...	$2m+4$

Aktif güç filtrelerinde kullanılan diğer çok seviyeli eviricilere kıyasla daha az anahtarlama elemanı kullanıldığından, önerilen çok seviyeli evirici topolojisinin iletim kayıplarının daha az olduğu söylenebilir. Bu da, sistem veriminin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, orta ve yüksek gerilim uygulamalarında, anahtarlama elemanı sayısının az olması evirici maliyetini düşürecektir.

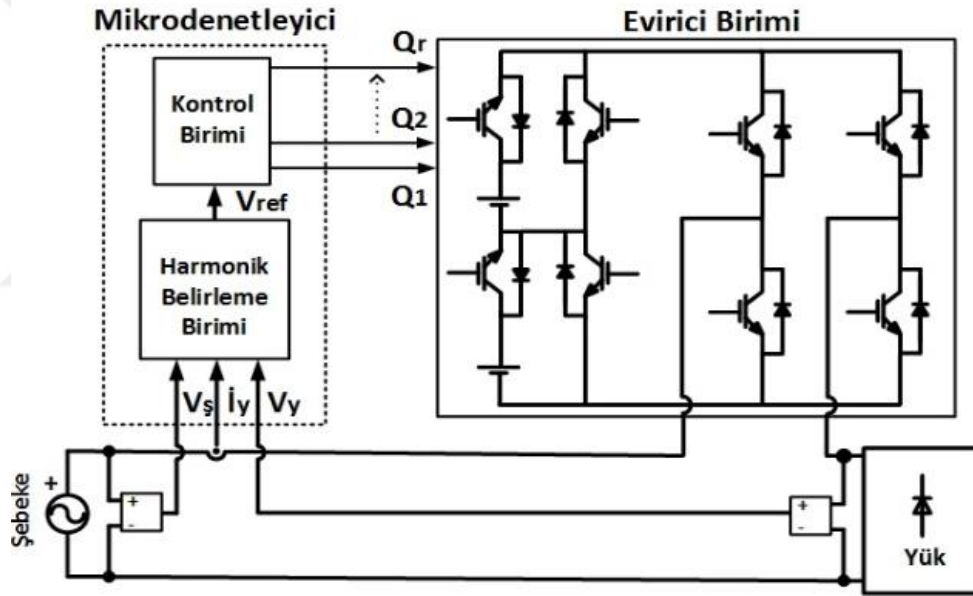
### 3.2. Seri Aktif Güç Filtresi

Paralel aktif güç filtreleri, çokça kullanılmasına rağmen yüksek kapasiteleri (yük kapasitesinin % 30-60) nedeniyle pahalı olmaları, rezonans meydana geldiğinde filtreleme işlemini gerçekleştirememesi ve yüksek gerilim sistemlerinde kullanımlarının zor olması gibi sınırlamaları mevcuttur [26-28, 53, 54]. Performansları akım harmoniği üreten yüklerde gerilim harmoniği üreten yüklere göre daha iyidir. Seri aktif güç filtreleri gerilim harmoniklerini yok etme konusunda daha etkindir. Gerilim harmonikleri dışında gerilim dalgalanmaları ve gerilim çökmeleri gibi güç

kalitesi problemlerinin giderilmesi için de kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda, filtre kapasitesini düşürmesi ve fonksiyonel olması nedeniyle seri hibrit aktif güç filtreleri popüler hale gelmiştir [17, 29-33]. Ayrıca, gerilim harmoniklerini yok etmek fotokopi, faks makinaları, floresan lambalar ve iklimlendirme cihazlarının kullanımının artması ile birlikte önem kazanmıştır [29].

Filtre çıkış dalga şeklinin üretilebilmesi için, kaynak gerilimi ile yük akımı ölçümleri anlık olarak kullanılmaktadır. Belirlenen referans sinyal, kontrol biriminde işlenerek evirici tetikleme sinyalleri oluşturulmaktadır.

Şekil 3.4’de seri AGF uygulaması için kullanılacak kaskat bağlı çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtresine ait prensip şeması verilmiştir.



Şekil 3.4. Seri aktif güç filtresi prensip şeması

Daha önce belirtildiği gibi düşük THB değerlerine sahip çıkış gerilimi dalga şekli, filtrede kullanılan çok seviyeli evirici ile kolaylıkla üretilebilmektedir. Bununla beraber, kullanılacak çok seviyeli evirici harmonik bileşenler içeren herhangi bir gerilim dalga şeklini üretme yeteneğine de sahiptir. Bu özelliği ile evirici, harmonik gerilim kaynağı gibi davranmaktadır.

Seri aktif güç filtresi ile sinüzoidal olmayan bir gerilim kaynağının güç sisteminde neden olacağı gerilim harmonikleri filtrelenebileceği gibi, doğrusal olmayan yüklerin çekeceği harmonik akımlardan dolayı ortak bağlantı noktasında oluşacak harmonikli

bir gerilimle beslenen başka bir yükün harmonikleri de filtrelenebilir. Bu amaçla, ilk olarak dijital kontrolör olarak kullanılan mikrodenetleyici yardımıyla ortak bağlantı noktası (PCC) gerilimi  $V_{PCC}$  örneklenir. Örneklenen  $V_{PCC}$  geriliminin temel harmonik bileşeni ( $V_1$ ), harmonik belirleme biriminde gerçekleştirilen frekans domeni tabanlı Fourier dönüşümü yöntemi ile bulunur. Bu yöntem, Denklemler (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8) yardımıyla ifade edilir;

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{2}{T} \int_0^T V_{PCC}(t) \cos(\omega t) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{PCC}(t) \cos(\omega t) dt \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{2}{T} \int_0^T V_{PCC}(t) \sin(\omega t) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{PCC}(t) \sin(\omega t) dt \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$V_1 = \sqrt{(A_1^2 + B_1^2)} \quad (3.7)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{B_1}{A_1}\right) \quad (3.8)$$

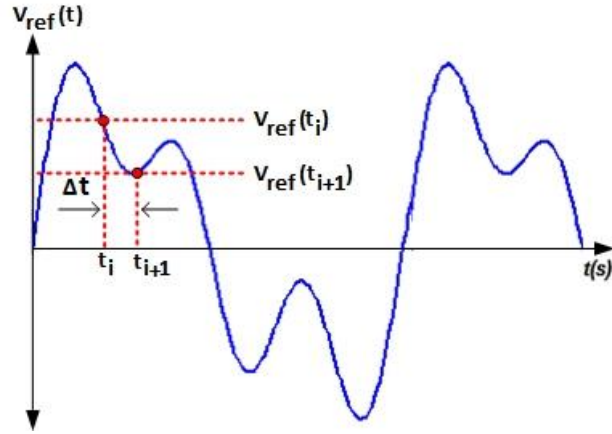
Daha sonra,  $V_{PCC}$  gerilimindeki temel harmonik bileşen hariç diğer tüm harmonik bileşenlerin toplamı ( $V_{hpcc}$ ), Denklem (3.9) kullanılarak elde edilir;

$$\begin{aligned} V_{hpcc} &= \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ &= V_{PCC} - V_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Denklem (3.10)' da görüldüğü gibi elde edilen bu gerilimin ( $V_{hpcc}$ ) negatif değeri, önerilen aktif güç filtresi sistemine ait referans çıkış gerilimini ( $V_{ref}$ ) vermektedir.

$$V_{ref} = -V_{hpcc} \quad (3.10)$$

Şekil 3.5'te, seri AGF'ye ait örnek bir referans çıkış gerilimi dalga şekli görülmektedir.



Şekil 3.5. Seri AGF'ye ait örnek referans çıkış gerilimi dalga şekli

Anahtarlama sinyallerinin tarama hızı ( $\Delta t$ ) istenilen referans gerilimin elde edilebilmesi için yeteri kadar küçük seçilmelidir. Tarama hızı, Denklem (3.11)'deki görüldüğü üzere temel frekansa ve seviye modülü sayısına bağlıdır. Örnekleme zamanının, maksimum tarama hızına oranla çok küçük seçilmesi dikkat edilmesi gereken bir durumdur [18, 19].

$$t_{\max} = \sin^{-1} \left( \frac{1}{2^{(m+1)-2}} \right) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_f)^{-1} \quad (3.11)$$

$$t_{\text{sample}} = \Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (3.12)$$

$$t_{\text{sample}} \ll t_{\max} \quad (3.13)$$

$t_{\text{sample}}$  parametresinin optimal olarak belirlenmesinden sonra Denklem (3.10)'da yer alan referans gerilimi ( $V_{\text{ref}}$ ), Denklem (3.14)'te yerine yazılarak  $j=1, 2, 3, \dots, m$  için S değerleri hesaplanır. Bulunan S değerleri, Denklem (3.15) ve (3.16)'da yerine konularak seviye modülleri için anahtarlama sinyalleri elde edilir;

$$S_{2j+3}(t) = \left[ \frac{V_{\text{ref}}(t) - (V_{\text{ref}}(t) \bmod 2^{j-1})}{2^{j-1}} \right] \bmod 2 \quad (3.14)$$

$$Q_{2j+3}(t) = \begin{cases} 0, & (V_1 \geq 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h \geq 0) \\ 0, & (V_1 < 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h < 0) \\ S_{2j+3}(t), & (V_1 \geq 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h < 0) \\ S_{2j+3}(t), & (V_1 < 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h \geq 0) \end{cases} \quad (3.15)$$



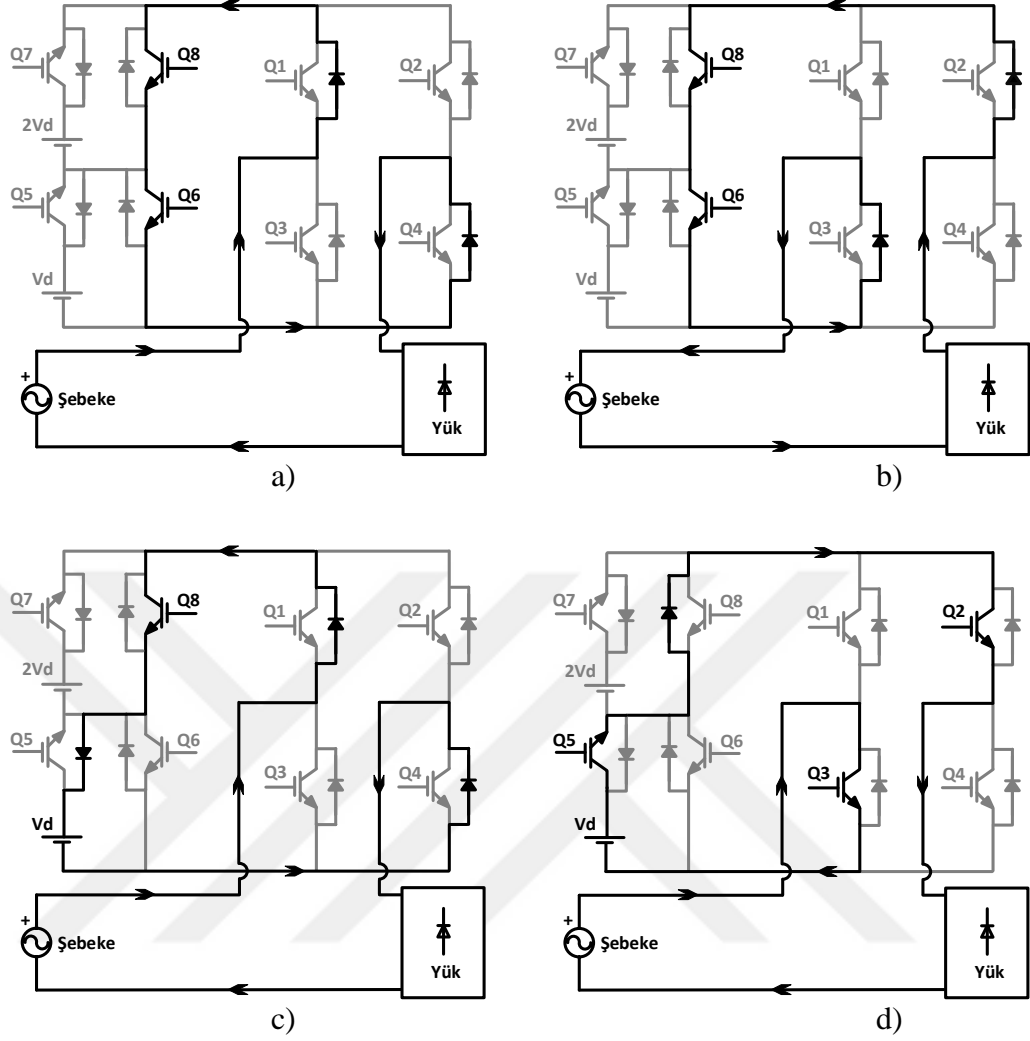
$$Q_{2j+4}(t) = \begin{cases} \overline{S_{2j+3}(t)}, & (V_1 \geq 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h \geq 0) \\ \underline{S_{2j+3}(t)}, & (V_1 < 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h < 0) \\ 0, & (V_1 \geq 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h < 0) \\ 0, & (V_1 < 0 \wedge \sum_{h=2}^{\infty} V_h \geq 0) \end{cases} \quad (3.16)$$

Kaskat bağılı çok seviyeli eviricinin seri AGF uygulaması için düzenlenen çalışma prensibi, Şekil 3.6 ve Tablo 3.4 yardımıyla ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Çıkış geriliminde 7 seviye elde etmek için yapılan anahtarlama Tablo 3.4'de gösterilmektedir. Bu anahtarlama durumlarını gösteren çalışma durumlarına ait topolojiler ise Şekil 3.6'de yer almaktadır.

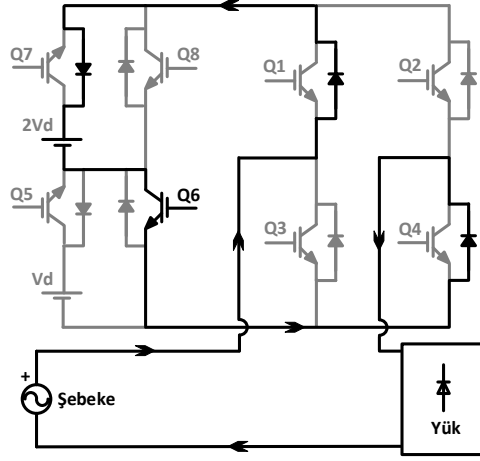
7 seviyeli seri AGF uygulamasında tüm seviye durumları için gerekli anahtarlama sinyalleri Tablo 3.4'de verilmiştir. Şekil 3.6'de, Tablo 3.4'de belirtilen tüm anahtarlama durumlarını gösteren topolojiler yer almaktadır.

Tablo 3.4. Anahtarlama durumlarına göre oluşan çıkış gerilimi seviyeleri

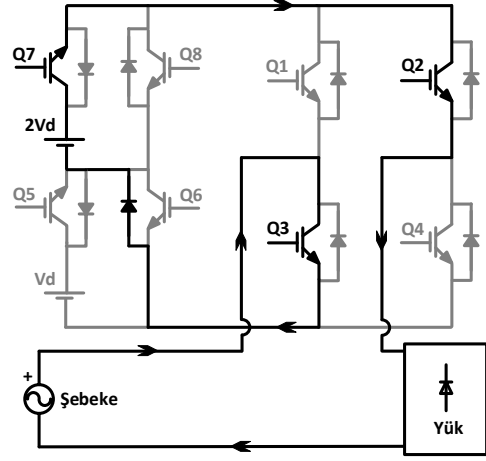
Anahtarlama Elemanları					
V1<0, ΣVh<0			V1≥0, ΣVh<0		
D2-D3			Q2-Q3		
0.Vd	Q8	Q6	D8	D6	0.Vd
-1.Vd	Q8	D5	D8	Q5	1.Vd
-2.Vd	D7	Q6	Q7	D6	2.Vd
-3.Vd	D7	D5	Q7	Q5	3.Vd
D1 - D4			Q1-Q4		
V1≥0, ΣVh≥0			V1<0, ΣVh≥0		



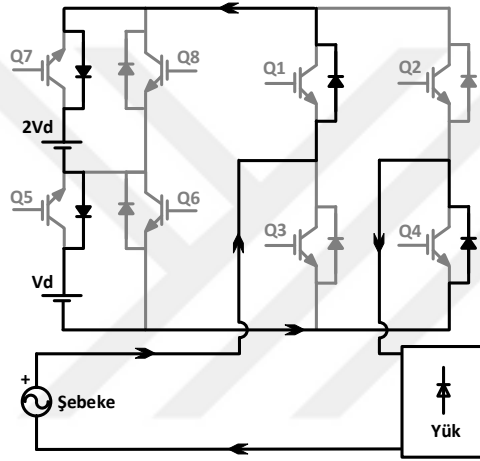
Şekil 3.6. Seri aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici bloğunun tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), b)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), c)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), d)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), e)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), f)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), g)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), h)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), i)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), j)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), k)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), l)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), m)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), n)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), o)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), p)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ )



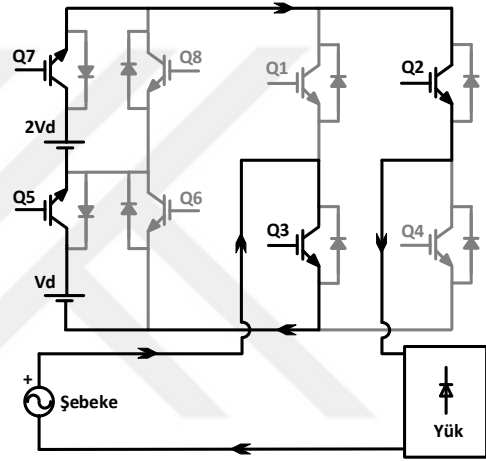
e)



f)

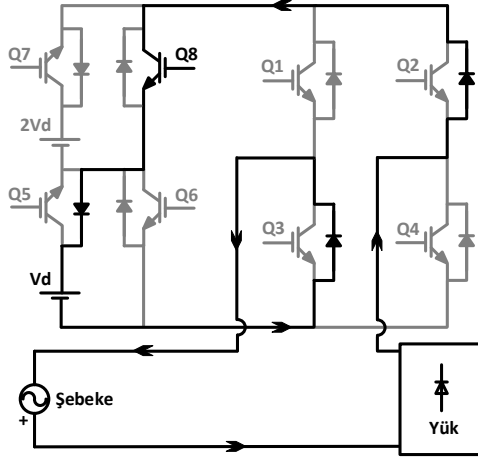


g)

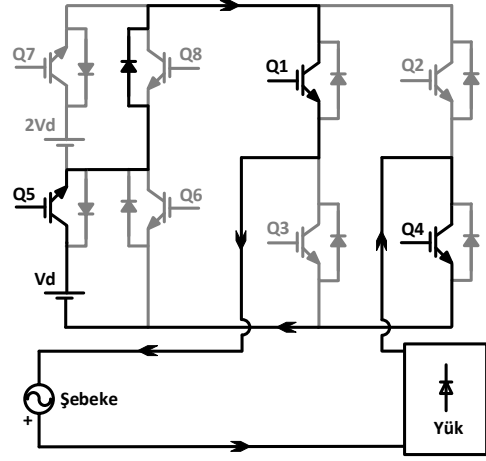


h)

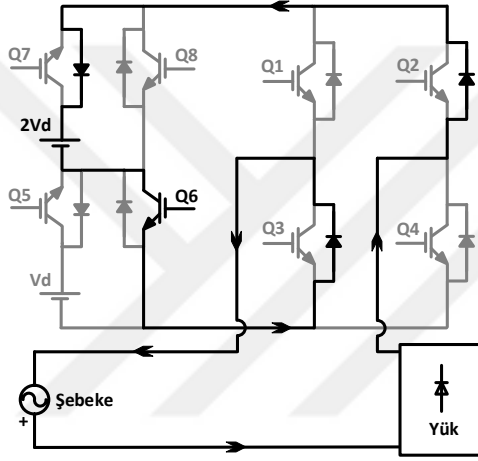
Şekil 3.6. (Devam) Seri aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici bloğunun tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), b)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-0$ ), c)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), d)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), e)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), f)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), g)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), h)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), i)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), j)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), k)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), l)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), m)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), n)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), o)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), p)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ )



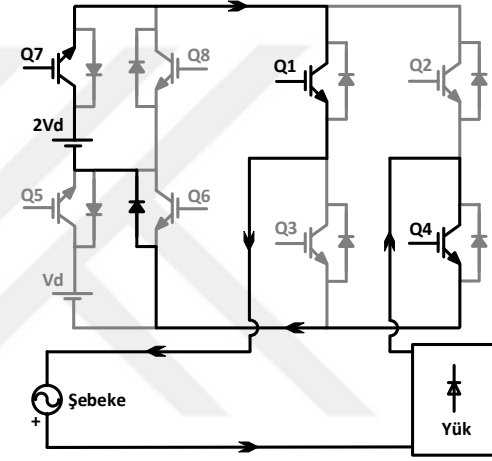
i)



j)

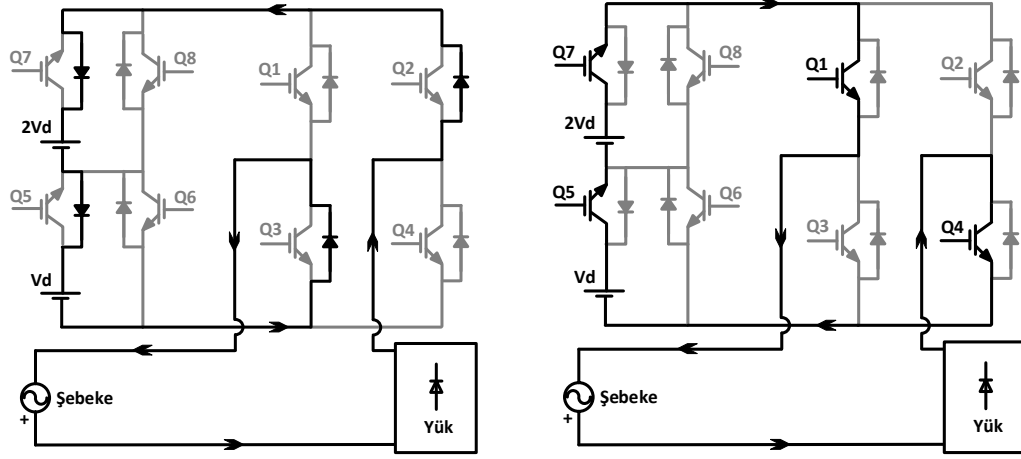


k)



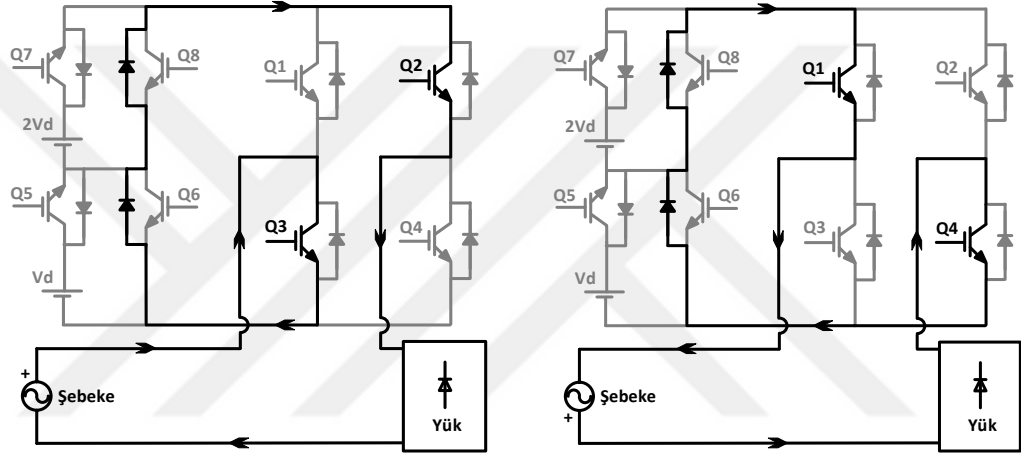
l)

Şekil 3.6. (Devam) Seri aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici bloğunun tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), b)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-0$ ), c)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), d)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), e)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), f)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), g)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), h)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), i)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), j)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), k)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), l)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), m)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), n)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), o)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), p)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ )



m)

n)



o)

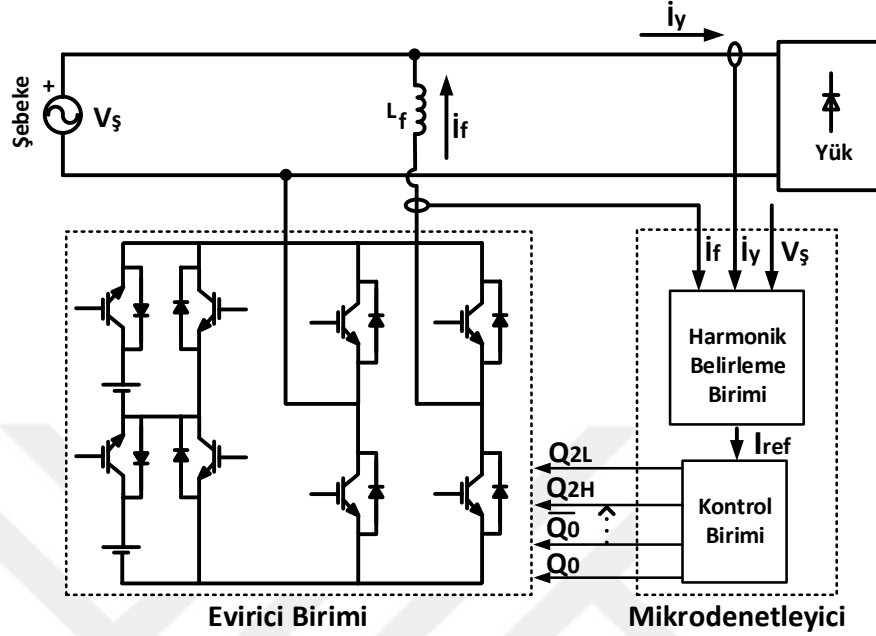
p)

Şekil 3.6. (Devam) Seri aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici bloğunun tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), b)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), c)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), d)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), e)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), f)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), g)  $V_1 \geq 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), h)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), i)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-V_d$ ), j)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=V_d$ ), k)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-2V_d$ ), l)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=2V_d$ ), m)  $V_1 < 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=-3V_d$ ), n)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=3V_d$ ), o)  $V_1 \geq 0, \sum V_h < 0$  ( $V_{inverter}=0$ ), p)  $V_1 < 0, \sum V_h \geq 0$  ( $V_{inverter}=0$ )

### 3.3. Paralel Aktif Güç Filtresi

Paralel aktif güç filtreleri, güç kalitesi problemi olan akım harmoniklerinin filtrelenmesi, dengesizliklerin giderilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır [1]. Filtre çıkış geriliminin ( $V_F$ ) üretilebilmesi için, şebeke gerilimi ile yük akımı ölçümleri anlık olarak

kullanılmaktadır. Belirlenen referans sinyal, kontrol biriminde işlenerek evirici anahtarlama sinyalleri oluşturulmaktadır.



Şekil 3.7. Paralel aktif güç filtresi prensip şeması

Paralel AGF uygulamasında, doğrusal olmayan yük ile şebekeye paralel bağlanan AGF Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Burada, evirici bloğundan 1. harmonik bileşen dışındaki harmonikleri elimine etmesi beklenmektedir. Bu harmonik bileşenler, eviricinin referans sinyalini oluşturmaktadır. Şebeke akımının sinüzoidal olması için, paralel AGF yükün gereksinim duyduğu harmonik akımların toplamını sisteme enjekte etmektedir. Bu durum, Denklem (3.17) ve Denklem (3.18) ile ifade edilmiştir;

$$I_y = I_1 + \sum_2^h I_h \quad (3.17)$$

$$I_ş = I_y - I_f$$

$$I_ş = \left( I_1 + \sum_2^h I_h \right) - \sum_2^h I_h = I_1 \quad (3.18)$$

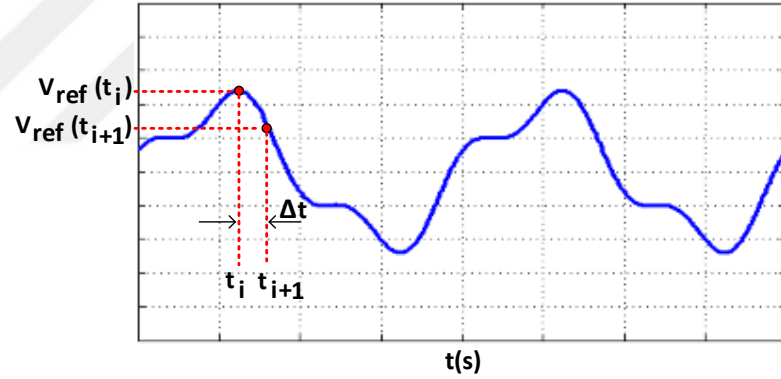
Şekil 3.7’de gösterilen evirici yapısı ile seviye sayısı kolaylıkla arttırılabilmekte ve bu sayede düşük THB değerine sahip evirici çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Aynı zamanda, bu topoloji ile çıkışta istenilen harmonik bileşenlere sahip gerilim dalga şekli de üretilebilmektedir. Anahtarlama sinyallerinin elde edilmesi amacıyla geliştirilen

denetim algoritması ile bu çıkış gerilimi kolaylıkla oluşturulmaktadır. Bu amaçla, öncelikle istenilen harmonik bileşenleri içinde barındıran referans gerilim sinyalinin tanımlanması gerekmektedir [55]. Tüm harmonik bileşenlerin olduğu referans gerilim Denklem (3.19)'deki gibi tanımlanmaktadır;

$$V_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{dc}}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (3.19)$$

Referans gerilim sinyali, harmonik belirleme birimi tarafından bulunmaktadır. Geliştirilen denetim algoritmasını anlatmak amacıyla 1. ve 3. harmonik bileşene sahip örnek bir referans gerilim sinyali seçilmiştir. Seçilen örnek referans gerilim sinyalinin zamana göre değişimi Şekil 3.8'de, bu değişime ait matematiksel tanım ise Denklem (3.20)'de verilmiştir;

$$V_{\text{ref}} = V_1 \sin(\omega t) + V_3 \sin(3\omega t + \phi) \quad (3.20)$$



Şekil 3.8. Örnek referans gerilim sinyalinin zamana göre değişimi

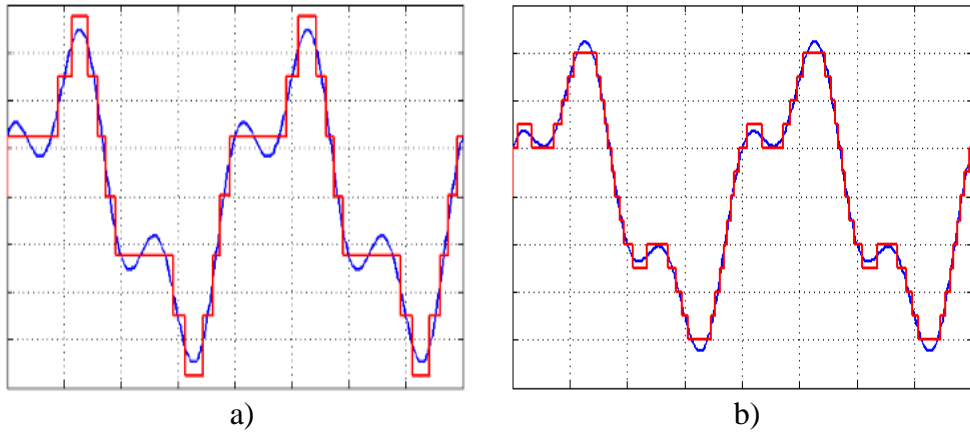
Şekil 3.8'da görülen  $\Delta t$ , anahtarlama sinyallerinin örnekleme zamanını tanımlamaktadır. Örnekleme zamanı ne kadar küçük seçilirse elde edilen çıkış gerilimi, referans gerilim sinyaline o kadar çok benzemektedir. Örnekleme zamanı, çıkış gerilimi temel harmoniğinin frekansı ve seviye modül sayısına bağlı olarak değişmektedir. Denklem (3.11)'deki eşitlik kullanılarak temel harmoniğinin frekansı ve seviye modülü sayısına bağlı olarak örnekleme zamanının maksimum değeri ( $t_{\text{max}}$ ) bulunabilmektedir. Evirici çıkış geriliminin referans gerilim sinyaline yakın çıkmasının istenildiği durumlarda örnekleme zamanı,  $t_{\text{max}}$  değerine göre oldukça küçük seçilmelidir [55].

Referans gerilim sinyalinin ( $V_{ref}$ ) anlık değerleri için anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Sistemde kullanılan kontrollü yarı-iletken güç elemanlarının anahtarlama sinyallerine ait denklem, seviye modülü sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi genelleştirilebilir;

$$Q_{(j-1)}(t) = \left\{ \begin{array}{l} j=1 \rightarrow V_{ref}(t) \bmod 2 \\ j > 1 \rightarrow \left( \frac{V_{ref}(t) - (V_{ref}(t) \bmod 2^{(j-1)})}{2^{(j-1)}} \right) \bmod 2 \end{array} \right\} \quad (3.21)$$

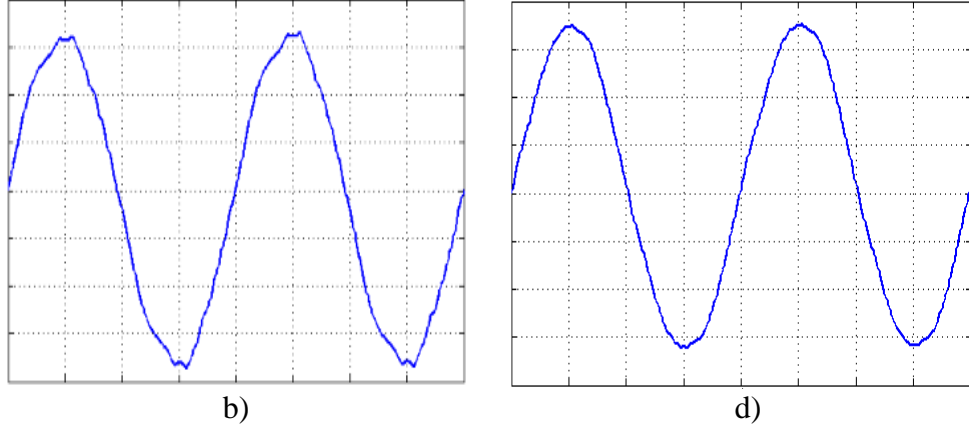
Denklem (3.21) kullanılarak, eviricinin seviye modüllerinde kullanılan kontrollü yarı-iletken güç anahtarlarının anahtarlama sinyalleri kolaylıkla elde edilmektedir. Her seviye modülünde iki adet anahtarlama elemanı bulunmakta ve bu anahtarlama elemanları birbirlerinin evriği olacak şekilde çalıştırılmaktadır.

Elde edilen anahtarlama sinyalleri ile referans gerilim sinyaline benzer bir çıkış gerilimi üretilebilmektedir. Denklem (3.21) kullanılarak oluşturulan anahtarlama sinyallerinin anahtarlama elemanlarına uygulanması sonucunda üretilen evirici çıkış geriliminin zamana göre değişimi şekil 3.9'da görölmektedir. şekil 3.9'da verilen evirici çıkış geriliminin değişimi, seviye modülü sayısının arttırılmasıyla referans gerilim sinyaline daha çok benzetilebilmektedir.



şekil 3.9. Dalga şekillerinin zamana göre değişimi, a)Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 2 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=2$ ), c) Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, d) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=3$ )

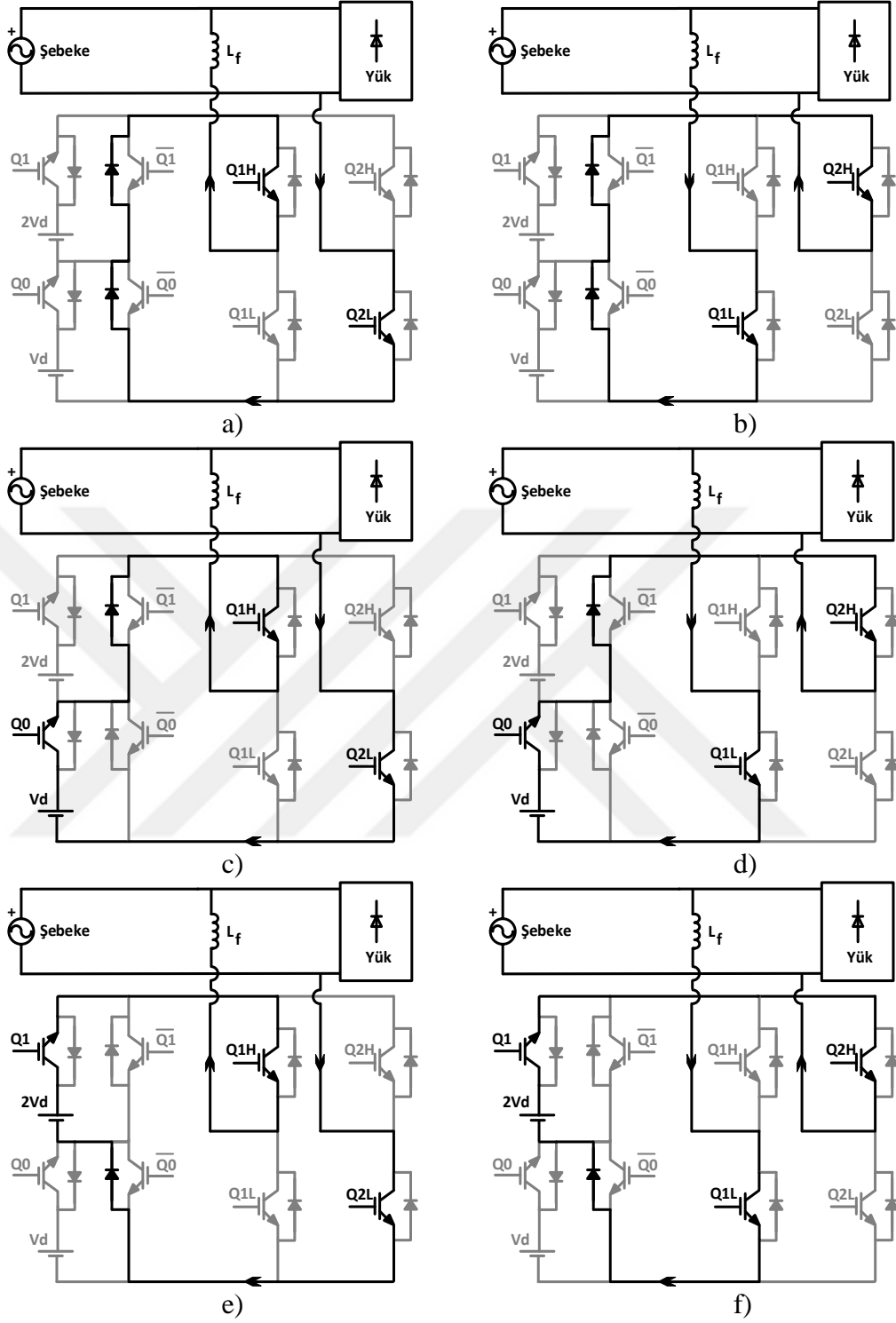




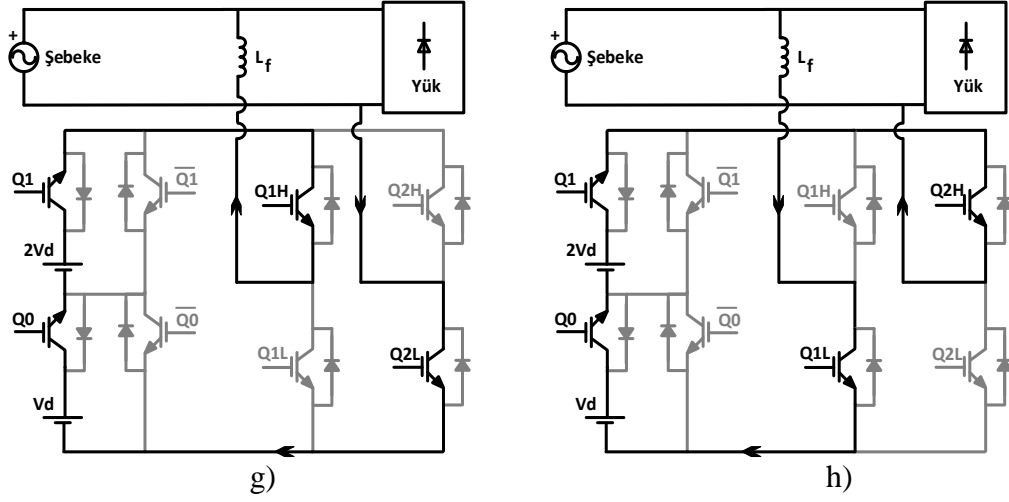
Şekil 3.9.(Devam) Dalga şekillerinin zamana göre değişimi, a)Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 2 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=2$ ), c) Referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, d) filtrelenmiş şebeke akımı ( $m=3$ )

Evirici çıkış geriliminin belirlenen referans sinyale yakınsaması paralel aktif güç filtresinin harmonik filtreleme kabiliyetini arttırmaktadır. Örneğin, Şekil 3.9'de verilen evirici çıkış gerilimi ile şebeke akımındaki %30'luk THB değeri %3.8'e indirilmişken ( $m=2$ ), bu değer 3 seviye modülü kullanılarak %2.4'e getirilmiştir. Harmonik filtreleme işleminden sonra elde edilen şebeke akımlarının zamana göre değişimleri de Şekil 3.9b ve Şekil 3.9d'de görülmektedir.

Geliştirilen denetim algoritması sayesinde çıkışında istenilen gerilim dalga şeklini üretme yeteneğine sahip çok seviyeli eviricinin, bir paralel aktif güç filtresi uygulamasındaki tüm çalışma durumlarını içeren topolojiler Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu uygulamaya ait sonuçlara simülasyon çalışmasında yer verilmiştir.



Şekil 3.10. Paralel aktif güç filtresi uygulamasında 7-seviyeli evirici biriminin tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_S > 0$ ,  $V_F = 0$ , b)  $V_S < 0$ ,  $V_F = 0$ , c)  $V_S > 0$ ,  $V_F = V_d$ , d)  $V_S < 0$ ,  $V_F = -V_d$ , e)  $V_S > 0$ ,  $V_F = 2V_d$ , f)  $V_S < 0$ ,  $V_F = -2V_d$ , g)  $V_S > 0$ ,  $V_F = 3V_d$ , h)  $V_S < 0$ ,  $V_F = -3V_d$



Şekil 3.10. (Devam) Paralel aktif güç filtresi uygulamasında 7 seviyeli evirici biriminin tüm çalışma durumlarını gösteren topolojiler a)  $V_S > 0, V_F = 0$ , b)  $V_S < 0, V_F = 0$ , c)  $V_S > 0, V_F = V_d$ , d)  $V_S < 0, V_F = -V_d$ , e)  $V_S > 0, V_F = 2V_d$ , f)  $V_S < 0, V_F = -2V_d$ , g)  $V_S > 0, V_F = 3V_d$ , h)  $V_S < 0, V_F = -3V_d$

#### **4. TASARLANAN AKTİF GÜÇ FİLTRESİ HARMONİK FİLTRELEME PERFORMANSININ SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARI**

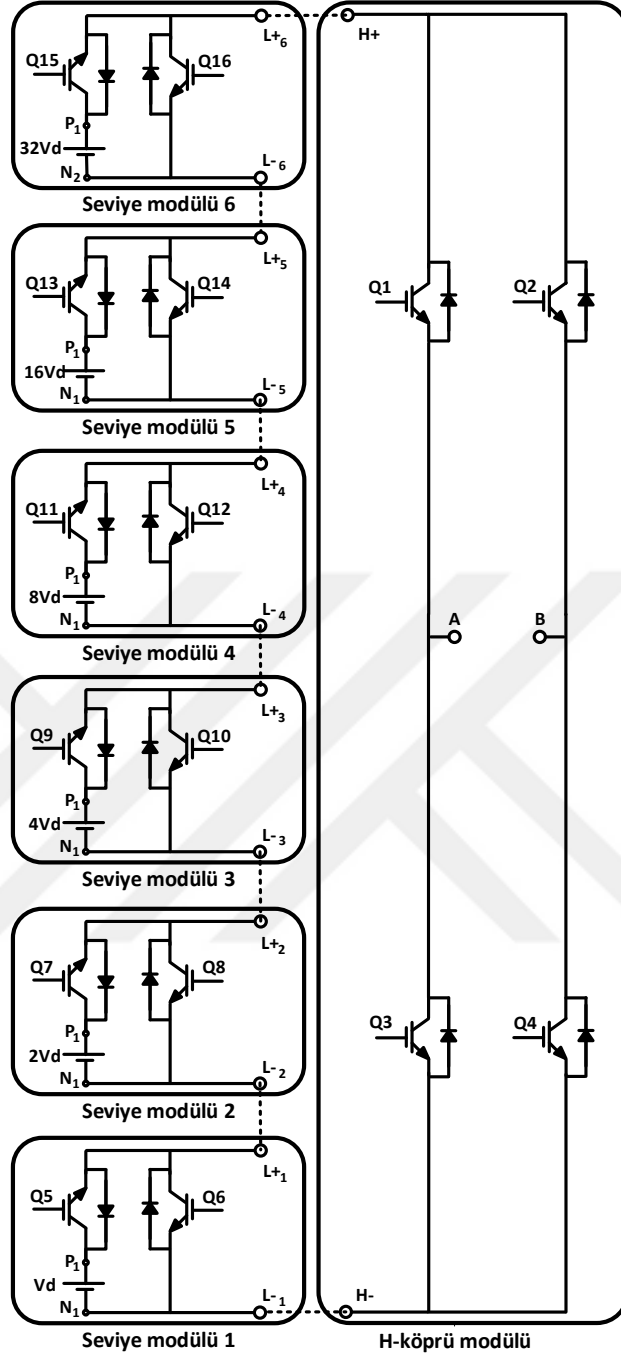
Bu bölümde, aktif güç filtresi uygulamasında kullanılmak üzere tasarımı gerçekleştirilen çok seviyeli evirici birimi tanıtılmıştır. Seri ve paralel aktif güç filtresi uygulamaları farklı harmonik bozunuma sahip yükler açısından incelenmiş olup ele alınan her yük durumunda, farklı çıkış gerilim seviyelerine sahip eviriciler kullanılarak seviye modülü sayısının aktif güç filtresi harmonik filtreleme performansına etkisi de belirlenmiştir.

##### **4.1. Tasarlanan Aktif Güç Filtresi Prototipinin Tanıtılması**

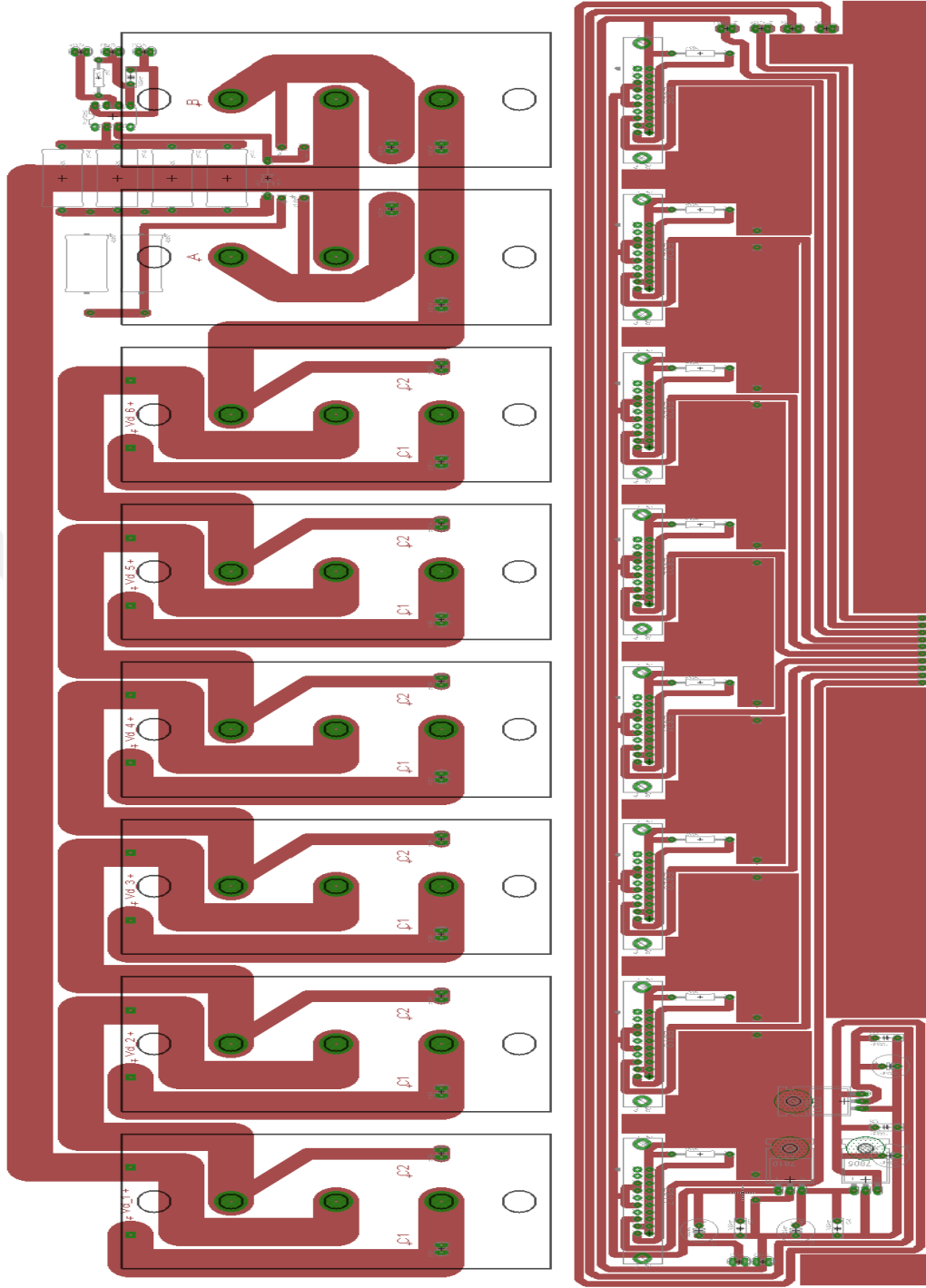
Aktif güç filtresi uygulamasında kullanılmak üzere tasarımı gerçekleştirilen çok seviyeli eviriciye ait prensip devre şeması Şekil 4.1’de görülmektedir. 6 adet seviye modülüne sahip olan evirici ile çıkış geriliminde en fazla 127 seviye elde edilebilmektedir.

Şekil 4.2’de tasarlanan çok seviyeli eviricinin güç katı devresi ile işlemci-IGBT sürücü devreleri arayüzüne ait baskı devre şemaları görülmektedir.

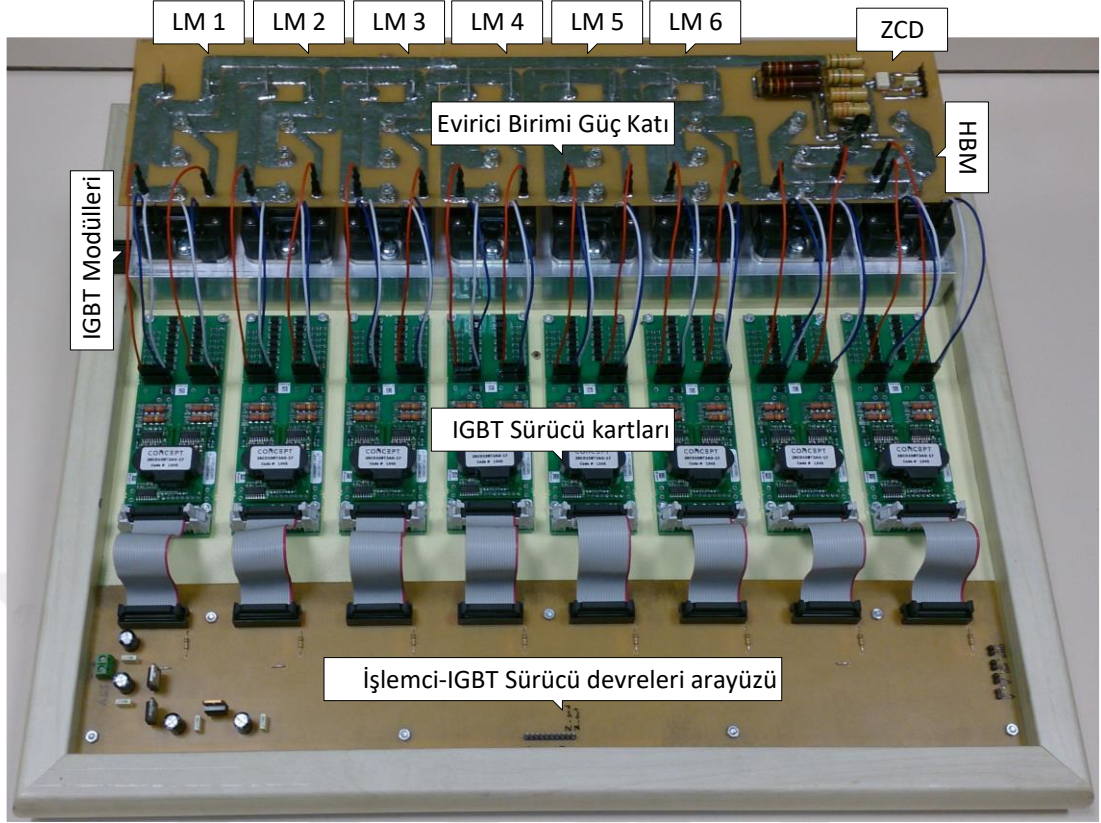
Şekil 4.3’te tasarlanan çok seviyeli evirici prototipinin fotoğrafı görülmektedir. Tasarlanan çok seviyeli evirici temel olarak iki modülden oluşmaktadır. Bu modüller, seviye modülü (SM) ve H-köprü modülü (HM) olarak adlandırılmaktadır. Seviye modüllerinin sayısı artırılarak, çok seviyeli eviricinin seviye sayısı kolaylıkla arttırılmaktadır. Şekil 4.1’den de kolaylıkla anlaşılacağı üzere, evirici yapısının en önemli özelliği genişlemeye oldukça müsait olmasıdır. Gerçeklenen evirici biriminde 6 adet seviye modülü bulunmaktadır. 6 adet seviye modülü bulunan yapı ile 127 seviyeli çıkış gerilimi elde edilmektedir. 6 seviye modülü olan bu evirici biriminde toplamda 16 adet anahtarlama elemanı bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Tasarlanan çok seviyeli eviriciye ait prensip devre şeması



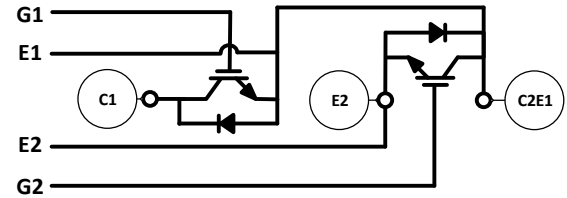
Şekil 4.2. Tasarlanan çok seviyeli eviricinin güç katı devresi ile işlemci-IGBT sürücü devreleri arayüzüne ait baskı devre şemaları



Şekil 4.3. Tasarlanan evirici birimi prototipinin fotoğrafı

#### 4.1.1. Seviye modülü (SM)

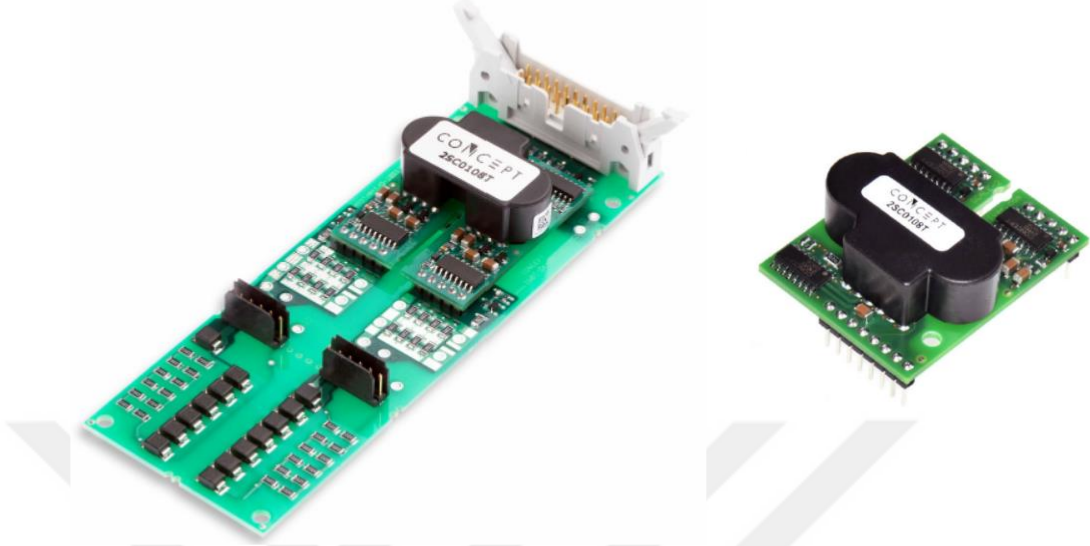
Şekil 4.3'te görülen her bir seviye modülü (SM), 2 anahtarlama elemanı ve 1 gerilim kaynağından meydana gelmektedir. Anahtarlama elemanı olarak Mitsubishi firmasının CM150DY-24A IGBT modülü kullanılmıştır. Bu modüle ait bir fotoğraf, devre şeması ile birlikte Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. CM150DY-24A IGBT modülü ve devre şeması

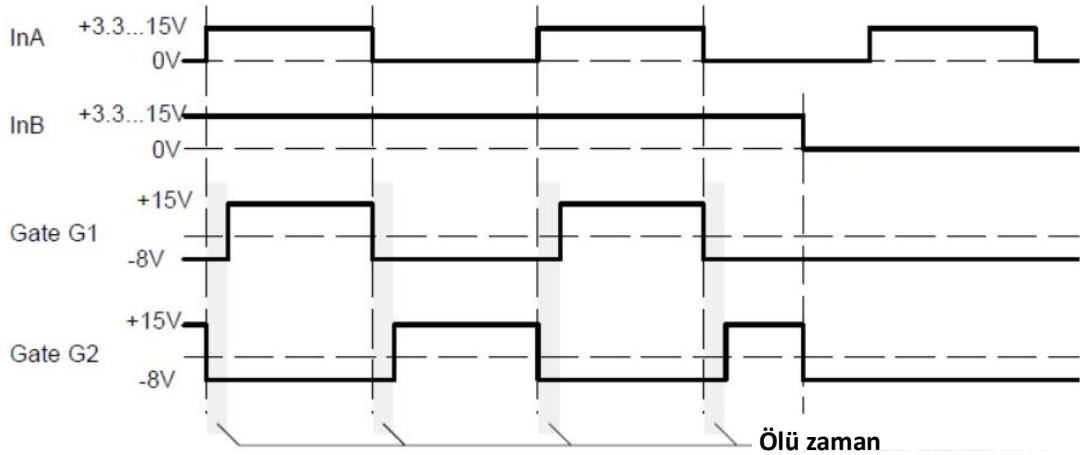
Aktif güç filtresi kontrol birimi tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT modüllerin sürülmesi için IGBT sürücüler (CONCEPT 2SC0108T) kullanılmıştır. Bu

sürücüler Şekil 4.5'te görüldüğü üzere CONCEPT 2BB0108T2A0-12 kartlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 4.5. CONCEPT sürücü kartı ve sürücü modül fotoğrafı

Bu çalışmada, IGBT sürücü kartı yarım-köprü modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman (dead time) otomatik olarak üretilmektedir. Şekil 4.6'da IGBT sürücü kartı ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 4.6. IGBT sürücü ile üretilen kapı sinyalleri

#### 4.1.2. H-köprü modülü (HM)

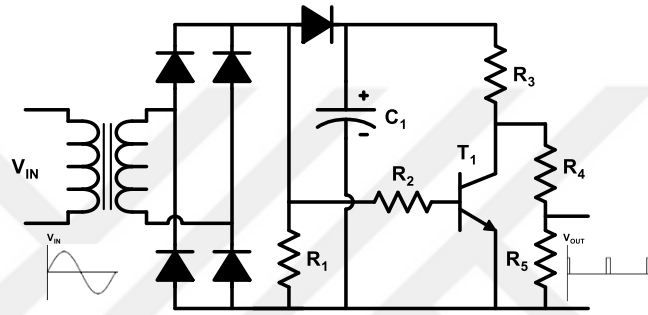
H-köprü modülünün yapısı geleneksel H-köprü evirici yapısıdır. H-köprü modülü (HM) güç katında anahtarlama elemanı olarak Mitsubishi firmasının CM150DY-24A



IGBT modülü kullanılmıştır. Seviye sayısını arttırmak amacıyla Şekil 4.1’de görüldüğü gibi geleneksel H-köprü yapıya seviye modülleri seri olarak bağlanmaktadır.

#### 4.1.3. Sıfır geçiş algılama devresi

Aktif güç filtresinin şebeke ile senkronizasyonunu sağlamak amacıyla bir sıfır geçiş algılama devresi (Zero Crossing Detector-ZCD) tasarlanmıştır. Tasarlanan devreye ait şema Şekil 4.7’de görülmektedir.

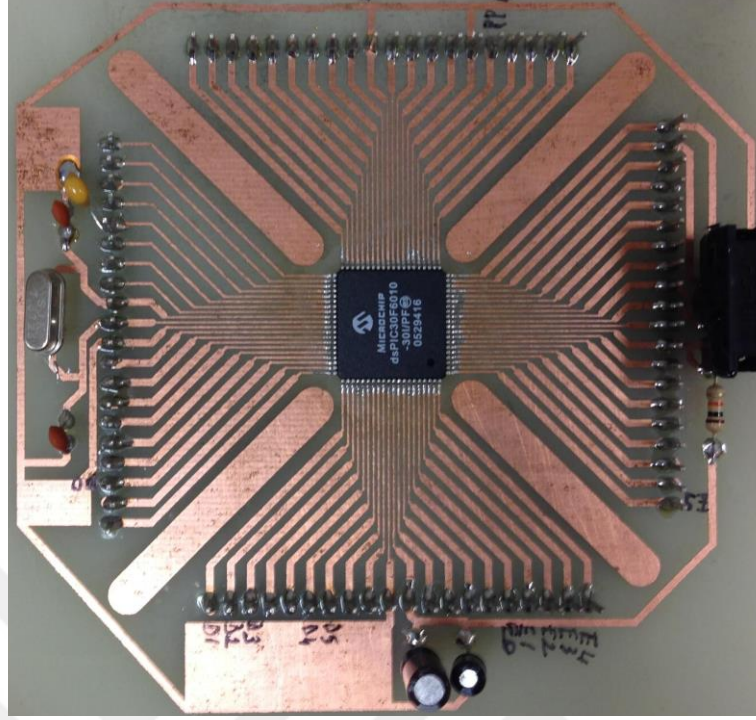


Şekil 4.7. Sıfır geçiş algılama devresi (ZCD)

ZCD, şebeke geriliminin her bir alternans değişiminde lojik 0 üreterek geçiş noktalarını tespit etmektedir. Lojik 0 değerleri mikro denetleyicinin düşen kenar olarak programlanan harici kesme girişine aktarılmaktadır. Böylelikle, mikrodenetleyicinin her kesme algılamasında mevcut bir zamanlayıcı resetlenerek senkronizasyon sağlanmaktadır.

#### 4.1.4. Kontrol birimi

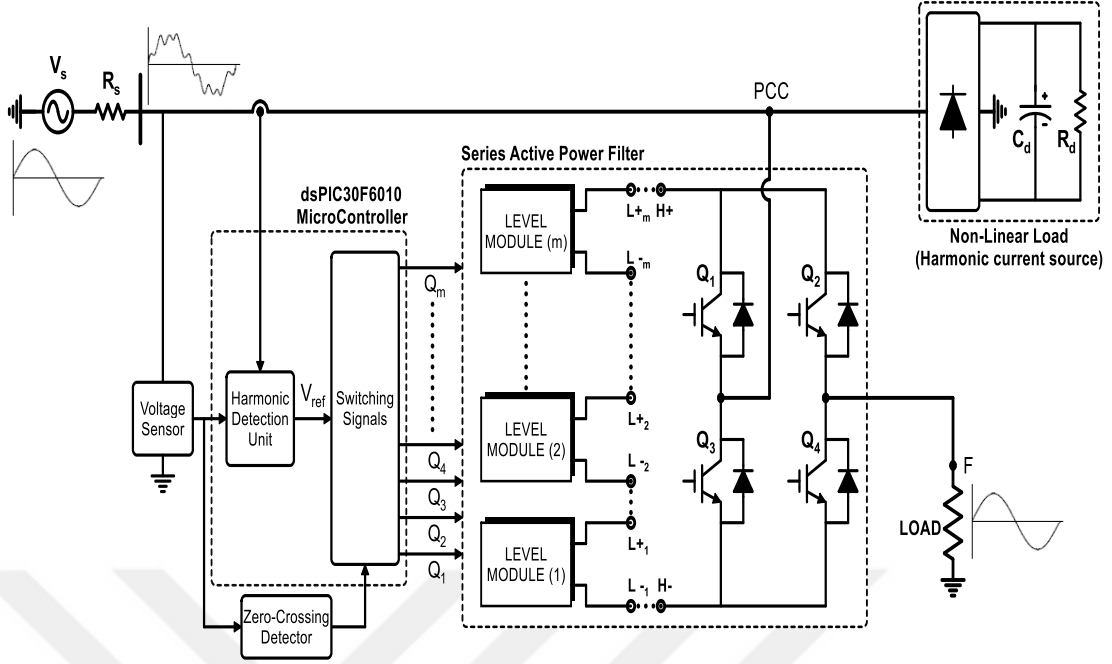
Microchip firmasına ait 16-bit dsPIC30F6010 mikrodenetleyicisi dijital kontrolör olarak tercih edilmiştir. Şekil 4.8’de kontrol biriminde kullanılan yüzey montaj mikrodenetleyicinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.8. dsPIC30F6010 için tasarlanan baskı devre

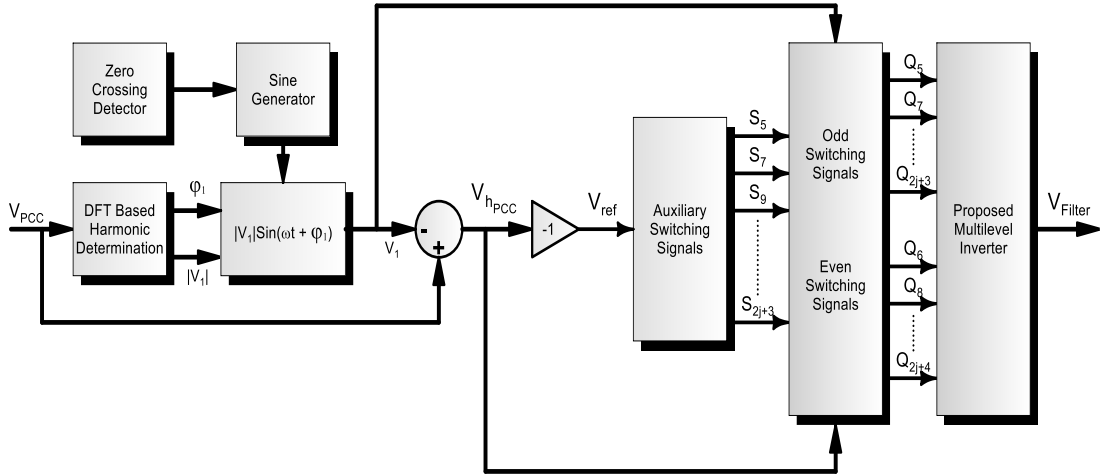
#### 4.2. Seri Aktif Güç Filtresi Uygulaması

Çok seviyeli evirici tabanlı seri aktif güç filtresi uygulaması için hazırlanan deney kurulumuna ait şematik diyagram Şekil 4.9'da görülmektedir. Lineer olmayan yük, doğru akım tarafında RC yüke sahip bir fazlı diyot doğrultucudur. Bu yük tarafından çekilen harmonik akımlar sinüzoidal kaynağa ( $V_s$ ) seri olan  $R_s$  direnci üzerinde harmonik gerilimlere neden olmaktadır. Ortak bağlantı noktası (point of common coupling - PCC),  $R_s$  direnci üzerindeki harmonik gerilim düşümü nedeniyle artık harmonik bozunuma sahip bir besleme noktası olarak doğrusal bir yükü beslemektedir (F noktası seri aktif güç filtresi bağlanmadan önce PCC ile aynı noktadır). Ayrıca, Şekil 4.9'da sinüzoidal kaynağın faz açısıyla senkronize olabilmek amacıyla bir sıfır geçiş algılama devresi bulunmaktadır. Tasarlanan sistem ile PCC'ye bağlı olan rezistif yük geriliminin harmonik bileşenlerinin yok edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.9. Seri aktif güç filtresi uygulaması için hazırlanan deneysel sisteme ait şematik diyagram

Deneysel çalışmalara başlamadan önce tasarlanan seri aktif güç filtresi uygulaması simülasyon ortamında test edilmiştir. Bu amaçla, aktif güç filtresi gerilimini elde etmek için geliştirilen kontrol algoritmasına ait blok diyagram Şekil 4.10'da görülmektedir. İlk olarak, PCC noktası gerilimi Ayırık Fourier Dönüşümü'ne tabi tutularak temel bileşen genlik ve faz açısı hesaplanmıştır. PCC geriliminin hesaplanan temel bileşenden çıkarılması ile referans gerilim sinyali elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen referans sinyali Denklem (3.14), (3.15) ve (3.16)'ya uygulanarak üretilen anahtarlama sinyalleri ile aktif güç filtresi çıkış gerilimi oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. Seri aktif güç filtresi uygulaması için geliştirilen kontrol algoritması blok diyagramı

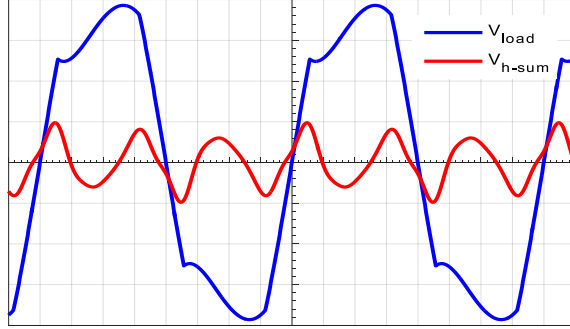
Kaskat bağlı çok seviyeli evirici tabanlı seri aktif güç filtresi uygulaması için simülasyon ortamında çok seviyeli eviriciyi oluşturan seviye modülleri ve H-köprü modülü oluşturulmuştur.

Hazırlanan simülasyon dosyası iki farklı harmonik bozunumuna neden olan devre parametreleri için test edilmiştir. Devre parametreleri konfigürasyonları sırasıyla  $R_s=16 \Omega$ ,  $R_d=48 \Omega$ ,  $C_d=204 \mu F$ ,  $Yük=192 \Omega$  ve  $R_s=192 \Omega$ ,  $R_d=192 \Omega$ ,  $C_d=204 \mu F$ ,  $Yük= 576 \Omega$  olarak seçilmiştir. Aynı zamanda, yapılan simülasyonlar 7, 15 ve 31 seviyeli eviriciler kullanılarak tekrarlanmıştır. 7-seviyeli eviricide  $V_d$  değeri 24 V seçilirken, bu değer 15-seviyeli eviricide 12 V ve 31 seviyeli eviricide 6 V olarak belirlenmiştir. Her iki harmonik bozunum seviyesi için seri aktif güç filtresi modelinde farklı sayıda seviye modülüne sahip eviriciler kullanılarak yük gerilimi harmonikleri kompanse edilmiştir. Ayrıca, yapılan simülasyon çalışmaları deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

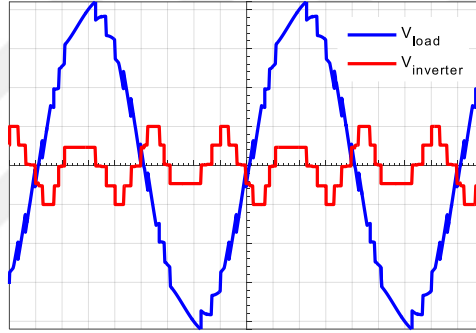
#### 4.2.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deney sonuçları

Şekil 4.9’da görülen devre parametreleri  $R_s=16 \Omega$ ,  $R_d=48 \Omega$ ,  $C_d=204 \mu F$ ,  $Yük=192 \Omega$  olarak seçildiğinde PCC noktası gerilimindeki THB değeri simülasyonda % 18,47, deneysel çalışmada ise %18,30 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11’te, simülasyon çalışmalarında aktif güç filtresi uygulanmadan önceki yük gerilimi ile harmonik gerilimlerin toplamına ait dalga şekilleri görülmektedir. Farklı sayıda seviye modülüne sahip eviriciler kullanılarak yapılan simülasyonlarda, harmonik filtreleme sonucunda

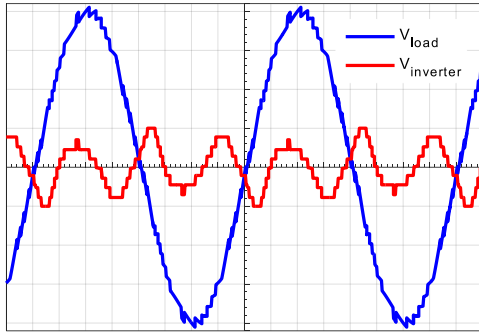
elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri Şekil 4.12’te görülmektedir.



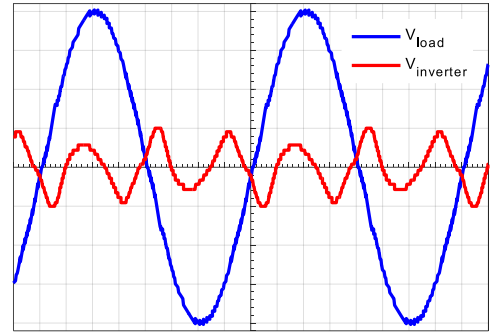
Şekil 4.11. Yük gerilimi (PCC gerilimi) ve harmonik gerilimlerinin toplamına ait dalga şekilleri, simülasyon (50 V/div, 2.5 ms/div)



a)



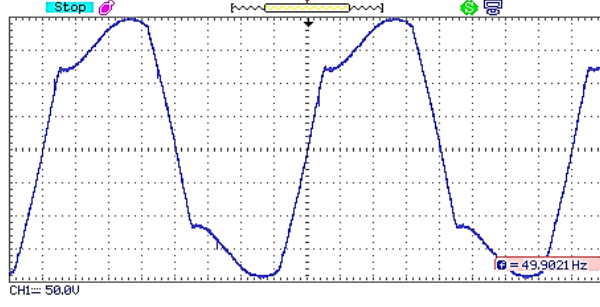
b)



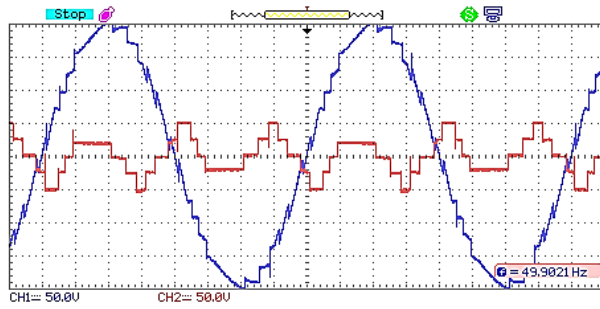
c)

Şekil 4.12. Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, simülasyon, a)  $n=7$ , b)  $n=15$ , c)  $n=31$ , (50 V/div, 2.5 ms/div)

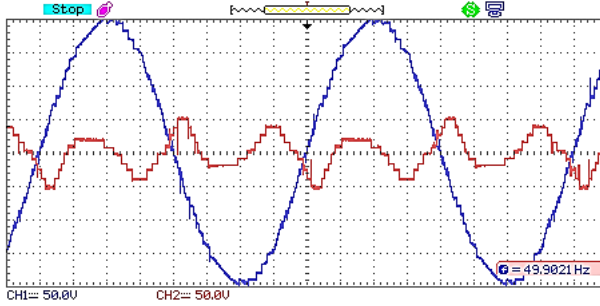
Farklı sayıda seviye modülüne sahip eviriciler kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’te gösterilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarını doğrulamak amacıyla aynı sisteme ait deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara ait grafikler Şekil 4.13 ve Şekli 4.14’de gösterilmiştir.



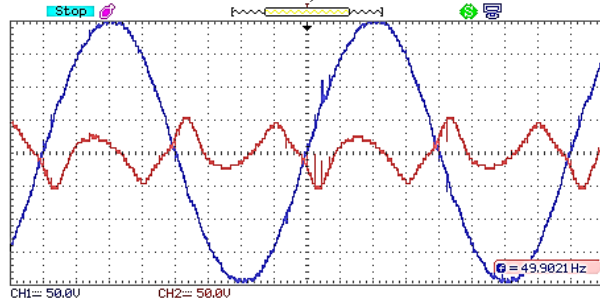
Şekil 4.13. Yük gerilimine (PCC gerilimi) ait dalga şekli, deneysel (50 V/div, 2.5 ms/div)



a)



b)



c)

Şekil 4.14. Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, deneysel, a)  $n=7$ , b)  $n=15$ , c)  $n=31$ , (50 V/div, 2.5 ms/div)

#### 4.2.1.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Seri aktif güç filtresi uygulaması için yapılan simülasyonda, THB değeri %18,47 olan yük geriliminin harmonik filtreleme işleminden sonra THB değerinde oldukça belirgin bir azalma yaşanmıştır. Seviye modülü sayısına bağlı olarak THB değerinde görülen azalma deneysel çalışmalar ile de doğrulanmıştır. Sonuçlardan görüleceği üzere, seviye sayısı arttıkça evirici çıkış gerilimi harmonik gerilimlerin toplamına, bir başka ifade ile referans sinyale, daha çok yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, elde edilen yük gerilimindeki THB değeri azalmaktadır. Seviye modül sayısının 2 ( çıkış gerilim seviyesinin 7 olması) olması durumunda dahi yük gerilimi THB değerinin standartlarda belirtilen değerin altında olması sağlanmıştır. Tablo 4.1’de yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen THB değerleri evirici seviye modül sayısına bağlı olarak gösterilmektedir.

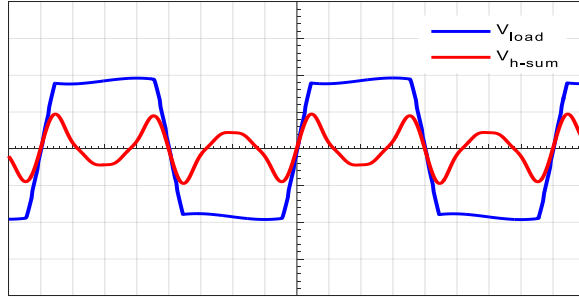
Tablo 4.1. Yük konfigürasyonu-1 için simülasyon ve deneysel çalışma sonucu elde edilen yük gerilimi THB değerleri

Yük Konfigürasyonu-1		
	Simülasyon	Deneysel
Seri AGF yok iken	%18,47	%18,30
Seri AGF 2 SMs (n =7)	%4,65	%3,19
Seri AGF 3 SMs (n =15)	%2,85	%2,24
Seri AGF 4 SMs (n =31)	%1,90	%1,81

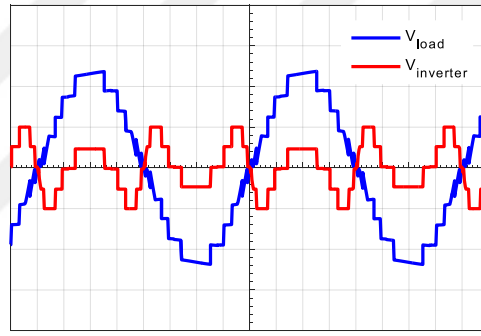
#### 4.2.2. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deney sonuçları

Şekil 4.9’da görülen devre parametreleri  $R_s = 192 \Omega$ ,  $R_d = 192 \Omega$ ,  $C_d = 204 \mu F$ ,  $Yük = 576 \Omega$  olarak seçildiğinde PCC noktası gerilimindeki THB değeri simülasyonda % 30,70, deneysel çalışmada ise % 29,81 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.18’te, aktif güç filtresi uygulanmadan önceki yük gerilimi ile harmonik gerilimlerin toplamına ait

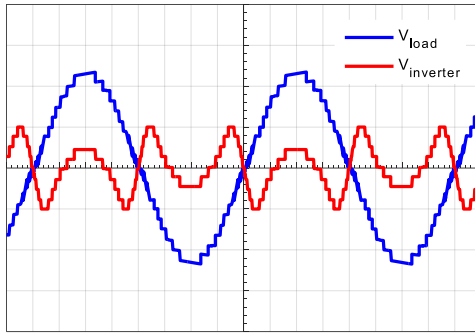
dalga şekilleri görülmektedir. Farklı sayıda seviye modülüne sahip eviriciler kullanılarak yapılan simülasyonlarda, harmonik filtreleme sonucunda elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri Şekil 4.19’te görülmektedir.



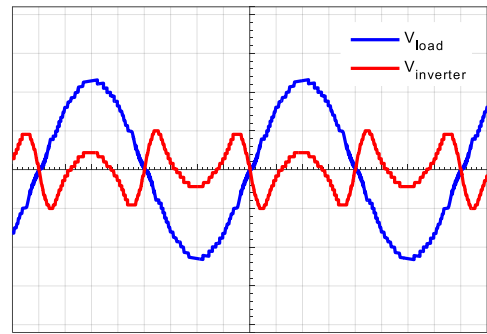
Şekil 4.15. Yük gerilimi (PCC gerilimi) ve harmonik gerilimlerinin toplamına ait dalga şekilleri, simülasyon (50 V/div, 2.5 ms/div)



a)



b)



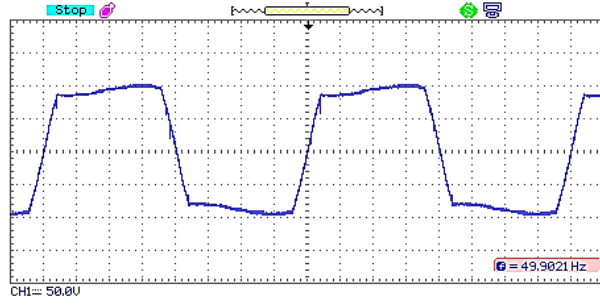
c)

Şekil 4.16. Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, simülasyon, a) 7-seviyeli evirici kullanıldığında, b) 15-seviyeli evirici kullanıldığında, c) 31-seviyeli evirici kullanıldığında, (50 V/div, 2.5 ms/div)

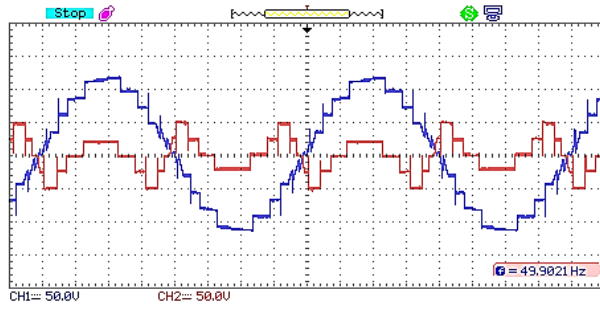
Farklı sayıda seviye modülüne sahip eviriciler kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’te gösterilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarını doğrulamak amacıyla aynı sisteme ait deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



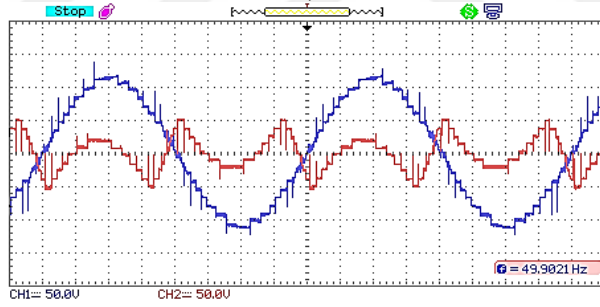
Deneysel sonuçlara ait grafikler Şekil 4.17 ve Şekli 4.18’de gösterilmiştir.



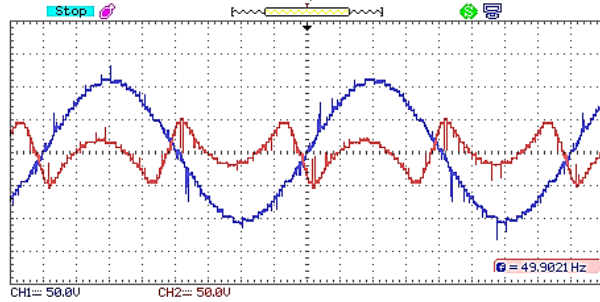
Şekil 4.17. Yük gerilimine (PCC gerilimi) ait dalga şekli, deneysel (50 V/div, 2.5 ms/div)



a)



b)



c)

Şekil 4.18. Seri aktif güç filtresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi ve evirici çıkış gerilimi, deneysel, a) 7-seviyeli evirici kullanıldığında, b) 15-seviyeli evirici kullanıldığında, c) 31-seviyeli evirici kullanıldığında, (50 V/div, 2.5 ms/div)

#### 4.2.2.1. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Seri aktif güç filtresi uygulaması için yapılan simülasyonda, THB değeri %30,70 olan yük geriliminin harmonik filtreleme işleminden sonra THB değerinde oldukça belirgin bir azalma yaşanmıştır. Seviye modülü sayısına bağlı olarak THB değerinde görülen azalma deneysel çalışmalar ile de doğrulanmıştır. Sonuçlardan görüleceği üzere, seviye sayısı arttıkça evirici çıkış gerilimi harmonik gerilimlerin toplamına, bir başka ifade ile referans sinyale, daha çok yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, elde edilen yük gerilimindeki THB değeri azalmaktadır. Seviye modül sayısının 2 (çıkış gerilim seviyesinin 7 olması) olması durumunda dahi yük gerilimi THB değerinin standartlarda belirtilen değer altında olması sağlanmıştır. Tablo 4.2’de yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen THB değerleri evirici seviye modül sayısına bağlı olarak gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Yük konfigürasyonu-2 için simülasyon ve deneysel çalışma sonucu elde edilen yük gerilimi THB değerleri

Yük Konfigürasyonu-2		
	Simülasyon Deneysel	
Seri AGF yok iken	%30,70	%29,81
Seri AGF 2 LMs (n =7)	%8,09	%4,76
Seri AGF 3 LMs (n =15)	%4,69	%2,76
Seri AGF 4 LMs (n =31)	%3,43	%2,48

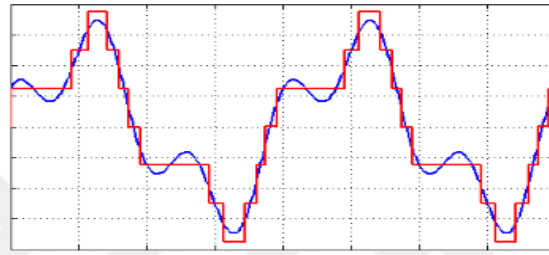
#### 4.3. Paralel Aktif Güç Filtresi Uygulaması

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici tabanlı paralel aktif güç filtresi uygulaması için simülasyon ortamında seviye modülleri ve H-köprü modülü oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan çok seviyeli eviriciye paralel aktif güç filtresi uygulaması için önerilen kontrol algoritması simülasyon ortamında uygulanmıştır.

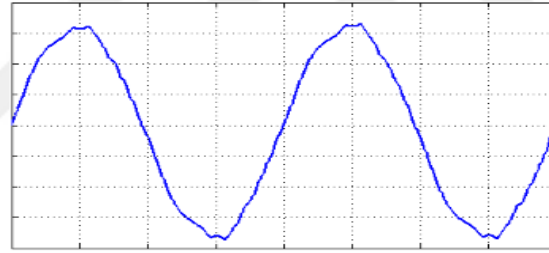
Çok seviyeli evirici tabanlı paralel aktif güç filtresi için geliştirilen denetim algoritması, seviye modülü sayısı farklı olan evirici birimlerine uygulanmıştır. Bu

amaçla, seviye modülü sayısı 2 ve 3 olan evirici birimlerine sahip paralel aktif güç filtreleri ile yapılan simülasyonda, 3. harmonik akım bileşeni içeren bir yük için üretilen evirici çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 aracılığıyla gösterilmiştir.

Anahtarlama sinyallerinin elde edilmesinde kullanılan denetim algoritması sayesinde, üçüncü harmonik akım bileşeninin yarattığı %30 oranındaki toplam harmonik bozunum iki seviye modülü kullanılarak %3,8'e, üç seviye modülü kullanılarak %2,4'e kadar azaltılmıştır.

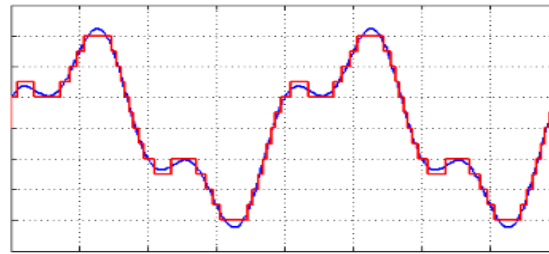


a)



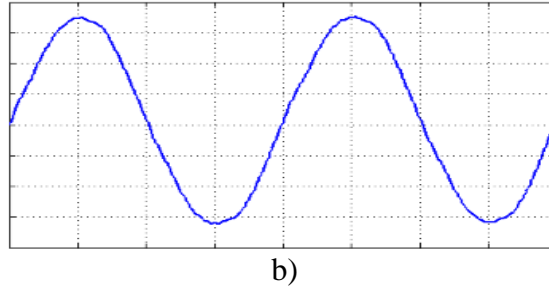
b)

Şekil 4.19. Paralel aktif güç filtresi simülasyon sonuçları a) referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 2 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı



a)

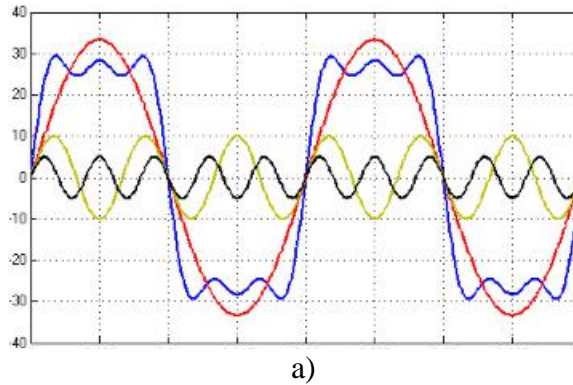
Şekil 4.20. Paralel aktif güç filtresi simülasyon sonuçları a) referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı



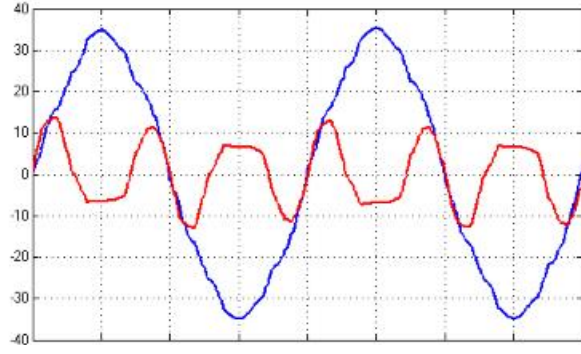
Şekil 4.20.(Devam) Paralel aktif güç filtresi simülasyon sonuçları a) referans gerilim sinyali ve seviye modülü sayısı 3 olan evirici çıkış gerilimi, b) filtrelenmiş şebeke akımı

Birden fazla harmonik akım bileşeni içeren bir yük durumu için yapılan simülasyon çalışmasında ise, 2 ve 4 seviye modülüne sahip evirici birimleri kullanılmıştır. Buna göre, harmonikli şebeke akımı ile onu oluşturan harmonik akım bileşenleri Şekil 4.21a ve Şekil 4.22a'da, paralel aktif güç filtresi uygulandıktan sonraki şebeke ve filtre akımları Şekil 4.21b ve Şekil 4.22b'de, anahtarlama sinyalleri ise Şekil 4.21c ve Şekil 4.22c'de görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, geliştirilen denetim algoritması ile elde edilen şebeke akımının yaklaşık olarak sinüzoidal hale geldiği görülmektedir.

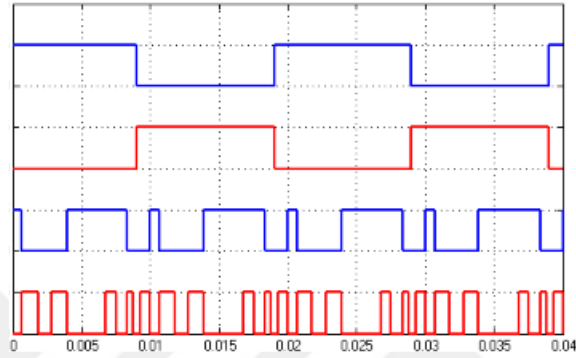
Üçüncü ve beşinci harmonik akım bileşenlerinin bulunduğu durumda şebeke akımındaki THB değeri %41'den iki seviye modülüne sahip evirici birimi ile %4,45'e, dört seviye modülü kullanılarak ise %1.1'e kadar indirilmiştir.



Şekil 4.21. İki seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri

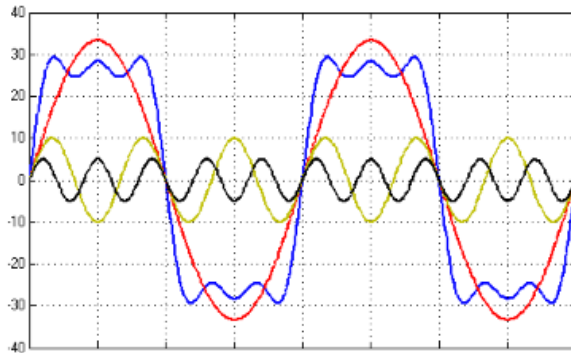


b)



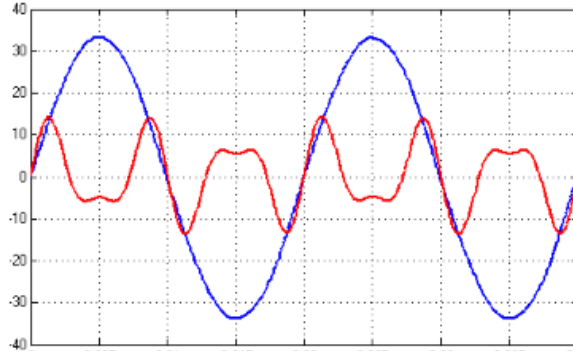
c)

Şekil 4.21.(Devam) İki seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri

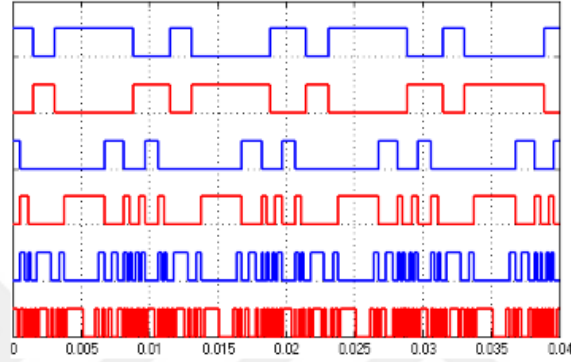


a)

Şekil 4.22. Dört seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri



b)



c)

Şekil 4.22.(Devam) Dört seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen paralel aktif güç filtresi uygulaması a) uygulamadan önce şebeke akımı ve harmonik bileşenleri, b) uygulamadan sonra şebeke ve filtre akımları, c) evirici anahtarlama sinyalleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Harmoniklerin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, rezonansların bastırılması ve gerilim regülasyonu gibi birçok problemin çözümünde uygulama imkanı bulan aktif güç filtreleri, örneklenen yük akım ve/veya gerilim dalga şekillerinden bir takım kontrol teknikleriyle üretilen referans akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin kontrollü yarı-iletken güç anahtarları yardımı ile üretilmesi ve sisteme enjekte edilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Bu çalışma prensibine dayanarak aktif güç filtrelerinin harmonik belirleme, kontrol ve evirici birimi olmak üzere üç ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Genellikle, harmonik belirleme birimi ile kontrol birimi bir arada tanımlanmaktadır.

Literatürde yer alan aktif güç filtresi çalışmaları detaylı incelendiğinde, çalışmaların yukarıda bahsedilen aktif güç filtresini oluşturan birimler etrafında yoğunlaştığı görülmüştür. İncelenen çalışmaların bir kısmı, harmonik belirleme biriminde kullanılan farklı harmonik belirleme algoritmaları ile referans sinyalin oluşturulmasını konu almıştır. Harmonik belirleme birimi çıkışında elde edilen referansa ait tetikleme sinyallerinin elde edilmesini sağlayan ve farklı kontrol tekniklerinin uygulandığı kontrol birimi ise araştırmaların yoğunlaştığı bir diğer konu başlığıdır. Bir kısım çalışmalarda ise farklı topolojilere sahip aktif güç filtresi evirici birimlerinin, araştırmaların odak noktasını oluşturduğu görülmüştür.

Bu bağlamda, yarı-iletken güç anahtarları sayısı azaltılarak uygulanan kontrol yönteminin karmaşıklığını ortadan kaldırmaya yönelik farklı evirici birimlerine sahip birçok aktif güç filtresi uygulaması yapılmıştır. Anahtarlama frekansı, yarı-iletken güç anahtarları üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresi, verim, elektromanyetik etkileşim, harmonik bozunum ve çıkış filtresi gerekliliği gibi birçok özellik de dikkate alındığında çok seviyeli evirici topolojilerinin aktif güç filtresi uygulamalarında sıklıkla tercih edildiği görülmüştür [3-5]. Literatürde diyot kenetlemeli ve flying kapasitörlü çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtrelerini konu alan çalışmalar bulunmasına karşın, aktif güç filtresi uygulamalarında en sık karşılaşılan topolojinin çok seviyeli kaskat bağlı H-köprü evirici olduğu belirlenmiştir. Bu evirici topolojisinin aktif güç filtresi

çalışmalarında tercih edilmesinin nedenleri arasında yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalara elverişli olması, anahtarlama elemanı üzerindeki  $dv/dt$  gerilim stresinin az olması ve çıkış gerilimi toplam harmonik bozunum (THB) değerinin düşük olması sayılabilir [8-11].

Literatür incelemesi sonucunda aktif güç filtresi uygulamalarında sıkça karşılaşılan çok seviyeli kaskat bağlı H-köprü eviricilerin tüm avantajlarını bünyesinde barındıran ve daha önce aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılmadığı, yapılan literatür incelemesi sonucunda belirlenen çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici [48], tez çalışmasının başlangıç noktası olarak seçilmiştir.

Çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtresi uygulamasında kullanılan kaskat bağlı yarım H-köprü eviriciyi oluşturan modüller tanıtılarak çıkış gerilimi seviyesi ile anahtarlama elemanı sayısı arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Aktif güç filtre uygulamalarında kullanılan diğer çok seviyeli eviriciler ile anahtarlama elemanı bakımından bir karşılaştırmaya da yer verilmiştir.

Aktif güç filtresi evirici biriminde kullanılmak üzere seçilen çok seviyeli eviricinin seri aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılabilmesi için mevcut anahtarlama algoritması değiştirilmiştir. Evirici çıkışında istenilen gerilim değerini elde edecek yeni anahtarlama algoritması için geliştirilmiş bir formül üretilmiştir. Paralel aktif güç filtresi uygulamaları için mevcut olan anahtarlama algoritması uygun olduğundan değiştirilmeden kullanılmıştır. Geliştirilen anahtarlama algoritması seri ve paralel aktif güç filtre uygulamaları için tablo ve evirici çalışma durumlarını gösteren şekiller ile açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalara geçmeden önce seri ve paralel aktif güç filtresi evirici birimleri ayrı ayrı simülasyon programı yardımıyla modellenerek simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlarda gerçek sistem verileri kullanılmıştır. Bu amaçla, aktif güç filtresi harmonik filtreleme için uygulanmadan önce gerekli akım ve gerilim dalga şekilleri ölçülmüştür. Laboratuvar ortamından alınan veriler, simülasyon çalışmalarına giriş bilgileri olarak aktarılmıştır. Yapılan simülasyonlarda evirici seviyesi değiştirilerek seviye sayısının aktif güç filtrelerinin harmonik filtreleme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, farklı THB değerine sahip yük durumları için simülasyonlar çeşitlendirilerek tekrarlanmıştır.



Yapılan simülasyonlardan sonra, 6 adet seviye modülüne sahip bir fazlı çok seviyeli evirici prototipi yapılmış ve aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılmıştır. Gerçeklenen prototip, fotoğraf ve prensip şemaları ile ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalara da tez çalışmasında yer verilmiştir. Seri AGF uygulaması için yapılan simülasyon çalışmalarına ait tüm durumlar, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, simülasyon ve deneysel sonuçlar olmak üzere karşılaştırmalı bir şekilde tez çalışmasında sunulmuştur.

Yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanacak olursa;

i. Çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü evirici, modüler yapısı itibariyle seviye modülü sayısı artırılarak çıkış gerilim sinyali istenilen referans gerilim sinyaline oldukça yakınlaştırılabilmektedir.

ii. Evirici çıkış gerilim seviyesi, seviye modülü sayısına bağlı olarak  $2^{m+1}-1$  şeklinde değişmektedir. Ancak, istenildiği takdirde ara seviye sayılarında da çıkış gerilimi üretilebildiğinden, evirici bir harmonik gerilim kaynağı olarak kullanılabilir.

iii. Seviye modülü gerilim kaynaklarının değerinin  $2^{j-1}$  ( $j=0, 1, 2, \dots, m$ ) şeklinde değişmesi, aktif güç filtresi sisteminin ikili kodla işlem yapan mikrodenetleyici ile uyumlu olmasını sağlamaktadır. Bu uyum sayesinde, evirici çıkış geriliminde seviye değişimleri daha az sayıda anahtarlama ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum ise anahtarlama kayıplarını azaltmıştır.

iv. Çok seviyeli eviricinin seri aktif güç filtresi uygulamalarında kullanılabilmesi için mevcut anahtarlama algoritması değiştirilmiştir. Evirici çıkışında istenilen gerilim değerini elde edecek yeni anahtarlama algoritması için geliştirilmiş bir formül üretilmiştir.

v. Literatürde, anahtarlama elemanı sayısını azaltarak kullanılan kontrol algoritmasının karmaşıklığını ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Geliştirilen anahtarlama algoritmasının yapısı çok basit olduğundan anahtarlama sinyalleri kolaylıkla üretilebilmektedir.

vi. Literatürde yer alan çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtrelerinin evirici biriminde kullanılan anahtarlama elemanı bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Kaskat bağlı yarım H-köprü evirici yapısında, aynı seviyeli çıkış gerilimi üretmek için diğer evirici yapılarına göre daha az anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Başka bir

açından bakıldığında, belirli bir anahtarlama elemanı karşılaştırma için kullanıldığında kaskat yarım H-köprü evirici yapısı ile daha fazla seviye elde edilebilmektedir.

vii. Aktif güç filtrelerinde kullanılan diğer çok seviyeli eviricilere kıyasla daha az anahtarlama elemanı kullanıldığından, iletim kayıplarının daha az olduğu söylenebilir. Bu da, sistem veriminin artmasını sağlamaktadır.

viii. Orta ve yüksek gerilim uygulamalarında, anahtarlama elemanı sayısının az olması evirici maliyetini düşürecektir.

ix. Evirici anahtarlama frekansı DGA eviricilere göre çok daha düşük olduğundan, anahtarlama kayıpları azaltılmıştır.

x. Çok seviyeli eviriciler, DGA eviricilerin çıkışında kullanılan filtre devrelerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu özellikleri ile aktif güç filtre uygulamalarında çok seviyeli eviriciler sistem verimi açısından avantaj sağlamaktadırlar.

xi. Seri AGF uygulamaları için yapılan simülasyon çalışmaları deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dalga şekilleri ve THB değerleri açısından simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının birbirlerini doğruladığı görülmüştür. Yüksek harmonik bozunuma sahip yük durumlarında bile seviye modülü sayısının artırılarak THB değerinin standartlarda belirtilen değerlerin altına indirilebildiği ispatlanmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda ileri de yapılabilecek çalışmalar için getirilen öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

i. Harmonik filtreleme amacıyla gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmalardan görüldüğü üzere aktif güç filtresi uygulamaları için çok seviyeli kaskat bağlı yarım H-köprü eviricinin birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantaj, aktif güç filtre uygulamalarında gerilim dalga şekli bozuklukları, rezonans ve reaktif güç kompanzasyonu gibi diğer problemlerin giderilmesi için kullanılabilir.

ii. Kaskat bağlı yarım H-köprü eviricinin yukarıda bahsedilen avantajları göz önüne alındığında, bu evirici yapısı Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi için kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kocabaş İ., Uçak O., Terciyanlı A., DSP Tabanlı Gerilim Kaynaklı Şönt Aktif Güç Filtresi Uygulaması, *ELECO*, Bursa, Türkiye, 6-10 Aralık 2006.
- [2] Khadkikar V., Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2012, **27**(5), 2284-2297.
- [3] Kang F. S., Park S. J., Cho S. E., Kim C. U., Ise T., Multilevel PWM Inverters Suitable for the Use of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2005, **20**(4), 906-915.
- [4] Ortuzar M., Carmi R., Dixon J., Moran L., Voltage Source Active Power Filter, Based on Multi-Stage Converter and Ultra Capacitor DC-Link, *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2003)*, Roanoke, VA, USA, 2-6 November 2003.
- [5] Junling C., Yaohua L., Ping W., Zhizhu Y., Zuyi D., A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation with Capacitor Voltage Balancing Control of Cascaded Multilevel Inverter for High Power Active Power Filters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008)*, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.
- [6] Akagi H., Hatada T., Voltage Balancing Control for a Three-level Diode-Clamped Converter in a Medium-voltage Transformerless Hybrid Active Filter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, **24**(3), 571-579.
- [7] Lin B. R., Huang C. H., Implementation of a Three-phase Capacitor-clamped Active Power Filter under Unbalanced Condition, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2006, **53**(5), 1621-1630.
- [8] Madhukar W., Agarwal P., Comparison of Control Strategies for Multilevel Inverter Based Active Power Filter used in High Voltage Systems, *Power Electronics Drives and Energy Systems*, New Delhi, India, 20-23 December 2010.
- [9] Chen Z., Luo Y., Chen M., Control and Performance of a Cascaded Shunt Active Power Filter for Aircraft Electric Power System, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2012, **59**(9), 3617-3623.
- [10] Valdez-Fernandez A. A., Martinez-Rodriguez P. R., Escobar G., Limones-Pozos C. A., Sosa J. M., A Model-Based Controller for the Cascaded H-Bridge Multilevel Converter Used as a Shunt Active Filter, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2013, **60**(11), 5019-5028.

- [11] Beşer E., Arifoğlu B., Çamur S., Kandemir Beşer E., A Novel Design and Application of A Single Phase Multilevel Inverter, *International Review of Electrical Engineering*, 2009, **4**(1), 7-13.
- [12] Zeng F. P., Tan G. H., Ji Y. C., Novel Single-phase Five-level Voltage-source Inverter for The Shunt Active Power Filter, *IET Power Electronics*, 2010, **3**(4), 480-489.
- [13] Zhu H., Shu Z., Gao F., Qin B., Gao S., Five-level Diode Clamped Active Power Filter using Voltage Space Vector-based Indirect Current and Predictive Harmonic Control, *IET Power Electron.*, 2014, **7**(3), 713–723.
- [14] Vodyakho O., Mi C. C., Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire and Four-Wire Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**(5), 1350-1363.
- [15] Flores P., Dixon J., Ortuzar M., Carmi R., Barriuso P., Moran L., Static Var Compensator and Active Power Filter With Power Injection Capability, Using 27-Level Inverters and Photovoltaic Cells, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(1), 130-138.
- [16] Defay F., Llor A. M., Fadel M., Direct Control Strategy for a Four-Level Three-Phase Flying-Capacitor Inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(7), 2240-2248.
- [17] Varschavsky A., Dixon J., Rotella M., Moran L., Cascaded Nine-Level Inverter for Hybrid-Series Active Power Filter, Using Industrial Controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(8), 2761-2767.
- [18] Zhou Z., Liu Y., Time Delay Compensation-Based Fast Current Controller for Active Power Filters, *IET Power Electronics*, 2012, **5**(7), 1164-1174.
- [19] Sandoval G., Miranda H., Espinosa-Perez G., Cardenas V., Passivity-Based Control of an Asymmetric Nine-level Inverter for Harmonic Current Mitigation, *IET Power Electronics*, 2012, **5**(2), 237-247.
- [20] Munoz J. A., Espinoza J. R., Baier C. R., Moran L. A., Espinosa E. E., Melin P. E., Design of a Discrete-Time Linear Control Strategy for a Multicell UPQC, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**(10), 3797-3807.
- [21] Gao C., Jiang X., Li Y., Chen Z., Liu J., A DC-Link Voltage Self-Balance Method for a Diode-Clamped Modular Multilevel Converter With Minimum Number of Voltage Sensors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(5), 2125-2139.
- [22] Du S., Liu J., Lin J., Hybrid Cascaded H-bridge Converter for Harmonic Current Compensation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(5), 2170-2179.

- [23] Wang Y. F., Li Y. W., Three-Phase Cascaded Delayed Signal Cancellation PLL for Fast Selective Harmonic Detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(4), 1452-1463.
- [24] Popescu M., Bitoleanu A., Suru V., A DSP-Based Implementation of The p-q Theory in Active Power Filtering Under Nonideal Voltage Conditions, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(2), 880-889.
- [25] Pereda J., Dixon J., 23-Level Inverter for Electric Vehicles Using a Single Battery Pack and Series Active Filters, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(3), 1043-1051.
- [26] Montero M. I. M., Cadaval E. R., Gonzalez F. B., Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-phase Four-wire Systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, **22**(1), 229–236.
- [27] Uyyuru K. R., Mishra M. K., Ghosh A., An Optimization-based Algorithm for Shunt Active Filter under Distorted Supply Voltages, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, **24**(5), 1223–1232.
- [28] Herrera R. S., Salmeron P., Instantaneous Reactive Power Theory: A Reference in The Nonlinear Loads Compensation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, **56**(6), 2015–2022.
- [29] Kim Y. S., Kim J. S., Ko S. H., Three-phase Three-wire Series Active Power Filter Which Compensates for Harmonics and Reactive Power, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 2004, **151**(3), 276-282.
- [30] Salmeron P., Litran S. P., A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010, **25**(7), 1923-1931.
- [31] Tian J., Chen Q., Xie B., Series Hybrid Active Power Filter Based on Controllable Harmonic Impedance, *IET Power Electron.*, 2012, **5**(1), 142-148.
- [32] Litran S. P., Salmeron P., Analysis and Design of Different Control Strategies of Hybrid active power filter Based on The State Model, *IET Power Electron.*, 2012, **5**(8), 1341-1350.
- [33] Mulla M. A., Rajagopalan C., Chowdhury A., Hardware Implementation of Series Hybrid Active Power Filter using A Novel Control Strategy Based on Generalised Instantaneous Power Theory, *IET Power Electron.*, 2013, **6**(3), 592-600.
- [34] Massoud A. M., Finney S. J., Cruden A. J., Williams B. W., Three-Phase, Three-Wire, Five-Level Cascaded Shunt Active Filter for Power Conditioning, Using Two Different Space Vector Modulation Techniques, *IEEE Trans. Power Del.*, 2007, **22**(4), 2349-2361.
- [35] Chellammal N., Dash S. S., Velmurugan V., Gurram R., Power Quality Improvement Using Multilevel Inverter as Series Active Filter, *International*

*Conference on Emerging Trends in Science Engineering and Technology (INCOSET)*, Tamilnadu, India, 13-14 December 2012.

- [36] Lopez M. G., Moran L. T., Espinoza J. C., Dixon J. R., Performance Analysis of a Hybrid Asymmetric Multilevel Inverter for High Voltage Active Power Filter Applications, *IECON*, Roanoke, USA, 2-6 November 2003.
- [37] Silva L. A., Pimentel S. P., Pomilio J. A., Nineteen-level Active Filter System using Asymmetrical Cascaded Converter with DC Voltages Control, *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, Recife, Brazil, 12-14 June 2005.
- [38] Laali S., Babaei E., Capacitor Based Asymmetric Cascaded Multilevel Inverter with Capability of Charge Balance Control Methods, *IECON*, Vienna, Austria, 10-13 November 2013.
- [39] Alvarenga M. B., Pomilio J. A., Voltage Balancing and Commutation Suppression in Symmetrical Cascade Multilevel Converters for Power Quality Applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014, **61**(11), 5996-6003.
- [40] Çamur S., Arifoğlu B., Beşer E., Beşer E. K., A Novel Topology for Single-Phase Five-Level Inverter, *Proc. of the 5<sup>th</sup> WSEAS/IASME*, Tenerife, Spain, 16-18 December 2005.
- [41] Kang F. S., Rhee K. Y., Park J. S., Moon C. J., Ise T., New Approach for Cascaded-Transformers-Based Multilevel Inverter with An Efficient Switching Function, *The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, South Korea, 2-6 November 2004.
- [42] Wakileh G. J., *Power Systems Harmonics*, 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2001.
- [43] Dugan R. C., Mcgranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W., *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [44] Karaarslan K., Arifoğlu B., Beşer E., S. Çamur, Seri ve Paralel Aktif Güç Filtreleri için Geliştirilen Çok Seviyeli Kaskat Bağlı Evirici ve Kontrol Algoritması, 3e Electrotech, <http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/141-seri-ve-paralel-aktif-guc-filtreleri-icin-gelistirilen-cok-seviyeli-kaskat-bagli-evirici-ve-kontrol-algoritmasi>, (Ziyaret Tarihi: 1 Mart 2017)
- [45] Emadi A., Nasiri A., Bekiarov S. B., *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*, Illinois Institute of Technology, Electrical and Computer Engineering Department, CRC Press, Chicago, 2005.
- [46] Bodur H., *Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamaları*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [47] Meersman B., Renders B., Degroote L., Vandoorn T., Kooning J. D., Vandeveld L., Overview of Three-phase Inverter Topologies for Distributed

Generation Purposes, *Innovation for Sustainable Production*, Bruges, Belgium, 18-21 April 2010.

- [48] Beşer E., Anahtarlama Elemanı Sayısı ve Harmonik Optimizasyonu ile Bir Fazlı Çok Seviyeli Evirici Tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259446.
- [49] Massoud A. M., Finney S. J., Grant D. M., Williams B. W., Predictive Current Controlled Shunt Active Power Filter Using Three-level Cascaded Type Inverter, *Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 20-25 June 2004.
- [50] Sxhneider V. A. M., Moran L., Dixon J., An Active Power Filter Implemented with A Three-level NPC Voltage-source Inverter, *IEEE Power Electron. Specialists Conf.*, Illinois, USA, 22–27 June 1997.
- [51] Cavalcanti M. C., Farias A. M., Oliveira C., Neves F. A. S., Afonso J. L., Eliminating Leakage Currents in Neutral Point Clamped Inverters for Photovoltaic Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**(1), 435-443.
- [52] Song B. M., Lai J. S., Jeong C. Y., Yoo D. W., A Soft-switching High-voltage Active Power Filter with Flying Capacitors for Urban Maglev System Applications, *IEEE Industry Applications Conf. 36th IAS Annual Meeting. Conf. Rec.*, Illinois, USA, 30 September- 4 October 2001.
- [53] Akagi H., Trends in Active Power Line Conditioners, *IEEE Trans. Power Electron.*, 1994, **9**(3), 263-268.
- [54] El-Habrouk M., Darwish M. K., Mehta P., Active Power Filters: A Review, *IEE Electr. Power Appl.*, 2000, **147**(5), 403-413.
- [55] Beşer E., Arifoğlu B., Çamur S., Kandemir Beşer E., Design and Application of a Single Phase Multilevel Inverter Suitable for Using as a Voltage Harmonic Source, *Journal of Power Electronics*, 2010, **10**(2), 138-145.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

### Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler (SCI, SCI-Expanded)

- [1] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Half-bridge Cascaded Multilevel Inverter Based Series Active Power Filter, *Journal of Power Electronics (JPE)*, 2017, **17**(3), 777-787.
- [2] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Level Number Effect on Performance of A Novel Series Active Power Filter Based on Multilevel Inverter, *Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET)*, 2018 (Kabul tarihi: 6 Kasım 2017).

### Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- [3] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., A New Multilevel Inverter Based Parallel Active Power Filter, *International Journal of Engineering Technologies (IJET)*, 2017, **3**(4), 207-212.

### Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- [4] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Seri ve Paralel Aktif Güç Filtreleri için Geliştirilen Çok Seviyeli Kaskat Bağlı Evirici ve Kontrol Algoritması, *Enerji Elektrik Elektronik Teknolojileri Dergisi (3eElectrotech)*, 2015, **249**, 118-126.

### Uluslararası Bilimsel Etkinliklere Ait Kitaplarda Yayımlanan Sözlü Bildiri Tam Metinleri

- [5] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Single Phase Series Active Power Filter Based on 15-Level Cascaded Inverter Topology, *4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, Ankara, Turkey, 8-10 April 2017.
- [6] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., A Novel 7-level Cascaded Inverter for Series Active Power Filter, *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 17-19 May 2017.

### Ulusal Bilimsel Etkinliklere Ait Kitaplarda Yayımlanan Sözlü Bildiri Tam Metinleri

- [7] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Seri Aktif Güç Filtresi için Geliştirilen Kaskat Bağlı Çok Seviyeli Evirici ve Kontrol Algoritması, *6. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi (EVK)*, Kocaeli, Türkiye, 04-06 Haziran 2015.



- [8] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Çok Seviyeli Evirici Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresi için Geliştirilen Denetim Algoritması, *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014.
- [9] **Karaarslan K.**, Arifoglu B., Beşer E., Çamur S., Çok Seviyeli Evirici Tabanlı Seri Aktif Güç Filtresi için Geliştirilen Kontrol Algoritması, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi (TOK)*, Kocaeli, Türkiye, 11-13 Eylül 2014.



## ÖZGEÇMİŞ

Korhan Karaarslan 1982’de İzmit’te doğdu. İlkokulu 50.Yıl Cumhuriyet İlkokulu’nda okudu. Sınavla girdiği Kocaeli Anadolu Lisesi’nde orta ve lise öğrenimini tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde dağıtılmış üretim kaynaklarının elektrik dağıtım sistemlerine etkisi konusunda çalışmalarda bulunmuştur. Ayrıca, askerlik görevi nedeniyle iki yıl ara verdiği araştırma görevlisi görevini 2009 yılından bu yana Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği A.B.D.’nda sürdürmektedir.

