



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

**ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ VE ÖZEL
GÜÇ CİHAZLARINDA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARIN
İNCELENMESİ**

MELEK DİCLE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ M. MUSTAFA ERTAY**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ VE ÖZEL
GÜÇ CİHAZLARINDA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARIN
İNCELENMESİ

Melek DİCLE tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi M. Mustafa ERTAY

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi M. Mustafa ERTAY

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Murat KALE

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 25/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

12 Temmuz 2019

(İmza)

Melek DİCLE

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Mustafa ERTAY'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

12 Temmuz 2019

Melek DİCLE

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
1.2 TEZİN ORGANİZASYONU	11
2. FACTS VE ÖZEL GÜÇ CİHAZLARI.....	12
2.1 FACTS CİHAZLARININ ÖNEMİ.....	12
2.1.1 Evirici Tabanlı FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması	13
2.1.1.1 Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)	14
2.1.1.2 Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC).....	17
2.1.1.3 Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (IPFC)	18
2.1.1.4 Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)	18
2.2 ÖZEL GÜÇ CİHAZLARININ ÖNEMİ	19
2.2.1 Evirici Tabanlı Özel Güç Cihazlarının Sınıflandırılması	19
2.2.1.1 Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör (DSTATCOM)	20
2.2.1.2 Dinamik Gerilim Düzenleyici (DVR).....	21
2.2.1.3 Aktif Güç Filtreleri (AGF)	21
2.2.1.4 Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC)	22
2.2.1.5 Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS)	23
3. FACTS VE ÖZEL GÜÇ CİHAZLARINDA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARI.....	24
3.1 İKİ SEVİYELİ EVİRİCİLER.....	25
3.2 ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLER.....	27

3.2.1 Diyot Kenetlemeli Evirici (DKE).....	28
3.2.2 Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE).....	30
3.2.3 Kaskat Evirici (KE)	33
3.3 EVİRİCİ YAPILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	35
4. EVİRİCİLERDE KULLANILAN MODÜLASYON TEKNİKLERİ	41
4.1 DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU (PWM).....	43
4.2 SİNÜZOİDAL DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU (SPWM)	46
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI	49
5.1 GİRİŞ	49
5.2 ÜÇ FAZLI SEVİYE SAYILARI FARKLI EVİRİCİLER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN MATLAB/SİMULİNK BENZETİMİ	50
5.2.1 İki Seviyeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi	53
5.2.2 Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici Matlab/Simulink Benzetimi	58
5.2.3 Üç Seviyeli Kapasitör Kenetlemeli Evirici Matlab/Simulink Benzetimi	64
5.2.4 Üç Seviyeli Kaskat Evirici Matlab/Simulink Benzetimi.....	69
5.2.5 Beş Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici Matlab/Simulink Benzetimi.....	75
5.2.6 Beş Seviyeli Kapasitör Kenetlemeli Evirici Matlab/Simulink Benzetimi	80
5.2.7 Beş Seviyeli Kaskat Evirici Matlab/Simulink Benzetimi	86
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sisteminde FACTS ve özel güç cihazları....	3
Şekil 2.1 FACTS cihazlarının sınıflandırılması.....	15
Şekil 2.2 Bir STATCOM'un temel şeması.....	15
Şekil 2.3 STATCOM'a ait reaktif güç üretimi ve tüketimi..	157
Şekil 2.4 STATCOM'un V-I karakteristiği.....	157
Şekil 2.5 Bir SSSC'nin temel şeması.....	158
Şekil 2.6 Bir IPFC'nin temel şeması.....	159
Şekil 2.7 Bir UPFC'nin tek hatlı şeması .	20
Şekil 2.8 Özel Güç Cihazlarının sınıflandırılması.....	21
Şekil 2.9 Bir STATCOM'un temel şeması.....	22
Şekil 2.10 Bir DVR'nin temel şeması.....	22
Şekil 2.11 Bir APF'nin temel şeması.....	23
Şekil 2.12 Bir UPQC'nin temel şeması.....	24
Şekil 2.13 Tek fazlı basit bir UPS için şematik diyagram.....	24
Şekil 3.1 Evirici yapılarının sınıflandırılması.....	26
Şekil 3.2 Çok darbeli STATCOM yapısı.....	27
Şekil 3.3 Üç fazlı iki seviyeli bir evirici yapısı.....	27
Şekil 3.4 İdeal anahtar kullanan farklı seviyelerdeki eviricilerin bir faz yağıının şematik diyagramı a) iki seviye b) üç seviye c) m seviye.....	28
Şekil 3.5 Üç fazlı üç seviyeli DKE'nin devre şeması.....	29
Şekil 3.6 Tek fazlı üç seviyeli KKE'nin devre şeması	32
Şekil 3.7 Tek fazlı H köprü hücresi	34
Şekil 3.8 Üç fazlı, H köprü KE genel yapısı (yıldız bağlı).....	35
Şekil 4.1 Evirici devre yapılarında gerilim ile frekans kontrolü için yöntemler.....	43
Şekil 4.2 Tek fazlı evirici anahtarlama sinyali ile PWM çıkış dalga formu	43
Şekil 4.3 PWM yöntemleri	44
Şekil 4.4 PWM'in çalışma prensibi	45
Şekil 4.5 SPWM'nin sınıflandırılması.....	48
Şekil 4.6 Alt-harmonik PWM.....	49
Şekil 5.1 Sistemin MATLAB/Simulink modeli	52
Şekil 5.2 PD modülasyonu ile anahtarlanan üç fazlı eviriciye ilişkin referans ve taşıyıcı sinyal şekilleri a) iki seviye b) üç seviye c) m seviye.....	54
Şekil 5.3 SPWM denetimli iki seviyeli filtreli evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	55
Şekil 5.4 SPWM denetimli iki seviyeli filtreli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	57
Şekil 5.5 SPWM denetimli iki seviyeli filtresiz evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	58
Şekil 5.6 SPWM denetimli üç seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	61
Şekil 5.7 SPWM denetimli üç seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan	

	asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	62
Şekil 5.8	SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	64
Şekil 5.9	SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.....	66
Şekil 5.10	SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	67
Şekil 5.11	SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	69
Şekil 5.12	SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	72
Şekil 5.13	SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	73
Şekil 5.14	SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.....	75
Şekil 5.15	SPWM denetimli seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi, b) fazlar arası gerilim, c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	77
Şekil 5.16	SPWM denetimli beş seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	79
Şekil 5.17	SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı, b) stator akımı, c) açısal hız, d) tork dalga şekilleri.....	80
Şekil 5.18	SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	83
Şekil 5.19	SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	84
Şekil 5.20	SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri	86
Şekil 5.21	SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim	88
Şekil 5.22	SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.....	90
Şekil 5.23	SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.....	91

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1 Tek fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin anahtarlama durumları..	30
Çizelge 3.2 Tek fazlı üç seviyeli KKE'deki anahtarlama durumları.....	32
Çizelge 3.3 A fazına ait H köprü KE'nin ilgili voltaj seviyelerinin anahtarlama durumları.....	35
Çizelge 3.4 İki seviyeli evirici ile m seviyeli çok seviyeli eviricinin her fazı için gereken farklı bileşen sayısı açısında yapılan kıyaslamaların değerlendirilmesi..	40
Çizelge 5.1 Benzetimde kullanılan filtre parametreleri..	51
Çizelge 5.2 İki, üç ve beş seviyeli eviricilerin benzetiminde kullanılan parametreler..	52
Çizelge 5.3 Filtreli üç faz iki seviyeli eviricinin THD değerleri.	59
Çizelge 5.4 Filtresiz üç faz iki seviyeli eviricinin THD değerleri.	59
Çizelge 5.5 Filtreli üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.....	64
Çizelge 5.6 Filtresiz üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.....	64
Çizelge 5.7 Filtreli üç faz üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.	70
Çizelge 5.8 Filtresiz üç faz üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.	70
Çizelge 5.9 Filtreli üç faz üç seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.	75
Çizelge 5.10 Filtresiz üç faz üç seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.	75
Çizelge 5.11 Filtreli üç faz beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri. ...	81
Çizelge 5.12 Filtresiz üç faz beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri. .	81
Çizelge 5.13 Filtreli üç faz beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.	86
Çizelge 5.14 Filtresiz üç faz beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.	86
Çizelge 5.15 Filtreli üç faz beş seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.	92
Çizelge 5.16 Filtresiz üç faz beş seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.....	92

KISALTMALAR

AGF	Aktif güç filtresi
AKE	Akım kaynaklı evirici
CM	Ortak mod
DAVIC	Dağıtılmış uyarlamalı sanal empedans kontrol
DKE	Diyot kenetlemeli evirici
DSP	Dijital sinyal işlemci
DSTATCOM	Dağıtım statik senkron kompanzatör
DTF	Ayrık zaman çatı
DVR	Dinamik gerilim düzenleyici
EMPT	Electromagnetic transients program
EPRI	Elektrik enerjisi araştırma enstitüsü
FACTS	Esnek alternatif akım iletim sistemi
GKE	Gerilim kaynaklı evirici
IACFFS	Anlık ortalama akım ileri besleme paylaşımı
IGBT	İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör
IPFC	Birleştirilmiş güç akış kontrolörü
KE	Kaskat evirici
KKE	Kapasitör kenetlemeli evirici
MÇSE	Modüler çok seviyeli evirici
PSCAD	Power systems computer aided design
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RMS	Root mean square
SMIB	Tek makineli sonsuz bara
SOGI-PLL	İntegratör tabanlı faz kilitlemeli döngü
SPS	Sim güç sistemi
SPWM	Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu
SSCL	Yarı iletken akım sınırlayıcı
SSSC	Statik senkron seri kompanzatör
SSTS	Yarı iletken transfer anahtarı
STATCOM	Statik senkron kompanzatör
SVC	Statik var kompanzatör
TCSC	Tristör kontrollü seri kapasitör
TCPST	Tristör kontrollü faz kaydırmalı transformatör
THD	Toplam harmonik bozunum
UPFC	Birleşik güç akış kontrolörü
UPQC	Birleşik güç kalite düzenleyici
UPS	Kesintisiz güç kaynağı

SİMGELER

C_{dc}	DC hat kapasite değeri
f	Temel frakans
f_m	Referans dalğanın frekansı
f_s	Üçgen taşıyıcı dalğanın frekansı
f_{sw}	Eviricinin anahtarlama frekansını
I_r	Rotor akımı
I_s	Stator akımı
L_c	Çıkış filtresi
L_m	Motorun mıknatıslanma indüktansı
L_f	LC filtre indüktör değeri
m	Seviye sayısı
m_f	Frekans modülasyon oranı
M_i	Modülasyon indeksi
n	Modül sayısı
T_e	Tork
V_{dc}	DC bara gerilimi
V	Sistem gerilimi
V_o	Eviricinin çıkış gerilimi
V_R	Referans sinyalin tepe değeri
V_P	Üçgen sinyalin tepe değeri
W_r	Açısal hız
φ	Faz farkı
X	Kaçak reaktansı
$\Delta i_{L_f \max}$	Filtre İndüktör akımı

ÖZET

ESNEK ALTERNATİF AKIM SİSTEMLERİ VE ÖZEL GÜÇ CİHAZLARINDA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARIN İNCELENMESİ

Melek DİCLE

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Dr. Öğr. Üyesi M. Mustafa ERTAY

Temmuz 2019, 107 sayfa

Günümüzde her alanda ve insan faaliyetlerinin olduğu her yerde enerji gereklidir. Maliyet ve çevre sorunları hem enerji santrallerinin hem de yeni iletim hatlarının yapımını geciktirmiş, ancak elektrik enerjisine olan talep hızla artmaya devam etmiştir. Enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artması ve güç gereklilikleri, elektrik güç sistemlerinin alternatif çözüm olarak kullanılmasına neden olmuştur. Elektrik güç sistemlerinin güvenilir ve güvenli çalışması için de güç elektroniği teknolojileri kullanılmıştır. Güç elektroniği teknolojilerindeki gelişmeler, güç elektroniği esaslı kontrol cihazı olan FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi) cihazları ve özel güç cihazlarının güvenilirliğini ve işlevselliğini arttırmış ve tercih edilmesine neden olmuştur. FACTS ve özel güç cihazları, iletim şebekesinin güç iletim kapasitesini en üst düzeye çıkarmada, dağıtım sisteminin ortak bağlantı noktasında yüksek güç kalitesi sağlamada ve harmoniklerin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisi sektöründe kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir FACTS cihazı türü olan STATCOM (Statik Senkron Kompanzator), iletim hattında kullanılmaktadır. Dağıtım hattında ise DSTATCOM (Dağıtım Statik Senkron Kompanzator) adıyla özel güç cihazı olarak kullanılmaktadır. STATCOM ve DSTATCOM'un en önemli birimi eviricilerdir. Literatürde birçok evirici yapısı tavsiye edilmiş ve çoğu uygulamalarda kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında FACTS ve özel güç cihazlarında kullanılan iki seviyeli ve çok seviyeli evirici yapıları incelenmiş ve bu evirici yapılarından iki seviyeli evirici, diyot kenetlemeli evirici, kaskat evirici, kapasitör kenetlemeli evirici yapıları kullanılmıştır. Daha sonra bu evirici yapıları modellenerek MATLAB/Simulink ortamında simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların analizi iki kısımdan oluşmuştur. Birinci aşamada eviricilerin yüksüz olarak SPWM (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu) ile anahtarlaması yapılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada bu evirici yapılarıyla yüklü bir sistemin analizi yapılmıştır. Yük olarak motor yükü kullanılmış ve simülasyon buna göre incelenmiştir. Bu simülasyonlarda, modülasyon indeksi değeri değiştirilen eviricilerin THD (Toplam Harmonik Bozunum)'leri MATLAB FFT analizi kullanılarak yapılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda evirici yapılarının hem avantaj hemde dezavantajları anlatılmıştır. Ayrıca literatürde yer alan örnek uygulamalar sunulmaktadır.

Anahtar sözcükler: Güç sistemleri, Eviriciler, FACTS cihazları, Özel güç cihazları, STATCOM

ABSTRACT

INVESTIGATION OF INVERTER STRUCTURES USED IN FLEXIBLE ALTERNATIVE CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS AND CUSTOM POWER DEVICES

Melek DİCLE

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics
and Computer Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. M. Mustafa ERTAY

July 2019, 107 pages

Nowadays energy is essential in every field and every place where the human activity is existed. Energy cost and environmental issues has delayed not only construction of the new power plants but also delayed the new transmission lines, but the demand for energy increases day by day and power requirements has been caused to use the electric power systems as an alternative solution. In order to run the electric power systems reliable and safe power electronics technologies were used. Improvements in power electronics technology, increase the reliability and functionality of the caused the power electronics based control device FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) and custom power devices and make them to be preferred. FACTS and custom power devices is performing an important role to raise the power transmission capacity of the network to the utmost level, providing the high power quality at the common connection port of the distribution system and decreasing the harmonic waves. Therefore it is commonly used and accepted in the electric energy sector. STATCOM (Static Synchronous Compensator), is used in the transmission lines as a kind of FACTS device. In the distribution line special power device is used known as DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator). The most important unit of the STATCOM and DSTATCOM are inverters. In the literature numerous inverter structure are advised and used in many implementations. In this thesis study two level and multi-level inverter structures were examined where used in the FACTS devices and two level inverter, diode clamping inverter, cascade inverter, capacitor clamped inverter structures were used. Then these inverter structures were modeled and simulations were performed on MATLAB/Simulink environment. Simulations were analyzed in three phases. In the first stage simulation has been performed by switching the inverters with SPWM (Sine Pulse Width Modulation) neutrally. In the second stage a motor load system was analyzed by these inverter structures. Motor load has been used as a load and simulation was analyzed according to it. In these simulations Total Harmonic Distortion (THD) of inverters which modulation index value was changed, and analysis were made by using MATLAB FFT tool. In line with these results, both advantages and disadvantages of inverter structures are explained. In addition, examples applications in the literature are presented.

Keywords: Power systems, Inverters, FACTS devices, Custom power devices, STATCOM

1. GİRİŞ

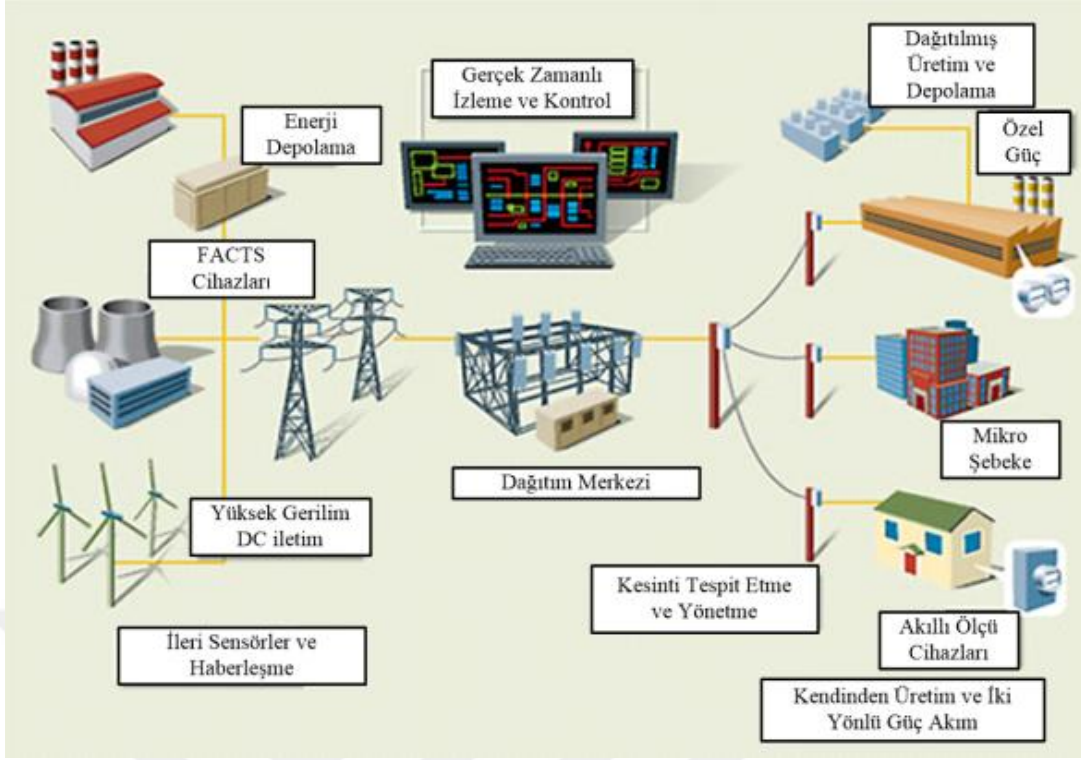
Günümüzde enerji tüketimine bağlı olarak sürekli artan elektrik enerji ihtiyacı endişe verici bir durumdadır. Bu endişe endüstriyel büyüme, nüfustaki artış, artan yaşam standartları ve temel olarak elektrik şebekesine bağlı elektronik cihazların artan uygulamalarıyla ilgilidir. Dünya çapında 1980’den bu yana %45 artış gösteren enerji tüketiminin, 2030 yılından sonra %70’ten daha fazla artacağı öngörülmektedir [1]. Elektrik enerjisi ihtiyacının her geçen gün giderek artması, geleneksel kompanzasyon cihazlarının yetersiz kalması, yeni hatların yapılmasındaki güçlükler gibi birçok sebepten dolayı, yeni enerji kaynakları araştırılmakta, tüketimi azaltmak için gerekli düzenlemeler uygulanmakta, verimliliği maksimum olan sistemlerin tasarlanması yönünde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Diğer yandan, mevcut güç dağıtım sisteminin kaynak akımında harmonikler, gerilim düşmesi ve yükselmesi vb. gibi güç kalitesi sorunlarını ortaya çıkaran doğrusal olmayan yükler içermesi de elektrik enerji verimliliği düşürmektedir. Bu nedenle mevcut olan enerji dağıtım sistemlerinin verimliliğinin en yüksek seviyeye çıkarılması, seçenek olmaktan çıkmış ve zorunluluk haline gelmiştir [2], [3].

Yapılan araştırmalarda, mevcut enerji iletim sistemlerinden en yüksek seviyede nasıl yararlanacağı konusunda, güvenilirliği ve kararlılığı yüksek seviyeli olan güç elektroniği teknolojisinin önem kazandığı görülmektedir. Teknoloji ilerledikçe ve güç elektroniğinin uygulama alanları genişledikçe daha yüksek sıcaklıklarda daha az kayıplarla çalışabilen yeni nesil yarı iletken aygıtlar geliştirilmektedir. Gelişen yarı iletken teknolojisini akım ve gerilim sınırlarının sürekli olarak yükselmesine ve aynı zamanda yarı iletkenlerin çalışma hızlarının artmasına olanak tanımaktadır. Yarı iletken güç elemanları ile ilgili geçtiğimiz yıllarda çok önemli gelişmeler olmuştur. Yarı iletken teknolojisindeki bu gelişmeler, güç elektroniği devrelerinin güç kapasitelerinin artmasına, boyutlarının küçülmesine ve maliyetlerinin azalmasına imkân sağlamıştır [2], [3], [4].

Güç elektroniği teknolojisindeki bu gelişmeler doğrultusunda, iletim ve dağıtım sistemlerinden daha yüksek düzeyde verim alabilmek için araştırmalar yapılmakta ve

alışmalar devam etmektedir. Bunun sonucu olarak enerji iletim ve dağıtım sistemlerindeki en önemli sorunun güç kalitesi sorunları ve reaktif güç kompanzasyonu olduğu öngörülmektedir. Güç sistemlerinin sağlıklı işlemesi için endüstriyel güç tüketiminin neden olduğu güç kalitesi sorunlarının tespiti ve çözümü şu anda enerji endüstrisinin karşılaştığı en önemli araştırma konularından biridir. [5]. Güç kalitesi sorunları genel olarak geçici ve hızlı değişimler, RMS (Root Mean Square) gerilim değişimleri ve kesintiler, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, sürekli devam eden değişimler, dalga şekli bozulmaları, DC offset, harmonikler, gerilim dalgalanmaları, güç frekansı değişimleri şeklinde sınıflandırılabilir [4], [5]. Bu sorunların bir çoğunun çözümü reaktif güç kompanzasyonu ile mümkündür. Geçen süre içerisinde enerji verimliliğini ve kalitesini artıran hassas yüklerin endüstride kullanımının ciddi gelişim göstermesi reaktif güç kompanzasyonunun önemini artırmıştır [6], [7].

Bu nedenle iletim ve dağıtım sistemlerinde hem kontrollü ve hemde hızlı kompanzasyon için FACTS (Flexible AC Transmission Systems: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazları ve Özel Güç (Custom Power) cihazları olarak bilinen temeli güç elektroniğine dayanan kompanzasyon cihazları tercih edilmektedir [3]. İletim sistemleri için geliştirilen FACTS cihazı ilk olarak 1988 yılında N.G. Hingorani tarafından açıklanmıştır [8]. Daha sonra yine N.G. Hingorani tarafından 1995 yılında FACTS cihazının bir devamı olarak dağıtım sistemleri için özel güç cihazları tanıtılmıştır [9]. FACTS ve özel güç cihazları yeni gelişmekte olan bir teknolojidir. Asıl görevleri alternatif akım sistemlerinde kontrol edilebilirliği ve güç transferi verimliliğini artırmak olan bu cihazlar geçen süre içerisinde ciddi gelişim göstermektedir. Modern bir şebekenin parçası olarak entegre edilebilecek FACTS ve özel güç cihazları Şekil 1.1’de bir elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sisteminde şematik olarak gösterilmiştir [10].



Şekil 1.1 Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sisteminde FACTS cihazları ve özel güç cihazları [10].

Günümüzde FACTS ve özel güç cihazları ailesi içinde güç elektroniğine dayanan pek çok cihaz önerilmiştir. Bu cihazlardan en çok tercih edileni STATCOM ve DSTATCOM'dur. STATCOM, diğer FACTS cihazlarına göre farklı çalışma prensibi ve tasarımına sahip, iletim sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını azaltmak için kullanılan bir FACTS cihazıdır [11]. DSTATCOM ise dağıtım sistemindeki çeşitli yüklerin neden olduğu reaktif güç ve dengesizliklerin dengelenmesi için kullanılan özel güç cihazıdır [12]. Hem STATCOM hem de DSTATCOM, iletim ve dağıtım sistemlerinde kontrolü sağlama ve cevap verme hızı açısından en iyi esnekliği sağlar. Bu cihazların en temel yapı taşı evirici kısmıdır. Güç elektroniğinin de temel devrelerinden olan eviriciler istenilen gerilim, güç veya frekans değerlerinde alternatif akım elde etmek için kullanılır.

FACTS ve özel güç cihazlarının ve bu cihazlardan özellikle STATCOM ve DSTATCOM'un evirici kısmı için, çalışma prensiplerinin anlatıldığı, modelleme ve analizlerinin yapıldığı birçok evirici yapısı literatürde önerilmiş, ayrıca bir çoğu çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Aşağıdaki bölümde bu cihazlarda kullanılan evirici yapıları ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar hakkında literatür bilgisi verilmiştir.

Vinnakoti ve Kota 2018 yılında yaptıkları çalışmada yapay sinir ağı tabanlı kontrol cihazı tasarlamıştır. Tasarımda beş seviyeli diyot kenetlemeli evirici tabanlı UPQC (Birleşik Güç Kalite Düzenleyici) kullanmıştır. Bu çalışma beş seviyeli UPQC'nin yük gerilimi ve besleme akımlarındaki harmonikleri başarıyla azalttığı ayrıca voltaj düşüşünü ve voltaj yükselmesini etkili bir şekilde telafi ettiğini göstermektedir [13].

Fubo ve arkadaşları 2016 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada 35kV MÇSE (Modüler Çok Seviyeli Evirici) tabanlı UPQC'nin şönt ve seri dönüştürücüleri arasında oluşan salınım akımının bastırılması için bir mekanizma tasarlamıştır [14].

Khadkikar ve Chandra 2009 yılında yaptıkları çalışmada dengesiz yük akımlarını dengelemek amacıyla üç fazlı dört seviyeli GKE (Gerilim Kaynaklı Evirici) kullanan UPQC tabanlı yeni bir kontrol stratejisi önermektedir [15].

Hu ve arkadaşları tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen çalışmada dengesiz elektrik şebekesi koşullarında kullanılabilecek modüler çok seviyeli evirici içeren UPFC (Birleşik Güç Akış Kontrolörü) için oldukça güvenilir bir kontrol stratejisi önerilmiştir. [16].

Pu ve arkadaşları 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada modüler çok seviyeli eviricili UPFC' nin topoloji yapısını ve çalışma prensibini analiz etmiştir. Daha sonra çok modüler çok seviyeli eviricili UPFC'nin tek fazlı topraklama hata durumu ile iki fazlı kısa devre hata durumu altında çalışma özelliklerini çalışmıştır. Ayrıca, UPFC cihazının özellikleri ile ve seri ve paralel tarafın farklı yapılarına göre, çok seviyeli eviricili UPFC cihazı için genel koruma tasarımı sunulmaktadır [17].

Arun ve Manikandan 2014 yılında yaptıkları çalışmada aktif güç akışını kontrol etmek amacıyla gerilim kaynaklı çok seviyeli evirici tabanlı UPFC için yeni bir yapılandırma sunmaktadır [18].

Panda ve Patnaik 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada dağıtım ağlarında aktif harmonik filtreleme için kaskat bağlı çok seviyeli evirici kullanmış ve AGF (Aktif Güç Filtresi)'yi gerçekleştirmiştir. Kullanılan evirici yapısı üç, beş, yedi ve dokuz seviyelidir [19].

Kararaslan ve arkadaşları tarafından 2015 yılında gerçekleştirilen çalışmada kaskat bağlı çok seviyeli evirici yapısına sahip seri bağlı AGF (Aktif Güç Filtresi) için bir kontrol algoritmasına yer verilmiştir. Seri AGF ile yük geriliminin sinüzoidal sinyale dönüştürülmesi amaçlanan çalışmanın simülasyon sonuçlarında gerçekleştirilen kontrol

algoritması ile yük geriliminin sinüzoidal sinyale yakın hale geldiği görülmüştür [20].

Jungling ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları çalışmada çok seviyeli KE (Kaskat Evirici) tabanlı 40 kVA gücünde bir prototip AGF gerçekleştirmiş ve bu AGF için kapasitör gerilim dengeleme kontrol yöntemiyle kapalı döngü seçici harmonik telafi yöntemi önermiştir. Önerilen yöntem bir DSP (Dijital Sinyal İşlemci) kontrol sistemi ile uygulanmış ve sonuçları yapılan deneyler ile gösterilmiştir. [21].

Rokhafrooz ve Mosallanejad tarafından 2017 yılında gerçekleştirilen çalışmada 230 kV iletim hattının güç kapasitesini arttırmak için çift KKE (Kapasitör Kenetlemeli Evirici) tabanlı çok hücreli kaskat bağlantısına dayanan SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzator) içeren bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemdeki SSSC'nin içerdiği çok seviyeli eviricinin çıkış voltajı 21 seviyeye sahiptir. Yapılan çalışmada çok seviyeli evirinin yapısı ve anahtarlama stratejisi incelenmiş, sistemin yapısı ve kontrol yöntemi ile anlık p-q gücü sunulmuştur. Önerilen sistemin ayrıca analizleri yapılmış ve simülasyon sonuçları MATLAB/Simulink tarafından sunulmuştur [22].

Geethalakshmi ve Dananjayan tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada yüksek güç uygulamaları için hat üzerindeki güç akışını düzenleyen SSSC tabanlı yeni bir çok darbeli - çok seviyeli gerilim kaynaklı evirici topolojisi önerilmiştir. Bu yeni evirici SSSC'nin çalışmasını gerçekleştirmek için kullanılmış ve performansı otomatik güç akışı kontrol modunda çalıştırılarak değerlendirilmiştir [23].

Griffo ve Lauria 2008 yılında yaptıkları çalışmada evirici tabanlı FACTS cihazları olan STATCOM ve SSSC uygulamaları için yeni bir topoloji önermiştir. İki seviyeli üç fazlı gerilim kaynaklı evirici kullanan bu topoloji hem seri hem de paralel reaktif güç kompanzasyonunda kullanılmıştır [24].

Geethalakshmi ve arkadaşları 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada SSSC'nin ana özelliklerinin ve çalışma prensiplerinin ayrıntılı analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 48 seviyeli çok darbeli bir gerilim kaynaklı evirici kullanmışlardır. 48 seviyeli çok darbeli gerilim kaynaklı eviricinin, harmonik içeriği düşük üç fazlı sinüzoidal çıkış gerilimi ürettiğini gözlemlemişlerdir. Önerdikleri SSSC modelinin performansı sonuçlarını, MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirmiş ve bu sonuçları sunmuşlardır [25].

Han ve arkadaşları tarafından 2002 yılında gerçekleştirilen çalışmada faz başına altı H-köprü modülünden oluşan bir çoklu köprü eviriciyi temel alan bir SSSC önerilmektedir.

Önerdikleri sistem, H köprü modüllerinin sayısını ekleyerek veya çıkararak çalışma voltajını güç sistemi voltajıyla eşleştirme esnekliğine sahiptir. Bu sistemin dinamik karakteristiğini, EMTP (Electromagnetic Transients Program) kodlu simülasyonlarla analiz etmişler ve uygulanabilirliğini, ölçeklendirilmiş bir model kullanarak yaptıkları deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır [26].

İnci ve arkadaşları 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada şebekedeki istenmeyen gerilim düşmelerinin hızlı ve güvenli bir şekilde belirlenebilmesi için bir sistem yapısı geliştirmiştir. Geliştirilen İkinci Dereceden Genelleştirilmiş SOGI-PLL (İntegratör Tabanlı Faz Kilitlemeli Döngü) yapısı 5 seviyeli DKE (Diyot Kenetlemeli Evirici)'li DVR (Dinamik Gerilim Düzenleyici)'de uygulanmış ve sistemin performansı PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients with DC Analysis) programı ile sunulmuştur [27].

Bhumkittipich ve arkadaşları tarafından 2013 yılında gerçekleştirilen çalışmada dengeleme gerilimi oluşturmak için üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici kullanan 10 kW DVR uygulaması sunulmuştur. Üç seviyeli evirici anahtarlama kısmı IGBT (İzole Edilmiş Kapılı, İki Kutuplu Transistör) kullanılarak tasarlanmış ve bu evirici ile daha yüksek bir voltaj aralığı elde edildiği görülmüştür. Sonuçlar dSPACE kartı üzerinden MATLAB/Simulink kullanılarak kontrol edilmekte ve simülasyon sonuçları, önerilen evirici ve denetleyici dahil olmak üzere DVR'nin performansını sunmaktadır [28].

Roncero-Sanchez ve Acha 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada beş seviyeli kapasitörlü kenetlemeli eviricili DVR için tekrarlanan kontrole dayalı bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Kontrol yapısı üç alt sistemden oluşmaktadır. Birincisi modülasyon yüksek frekanslı harmonikleri ortadan kaldırmak için kullanılan filtrenin geçici tepkisini geliştirmekte, ikincisi yük voltajıyla ilgilenmekte ve üçüncüsü kapasitör kenetlemeli eviricide dengeli gerilim sağlamaktadır. Sisteminin modellemesini gerçekleştirmek için PSCAD/EMTDC kullanılmış ve simülasyon sonuçları ile kontrol yaklaşımının çok etkili bir şekilde çalıştığı ve mükemmel gerilim regülasyonu sağladığı gösterilmiştir. [29].

Al-Hadidi ve arkadaşları tarafından 2008 yılında gerçekleştirilen çalışmada önemli ölçüde daha az enerji depolama kapasitesi gerektiren kaskat evirici tabanlı DVR tasarımı sunulmuştur. Kaskat evirici yapısı şönt bağlı tristör anahtarlama bir bobin ile

desteklenmektedir. Önerilen DVR tasarımının uygulanabilirliği, bir güç sistemi simülasyon yazılımı PSCAD/EMTDC ile birlikte analitik bir formülasyon kullanarak gösterilmiştir [30]. Yine Al-Hadidi ve arkadaşları tarafından 2008 yılında gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise kaskat evirici tabanlı DVR'nin enerji depolama özelliği kullanılarak dağıtım ağlarında gerilim yükselmesini azaltmak için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Analitik sonuçlar yedi seviyeli kaskat evirici simülasyonu ve ayrıca bir laboratuvar prototipi üzerinde yapılan testler aracılığıyla ile doğrulanmıştır [31].

Ghosh ve arkadaşları 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada hassas ancak dengesiz ve bozulmuş yükler için şönt bağlantılı kondansatöre sahip gerilim kaynaklı evirici kullanan bir DVR tasarımı önerilmiştir. DVR'nin temel amacı, besleme gerilimindeki dengesizlikten bağımsız olarak yük terminalindeki voltajı düzenlemektir. Önerdikleri DVR tasarımı, kapsamlı dijital bilgisayar simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır [32].

Wei ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları çalışmada yeni bir DAVIC (Dağıtılmış Uyarlamalı Sanal Empedans Kontrol) yöntemi sunmuştur. Önerilen yöntem ile paralel bağlı gerilim kaynaklı eviricileri içeren Modüler UPS (Kesintisiz Güç Kaynağı) sistemlerinin kontrolü sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada daha ucuz bir dijital kontrol cihazı seçerek hem şebekenin hem de kontrol ünitesinin maliyetinin düşürülebileceği görülmüştür. Kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini doğrulamak için iki evirici modülü içeren simülasyon sonuçları PLECS yazılımı ile kontrol edilmektedir [33].

Kim ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada paralel gerilim kaynaklı evirici modüllerine sahip bir UPS sistemi için üçüncü dereceden multinomiyal düşüş modelini kullanan yeni bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen multinom modelin, dinamik cevabı azaltmadan kararlı durum hatasını azalttığı görülmektedir. Paralel eviricilerin önerilen multinom modeliyle ile simülasyon sonuçları MATLAB ve PSIM yazılımı ile gösterilmiştir [34].

Singh ve arkadaşı 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada IACFFS (Anlık Ortalama Akım İleri Besleme Paylaşımı) özellikli bir UPS için çok seviyeli evirici sistem gerçekleştirmiştir. Sistemi doğrulamak için kritik yükler içeren iki seviyeli UPS evirici sistemi kullanılmakta ve tasarım simulink ile SPS (Sim Güç Sistemi) araç kutuları

kullanılarak MATLAB ortamında DTF (Ayrık Zaman Çatısında)'de simülasyonu gerçekleştirilmektedir [35].

Reedy ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada multibus sisteminin güç kalitesinin iyileştirilmesi ve geçici kararlılığın artırılması için çok seviyeli GKE kullanan IPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) önermiştir. Önerilen sistemde IPFC'li dokuz veriyolu ve on dört veri yolu Matlab/Simulink kullanılarak modellenmiş ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir [36].

Bharathi ve Rajan 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada iletim sisteminde güç akışı yönetimi için FACTS kontrol cihazlarından diyot kenetlemeli evirici tabanlı IPFC geliştirmiştir. IPFC'nin 48 darbeli çok seviyeli gerilim kaynaklı eviriciden oluşan performansının araştırılması için tipik ve basit bir güç sistemi modeli önerilmiştir [37].

Salem ve Sood tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada benzer şekilde boyutlandırılmış iki paralel iletim hattının empedanslarını telafi etmek için iki seviyeli iki diyot kenetlemeli evirici kullanan bir IPFC sistemi için kontrol şeması modeli sunulmuştur. Gerçekleştirilen model, IPFC'nin sistem davranışını göstermek için EMTP-RV programı ile simüle edilmiştir [38].

Gawande ve arkadaşları 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada üç seviyeli evirici tabanlı DSTATCOM için taşıyıcı bazlı histeresiz modülasyonu kullanarak sabit anahtarlama frekans akımı kontrol tekniğini önermiştir [39].

Deniz ve arkadaşları 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada 3 seviyeli kaskat evirici kullanan STATCOM'un denetimi amacıyla önermiştir. DSTATCOM'un performansı, gerçekleştirdikleri deney düzeneği aracılığıyla elde ettikleri deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir [40].

Çetin ve Ermiş 2009 yılında yaptıkları çalışmada Kemerköy Elektrik Üretim A.Ş.'nin kömür hazırlama sisteminin reaktif güç kompanzasyonu için 2 seviyeli gerilim kaynaklı evirici kullanan 1 kV seviyesinde bir DSTATCOM uygulaması gerçekleştirmiştir [41].

Masdi ve arkadaşları tarafından 2009 yılında geliştirilen üç seviyeli gerilim kaynaklı eviricili bir DSTATCOM uygulaması ile dengesiz dağıtım sisteminde yük kompanzasyonu amaçlanmıştır [42].

Bilgin ve arkadaşı 2007 yılında yaptıkları çalışmada Türkiye Kömür işletmelerindeki elektrik kömür kazı makinelerinin reaktif güç kompanzasyonu için 2 seviyeli AKE

(Akım Kaynaklı Evirici) kullanan 1 kV düzeyinde bir DSTATCOM sistemi gerçekleştirmiştir [43].

Shukla ve arkadaşları 2005 yılında yaptıkları çalışmada kapasitör gerilimlerinin sabit kalmasını ve aynı zamanda istenen akım profilinin korunmasını sağlayan, histerezis kontrolü kullanarak akımı kontrol etmek amacıyla bir yöntem önermiştir. Bunun için KKE kullanan DSTATCOM uygulaması gerçekleştirilmiştir [44].

Benzerafa ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada üç seviye gerilim kaynaklı evirici tabanlı DSTATCOM kullanarak bulanık bir denetleyici gerçekleştirmiştir [45].

Elserougi ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada orta ve yüksek voltaj uygulamalarında şönt reaktif güç kompanzasyonu için yeni bir üç fazlı transformatörsüz MÇSE (modüler çok seviyeli evirici)' ye sahip STATCOM önerilmiştir [46].

Shu ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında 5 seviyeli DKE (Diyot Kenetlemeli Evirici) tabanlı STATCOM ile DC bağlantılı kondansatör gerilimini dengede tutmak amacıyla bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemin uygulaması gerçekleştirilerek ve benzetim sonuçları elde edilmiştir [47].

Filizadeh ve Gole 2005 yılında yaptıkları çalışmada STATCOM'daki harmonik bozulmayı incelemek ve buradaki DC kapasitör değerinin önemini belirtmek amacıyla 2 seviyeli bir gerilim kaynaklı eviricinin harmonik performansını araştırmıştır [48].

Muyeen ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada iki seviyeli gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM kullanarak iki rüzgar çiftliğindeki rüzgar jeneratörlerinin hem geçici ve hem de dinamik durum analizini incelemiştir [49].

Saeedifard ve arkadaşları tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada harmonik içeren bir sistemde STATCOM'un reaktif gücü hızlı ve kararlı bir şekilde dengeye getirmedeki performansı araştırılmıştır. 3 seviyeli DKE kullanan STATCOM'un çeşitli sistem şartları göz önüne alınarak yapılan simülasyonlarında PSCAD yazılımı kullanılarak doğrulanmıştır [50].

Ran ve arkadaşları 2002 yılında yapmış oldukları çalışmada 3 seviyeli DKE tabanlı STATCOM'da meydana gelen harmoniklerin birbirlerine olan etkisini hem AC hemde DC kısım için inceleyerek uygulamasını gerçekleştirmiştir [51].

Liang ve Nwankpa tarafından 1998 yılında yapılan çalışmada yeni bir STATCOM türü önerilmiştir. Bobin ve DC kapasitörlerin boyutunun daha da azaltıldığı ve reaktif güç

değişimine son derece hızlı cevap veren bu yeni STATCOM, birkaç özdeş tam köprü gerilim kaynaklı eviricinin kaskat bağlantısıyla oluşturulmuştur [52].

Peng ve arkadaşları tarafından 1996 yılında yapılan çalışmada yüksek voltajlı, yüksek güçlü uygulamalar için ayrı DC kaynaklarına sahip yeni birçok seviyeli KE önerilmiş ve STATCOM' da uygulanmıştır. Eviricinin seviye sayısı arttıkça döngü başına sadece bir kez anahtarlama ile sinüzoidal sinyal gerilimi üretebildiği ve trafo bazlı çok seviyeli eviricili STATCOM' da boyut ve ağırlık problemlerini çözebildiği gösterilmiştir [53].

Literatürde çok seviyeli KE tabanlı STATCOM için önerilen birçok çalışma bulunmaktadır [54]-[68].

Eviricilerin gelişimiyle birlikte günümüzde STATCOM ve DSTATCOM cihazlarında tercih edilen diğer evirici ise MÇSE (Modüler Çok Seviyeli Evirici) yapılarıdır. MÇSE benzersiz modülerliği, düşük anahtarlama frekansı, yüksek verimlilik ve düzgün sinüzoidal çıkış gerilimleri nedeniyle güç uygulamalarında daha yüksek güvenilirlik ve daha iyi performans sunmaktadır [69].

Chen ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada kapasitör gerilimi dengeleme amacıyla MÇSE tabanlı üç fazlı DSTATCOM için yeni bir kontrol yöntemi önerilmiştir [70].

Mohammadi ve Bina tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada orta gerilim yüksek akım güç uygulamalarında yüklerin tam olarak dengelenmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve özellikle üç veya dört hatlı sistemlerin dengelenmesi için yeni bir MÇSE yapısı önerilmiş ve bu yapı bir STATCOM' a uygulamıştır. Önerilen MÇSE 'nin performansını değerlendirmek için sekiz yarım köprü modülünden oluşan 15 kVA, 400 V modüler bir laboratuvar prototipi tasarlanmış ve deneysel sonuçlar sunulmuştur [71].

Bu çalışmaların yanı sıra literatürde yer alan MÇSE tabanlı STATCOM için önerilen başka çalışmalarda bulunmaktadır [72]-[78].

1.1 MATERYAL VE YÖNTEM

Literatürde güç sistemlerinde FACTS ve özel güç cihazlarında ve bu cihazlardan özellikle üstün avantajları sebebiyle en çok tercih edilen STATCOM ve DSTATCOM cihazlarında kullanılan evirici yapılarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda

iki seviyeli ve çok seviyeli evirici yapıları incelenmiş ve bunlar sunulmuştur. Literatürde yer alan çalışmalar referans alınarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında iki seviyeli evirici, diyot kenetlemeli evirici, kaskat evirici, kapasitör kenetlemeli evirici yapıları kullanılmıştır. Daha sonra her bir evirici yapısının çalışma performansları, karakteristikleri ayrıntılı olarak belirtilerek modellenmesi ve simülasyonu MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Eviricilerin performanslarını gözlemek için evirici kontrolü amacıyla açık çevrim kontrol ile SPWM (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniği uygulanmıştır. Eviricilerin hem yüksüz hemde üç fazlı sincap kafesli asenkron motor yükünün kullanıldığı bir sistemde analizi yapılmış ve simülasyonları buna göre incelenmiştir. Bu simülasyonlarda, THD (Toplam Harmonik Bozunum) değerini elde etmek için eviricilerin modülasyon indeks değeri değiştirilmiş ve MATLAB FFT aracı kullanılarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda evirici yapılarının hem avantaj hem de dezavantajları ortaya konulmuştur.

1.2 TEZİN ORGANİZASYONU

Bölüm 1’de, enerji ihtiyacı ve güç sistemlerinde kullanılan FACTS ve özel güç cihazları ile bu cihazlardan STATCOM ile DSTATCOM cihazlarının önemi hakkında genel bilgi verilmektedir. Bu bölümde tezin amacı, sağladığı katkı ve araştırma yöntemi kısaca özetlenmiştir. Ayrıca eviricilerin kullanılma amacı da tartışılmıştır. Bölüm 2’de, FACTS ve özel güç cihazlarının genel özellikleri ile bu cihazların yapı ve işleyişlerine göre çeşitleri açıklanmaktadır. Çeşitli FACTS ve özel güç cihazlarının yapılandırılması, çalışma sistemi ve yer aldığı uygulamalar bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 3’te, bu cihazlarda kullanılan eviricilerin tanımı ve sınıflandırılması yapılmıştır. Bölüm 4’te, Eviricilerin denetiminde kullanılan PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve sınıflandırılması yapılmıştır. Bölüm 5’de, iki seviyeli evirici, diyot kenetlemeli evirici, kaskat evirici, kapasitör kenetlemeli evirici yapılarının yüksüz olarak ve motor yükü kullanılarak MATLAB/Simulink yazılımıyla benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyon sonuçları grafik şeklinde ve elde edilen harmonik değerleri çizelge şeklinde gösterilmiştir. Bölüm 6’da, bu tezde incelenen çalışmaların ve uygulamaların sonuçları, sağladığı katkı ve gelecekte göstereceği gelişim değerlendirilmiştir.

2. FACTS VE ÖZEL GÜÇ CİHAZLARI

FACTS ve özel güç cihazları temel olarak güç sistemindeki çeşitli kontrol problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan son çalışmalar, bu cihazların temel işlevlerine ek olarak güç sistemi kararlılığını arttırmak için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Son yıllarda, bir güç sistemi ağında FACTS ve özel güç cihazları kullanılarak güç sistemi kararlılığının artırılması yoğun bir şekilde araştırılmıştır. FACTS ve Özel Güç cihazları son nesil kontrolörler olarak kullanılmaktadır [80].

Bu bölümde, FACTS ve özel güç cihazlarının temel özellikleri ile bu cihazların yapı ve işleyiş şekline göre sınıflandırılması açıklanmaktadır. Ayrıca STATCOM, SSSC, IPFC, UPFC isimli FACTS cihazları ile DVR, UPQC, APF ve UPS isimli özel güç cihazlarının donanım yapıları, çalışma yöntemi ve uygulamaları da bu bölümde anlatılmıştır.

2.1 FACTS CİHAZLARININ ÖNEMİ

Günümüzde endüstriyel güç tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan güç kalitesi ile ilgili problemlerin tespit edilmesi ve çözüme ulaştırılması, güç sistemlerinin güvenilir çalışması için zorunlu hale gelmiştir [5]. Daha çok iletim sistemlerini ilgilendiren güç kalitesi problemleri farklı konuları içermekte ve çoğunun çözümü için reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme gibi uygulamalar önerilmektedir [80].

Yarı iletken ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler, geleneksel kontrolörlere kıyasla bu uygulamaları daha hızlı ve güvenli bir şekilde yapabilen güç elektroniği tabanlı kontrolörlerin gelişmesine imkân sağlamıştır. 1980'lerin sonunda, Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI), çeşitli güç elektroniği tabanlı kontrolörlerin güç akışını ve iletim gerilimini düzenlediğini, dinamik bozuklukları azalttığını belirtmiş ve FACTS cihazlarının vizyonunu oluşturmuştur [81]. Genel olarak, FACTS'in temel amacı, iletim hatlarının kullanılabilir iletim kapasitesini artırmak ve belirlenmiş iletim yollarındaki aktif ve reaktif güç akışını sürekli kontrol etmektir [82]-[89]. FACTS, kullanılabilir iletim kapasitesindeki kısıtlamaların üstesinden gelmek için çözümler sunar. Bu kısıtlamalar şunlar olabilir:

Dinamik koşullar:

- 1- Geçici ve Dinamik Kararlılık
- 2- Eşzamanlı Salınımlar
- 3- Dinamik Aşırı Gerilim ve Düşük Gerilim
- 4- Gerilim çöküşü

Veya Kararlı Durum durumları:

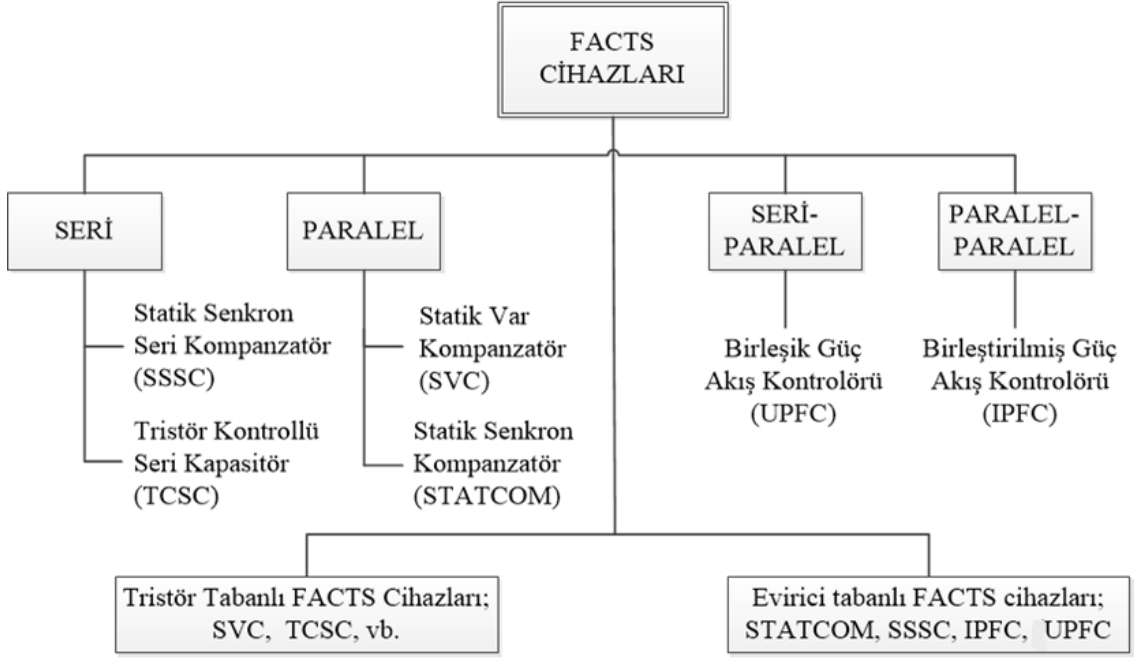
- 1- İstenmeyen Güç Akışı
- 2- Aşırı Reaktif Güç Akışı
- 3- Sürekli gerilim
- 4- Termal Sınırlar

Pek çok kararlı durum, sık anahtarlama gerekli olmadıkça, mekanik olarak anahtarllanmış bobinler ve kapasitörler ile aşılabılır [90]. Bununla birlikte, son çalışmalar, FACTS kontrolörlerinin, güç akışı kontrolünün temel işlevlerine ek olarak güç sistemi kararlılığını arttırmak için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bir FACTS kontrol cihazı çok amaçlı kullanılabileceği gibi güç sistemlerinin çeşitli yerlerinde kullanılabilir. Ek bir avantajı, DC kapasitörler, depolama pilleri gibi ek depolama sistemlerine uyum sağlamaları ve böylece sistem dinamikleri üzerinde daha iyi kontrol sağlamalarıdır [91]-[98].

2.1.1 Evirici Tabanlı FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması

Devre yapılarında kullanılan güç elektroniği teknolojisine göre FACTS aygıtları, Tristör Tabanlı FACTS Cihazları ve Evirici Tabanlı FACTS Cihazları olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Bunlardan Tristör Tabanlı FACTS Cihazları; Statik Var Kompanzatör (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Tristör Kontrollü Faz Kaydırmalı Transformatör (TCPST) olmak üzere üç çeşitte sınıflandırılabilirler [99]. Evirici tabanlı FACTS cihazları; Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (IPFC), Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) olmak üzere dört çeşitte sınıflandırılabilir. Evirici tabanlı FACTS cihazları geleneksel tristör tabanlı FACTS cihazlarına göre gerilim, hat empedansı ve faz açısı kontrolü açısından kolaylıkla uygulanabilme ve yüksek performans karakteristikleri sağlamaktadır. Birçok avantaj sağlayan evirici tabanlı FACTS cihazları

kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu yapılması durumunda kompanzatörün fiziksel boyutu küçültülebilmekte, güç sisteminin dinamik kararlılığı artırılabilen ve talep edilen reaktif gücün bağlantı noktasının geriliminden bağımsız ve hızlı bir şekilde elde edilmesi sağlanabilmektedir [2]. Bu nedenle bu bölümde evirici tabanlı FACTS cihazları incelenecektir. Aşağıdaki Şekil 2.1’de tristör tabanlı ve evirici tabanlı FACTS cihazlarına ait sınıflandırılma gösterilmektedir.

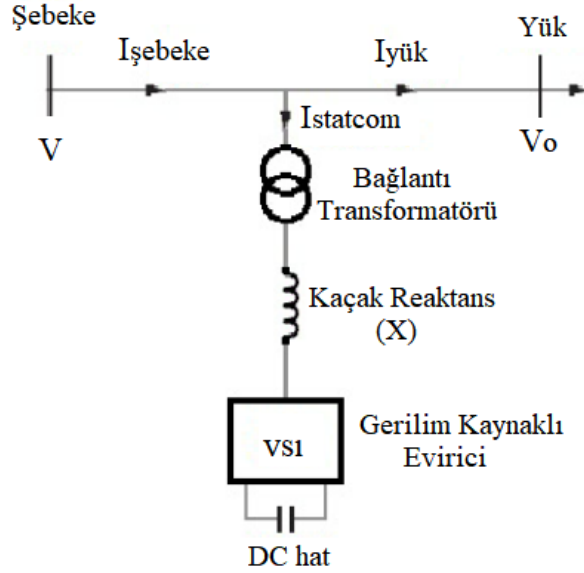


Şekil 2.1. FACTS cihazlarının sınıflandırılması [99].

Çalışmanın bu kısmında evirici tabanlı FACTS cihazları incelenecektir.

2.1.1.1. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

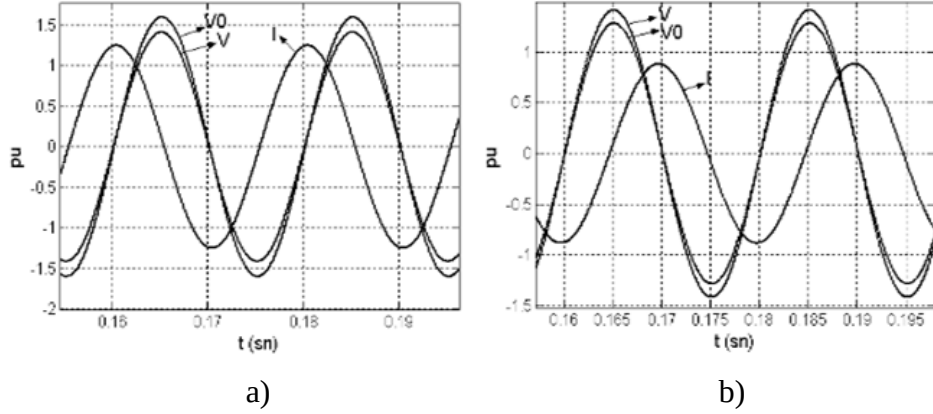
Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), reaktif gücü kontrol etmek amacıyla iletim ağında kullanılan, sistem geriliminden bağımsız olarak kapasitif veya endüktif akım üreten, şönt bağlantılı, gerilim kaynaklı evirici tabanlı bir FACTS cihazıdır. Çeşitli FACTS cihazları arasında en iyi cihazlardan biri olan STATCOM, bir şebekedeki reaktif gücü telafi etme, şebeke gerilimini sabitleme, sistemin güç faktörünü iyileştirme ve kararlılığını artırma, sistemdeki güç kayıplarını azaltma gibi birçok cazip özelliklere sahiptir [101]. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, bir STATCOM cihazının ana bileşenleri, DC kondansatör, yarı iletken anahtar ve bağlantı transformatörü, en temel bileşeni ise gerilim kaynağı eviricidir.



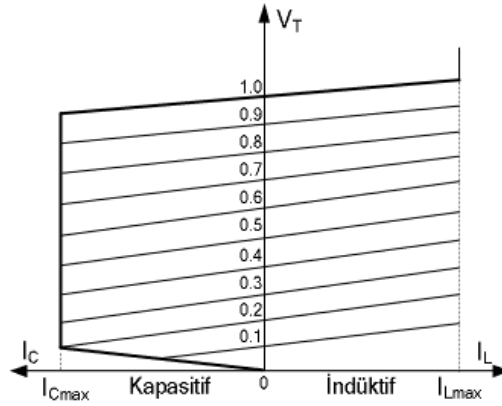
Şekil 2.2. Bir STATCOM'un temel şeması [101].

Gerim kaynağı evirici, DC kondansatör tarafından sürekli sağlanan DC giriş gerilimini sabit frekans ve faz açısında AC çıkış gerilimine dönüştürür. Literatürde yer alan bazı çalışmalar STATCOM'u bir akım kaynağı evirici kullanarak tanıtmıştır [102], [103]. Gerilim kaynaklı evirici kullanan STATCOM ise birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmıştır [104]-[113]. Bir STATCOM uygulaması için, gerilim kaynaklı eviricinin çıkışı, düşük toplam harmonik bozulmaya sahiptir. Bu durum, kompanzasyon için ideal olarak nötrleştirilmiş harmonik akım üretme ihtiyacını karşılar ve büyük bobin ihtiyacını ortadan kaldırır [114], [115].

İdeal bir STATCOM'un reaktif güç kontrolü için evirici çıkış gerilimi kontrol edilir. Eğer şebeke gerilimi STATCOM geriliminden büyük ise STATCOM iletim hattından reaktif güç tüketir, evirici akımı iletim hattı geriliminden 90° geridedir ve STATCOM endüktif modda çalışır. Eğer şebeke gerilimi STATCOM geriliminden küçük ise STATCOM iletim hattı için reaktif güç üretir, evirici çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileridedir ve STATCOM kapasitif modda çalışır. Böylece AC güç sistemine reaktif sağlanır. Eğer şebeke gerilimi STATCOM gerilimine eşit ise, herhangi bir reaktif güç aktarımı olmaz [99]. Bu durum Şekil 2.3'de ve STATCOM'un V-I karakteristikleri Şekil 2.4'de gösterilmektedir [2].



Şekil 2.3. STATCOM'a ait reaktif güç üretimi ve tüketimi
a) Kapasitif mod b) İndüktif mod [2].



Şekil 2.4. STATCOM'un V-I karakteristiği [2].

STATCOM'un bir AC güç sisteminde geçici çalışması sırasında, DC kaynak kondansatörleri şarj edilir ve daha sonra tekrar boşaltılır. Bu sırada aktif güç aktarımı, DC bağlantısından AC güç sistemine gerçekleşir ve bunun tersi de evirici aracılığıyla gerçekleşir. Uygulamada, gerilim kaynaklı evirici nedeniyle az miktarda dahili güç kaybı meydana gelir ve faz açısı oluşturur. Sürekli çalışması sırasında, eviricinin çıkış geriliminin, iletim hattı geriliminden geri fazda tutulması sağlanır. Böylece aktif güç aktarımı AC güç sisteminden eviriciye doğru gerçekleşir. Bu durumda eviricide ve transformatörde oluşan kayıplar güç sisteminden karşılanır.

STATCOM'un ürettiği ve tükettiği reaktif güç değeri aşağıda verilen Denklem (1.1) ile hesaplanabilir [118].

$$Q = \frac{V}{X} (V - V_0 \cos \varphi) \quad (1.1)$$

STATCOM'un sisteme verdiği veya sistemden aldığı aktif güç değeri ise Denklem (1.2) ile ifade edilebilir [118].

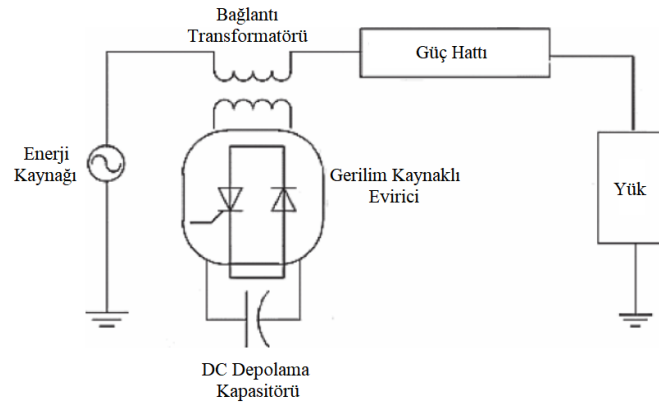
$$P = \frac{V V_o}{X} \sin \varphi \quad (1.2)$$

Burada V sistem gerilimi, V_o eviricinin çıkış gerilimi, X bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı ve φ ise STATCOM'un bağlı bulunduğu sistemin gerilimi ile eviricinin çıkış gerilimi arasındaki faz farkıdır.

STATCOM'da reaktif güç kontrolü için iki farklı yöntem kullanılır. Bu yöntemlerden ilkinde çoklu darbe eviricilerde çıkış gerilimi büyüklüğü DC kondansatör gerilimi ile kontrol edilir. Diğer yöntem olan PWM kontrolünde ise DC kondansatör gerilimi sabitler ve gerilim PWM ile kontrol edilir [119]. Son zamanlarda bu yöntemin tercih edilme sebebi harmonik içeriği azaltması ve transformatör devresini basitleştirmesidir. Bunun için yüksek anahtarlama frekansına sahip kontrollü anahtarlar kullanır [118].

2.1.1.2. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

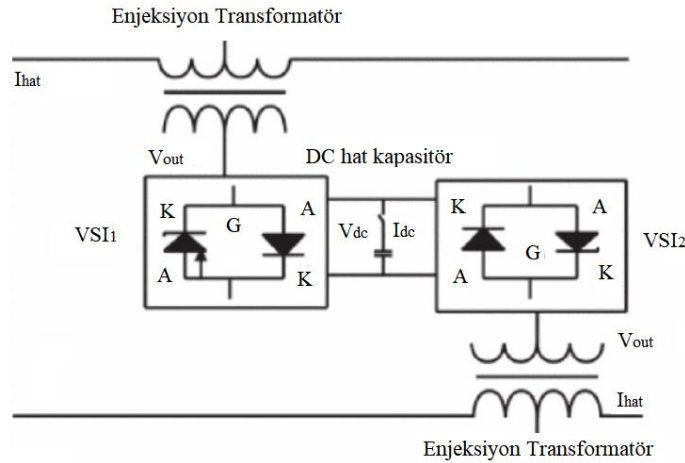
Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), güç hattıyla seri olarak bağlanan, gerilim kaynağı evirici tabanlı ve seri kompanzasyon sağlayabilen seri FACTS cihazıdır. FACTS cihazları arasında çok önemli yere sahip olan Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), akım ve güç akışını etkileyen basit tasarımları nedeniyle popüler hale gelmiştir. Temel yapısı, gerilim kaynaklı bir evirici ile güç hattına seri olarak bağlı bir transformatör, DC depolama kapasitörü ve enerji kaynağı içerir [120]. Seri transformatör, hat boyunca genel reaktif gerilim düşüşünü arttırmak veya azaltmak ve böylece iletilen gücü kontrol etmek amacıyla, bağımsız olarak kontrol edilen bir gerilim uygulamak için kullanılır. DC depolama kapasitörü ise DC gerilimini korumak için kullanılır [121]. Bir SSSC'nin temel yapısı, Şekil 2.5'de gösterilmektedir [120].



Şekil 2.5. Bir SSSC'nin temel şeması [120].

2.1.1.3. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (IPFC)

Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (IPFC), çok fazlı iletim sistemleri arasındaki güç akışını kontrol eden en gelişmiş ve yeni nesil FACTS kontrol cihazıdır [3], [122]. IPFC'nin faydaları, şebekenin stabilitesinin iyileştirilmesi, şebekedeki aktif ve reaktif güç akışının kontrolü, kayıpların en aza indirilmesi ve artan şebekenin verimidir. Başlıca uygulamaları arasında, güç iletimi, güç kalitesi, güç akışı kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, güç koşullandırma alanları yer alır [124]. IPFC'nin önemli bileşenleri evirici ve kontrol tekniğidir. IPFC, iki enjeksiyon hattına seri enjeksiyon transformatörleri yardımı ile arka arkaya bağlanan iki gerilim kaynağı eviriciden oluşur. Eviricilerin arasında aktif güç aktarımını sağlayan ortak bir DC bağlantı vardır. IPFC için ortak DC bağlantısı bir kapasitördür [125]. Bir SSSC'nin temel yapısı, Şekil 2.6'da gösterilmektedir [124].

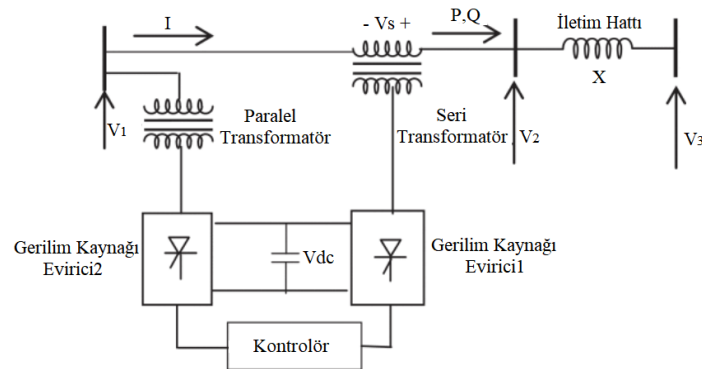


Şekil 2.6. Bir IPFC'nin temel şeması [124].

2.1.1.4. Birleşik Güç Akışı Kontrolörü (UPFC)

UPFC, güvenilirliği ve esnekliği nedeniyle çoğunlukla kullanılan bir FACTS cihazıdır. Yüksek gerilimli elektrik iletim şebekesini dengeleyen hızlı etkili reaktif güç sağlar. Düğüm gerilimleri, hat empedansı ve faz açısı gibi ayarlanan hat parametrelerini gerçekleştirir [125]. İletim sistemlerinde gerçek ve reaktif gücü, gerilim büyüklüğünü ve hat empedansını aynı anda kontrol edebilme yeteneğine sahiptir ve bu nedenle sistemin genel çalışmasını iyileştirir. Sadece güç aktarım kapasitesini arttırmakla kalmaz aynı zamanda aktarım kayıplarını azaltmanın yanı sıra stabiliteyi, aktarım kapasitesini de artırır. Bu özellikler UPFC'yi kontrol ve iletim sistemindeki en güçlü cihaz haline getirmektedir [127]. UPFC hibrit bir cihazdır ve DC kapasitöre bağlı STATCOM ve

SSSC'nin birleşiminden oluşur. SSSC ve STATCOM, güç aktarım sisteminin performansını artırmak için sürekli çalışan çoklu senkron gerilim kaynaklarını kullanan gerilim kaynağı eviricilerdir. Basitleştirilmiş UPFC'nin şematik gösterimi Şekil 2.7'de gösterildiği gibidir [126].



Şekil 2.7. Bir UPFC'nin tek hatlı şeması [126].

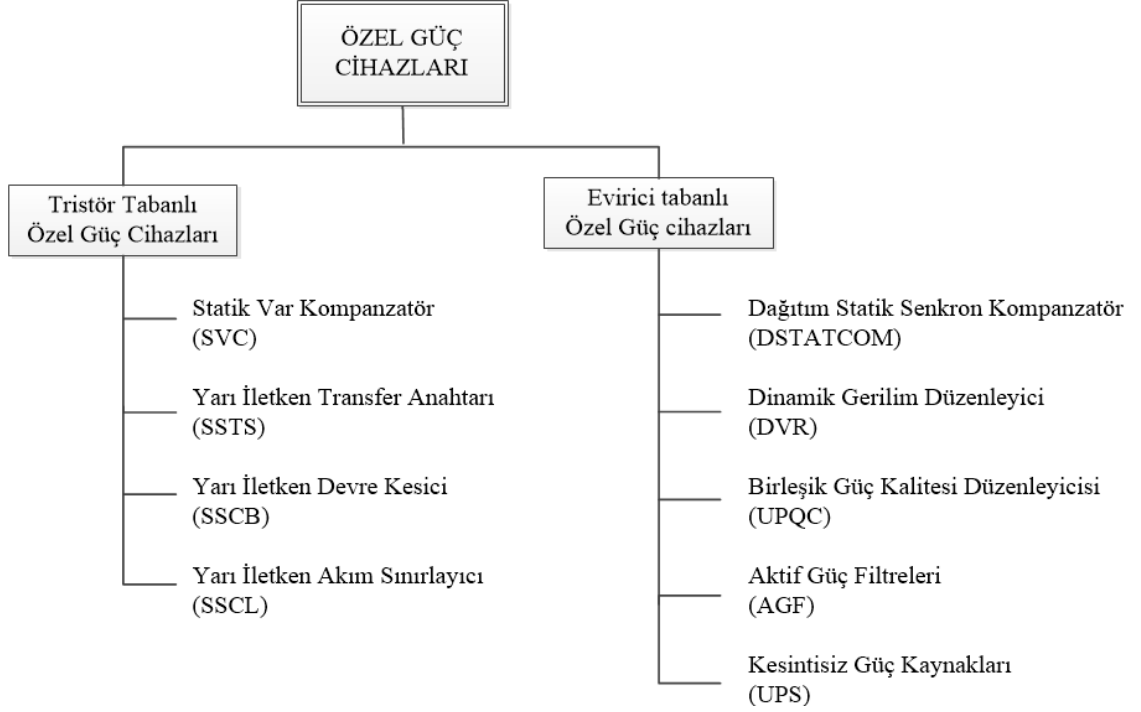
2.2. ÖZEL GÜÇ CİHAZLARININ ÖNEMİ

Özel güç cihazları FACTS cihazlarının düşük gerilim kısmını oluşturur ve FACTS cihazlarına çok benzer. FACTS cihazları gerilim, hat empedansı ve faz açısı gibi iletim sistemi parametreleri üzerinde hızlı ve güvenilir bir kontrol sunar. Diğer yandan, özel güç cihazları ise düşük gerilim dağıtımını içindir ve güç kalitesinin ve güvenilirliğinin iyileştirilmesini sağlar. Ayrıca hassas yükleri etkileyen bozucu etkilere karşı koruma sağlar. Böylece kaliteli, güvenilir ve yüksek güç elde edilebilir [128]. Yüksek güç kalitesinin sağlanması için yüksek güçlü yarı iletken güç anahtarları kullanılır. Bu nedenle cevap verme süreleri kısadır. Ayrıca sürekli ve dinamik denetim sağlarlar. Özel güç cihazları, dağıtım seviyelerinin uygulamaları için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu uygulamalardan gerilim düşüşünü engelleme, hassas yükleri koruma ve kontrol etme, harmonikleri yok etme, reaktif güç regülasyonu ve gerilim regülasyonu uygulamalarında kullanılmaktadır. [3].

2.1.1. Evirici Tabanlı Özel Güç Cihazlarının Sınıflandırılması

Çeşitli güç kalitesi sorunlarının çözümü ve sistem güvenilirliğinin artırılması için kullanılan özel güç cihazları hakkında literatürde kesinleşmiş bir sınıflandırma yoktur. Ancak devre yapısında yer alan güç elektroniği teknolojisine bağlı olarak iki kategoriye ayırılır. Bunlardan Tristör Tabanlı Özel Güç Cihazları; Statik Var Kompanzator (SVC),

Yarı İletken Transfer Anahtarı (SSTS), Yarı İletken Devre Kesici (SSCB) ve Yarı İletken Akım Sınırlayıcı (SSCL) olmak üzere dört çeşitte sınıflandırılabilir. Evirici Tabanlı Özel Güç Cihazları ise Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör (DSTATCOM), Dinamik Gerilim Düzenleyici (DVR), Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi (UPQC), Aktif Güç Filtreleri (AGF) ve Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS) olmak üzere beş çeşitte sınıflandırılabilir [3]. Aşağıda Şekil 2.8’de tristör tabanlı ve evirici tabanlı Özel Güç cihazlarına ait sınıflandırma gösterilmektedir.



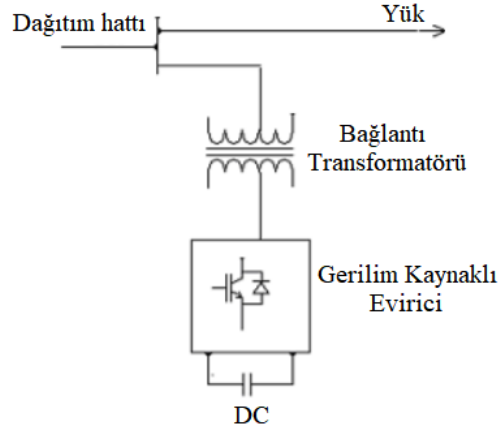
Şekil 2.8. Özel Güç cihazlarının sınıflandırılması [3].

Çalışmanın bu kısmında evirici tabanlı Özel Güç cihazları incelenecektir.

2.1.1.1. Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör (DSTATCOM)

STATCOM, düşük gerilimli dağıtım sistemlerinde kullanıldığında DSTATCOM olarak tanımlanır. En basit haliyle, bir gerilim kaynaklı evirici, bir DC enerji depolama cihazı, AC sistem ile şönt bağlanmış bir bağlantı transformatörü ve ilgili kontrol devresinden oluşur. STATCOM ile devre yapısı aynı olmakla beraber ilgilendikleri güç kalitesi sorunları farklıdır. DSTATCOM'un şematik yapısı Şekil 2.9'da gösterilmektedir. DSTATCOM'da aktif güç akışı, AC sistem ve GKE gerilimleri arasındaki açılı ile reaktif güç akışı ise bu gerilimlerin büyüklükleri arasındaki farkla kontrol edilir [130]. DSTATCOM kontrol cihazı, yük gerilimlerini ve akımlarını sürekli olarak izler ve AC sistemden kaynaklanan çeşitli kayıplar için gereken telafi

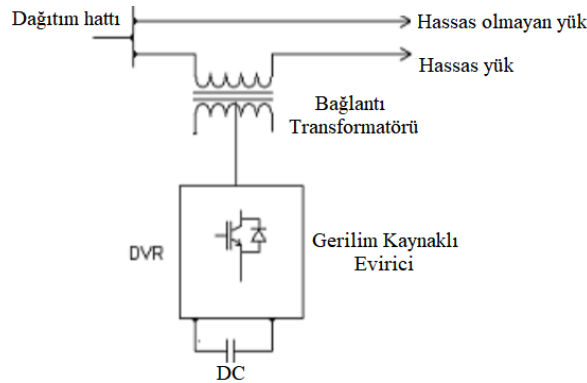
miktarını belirler. DSTATCOM'un en önemli ana bileşeni GKE'dır. AC sistem ile şönt bağlı GKE, voltaj regülasyonu ve reaktif gücün telafisi, güç faktörünün düzeltilmesi ve oluşan harmoniklerin kaldırılması şeklinde üç farklı amaca hizmet eder [131].



Şekil 2.9. Bir STATCOM'un temel şeması [130].

2.1.1.2. Dinamik Gerilim Düzenleyici (DVR)

DVR, DSTATCOM'a benzer devre yapısına sahiptir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, bir GKE, bir anahtarlama kontrol devresi, bir DC enerji depolama cihazı ve bir bağlantı transformatöründen oluşur. Ancak burada bağlantı transformatörü AC sisteme seri bağlanır. En temel bileşeni olan GKE, fazı ve genliği kontrol edilebilen üç fazlı bir AC çıkış gerilimi üretir. Bu gerilimler, yük gerilimini istenen gerilim değerinde tutmak için AC dağıtım sisteminde üretilir [131].

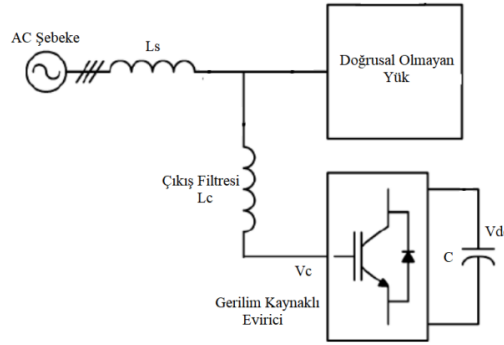


Şekil 2.10. Bir DVR'nin temel şeması[131].

2.1.1.3. Aktif Güç Filtreleri (AGF)

Aktif Güç Filtresi (AGF), doğrusal olmayan ve dengesiz yüklerin oluşturduğu harmonik akımları azaltan ve böylece şebekenin güç kalitesini artıran bir dengeleyici sinyal üreten özel bir güç cihazıdır. Pasif güç filtrelerinin birçok dezavantajı nedeniyle AGF, son

yıllarda sürekli araştırılarak geliştirilmiş ve doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonikleri azaltmak için uygun bir çözüm haline gelmiştir. AGF'ler harmonik filtreleme özelliğinin yanı sıra harmonik sönümleme, akım ve gerilim dengesizliği kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim dalgalanması gibi birçok işlevi gerçekleştirebilir [132]. Şekil 2.11'da gösterildiği gibi AGF güç devresi bir evirici, bir DC hat, bir giriş filtresi ve bazı uygulamalarda gerekli olması durumunda şebekeye bağlantılı transformatörden oluşmaktadır [133]. Genellikle IGBT gibi güçlü anahtarlardan oluşan gerilim kaynaklı evirici kullanır. AGF'ler devre yapılarına göre seri AGF ve paralel AGF olmak üzere ikiye ayrılır [134]. Seri AGF, gerilim temelli bozulmaları azaltırken, paralel AGF mevcut temel bozulmaları azaltır. Genellikle, seri AGF güç kaynağına seri bağlandığından yük akımının tamamına maruz kalır. Bu nedenle, dağıtım hattındaki harmonik gerilimleri giderebilir ve beraberindeki harmonik akımları hafifletebilir. Bazen böyle bir yapı, dağıtım sistemi tarafından kabul edilemez, çünkü sistem kalitesini etkileyebilecek olan güç şebekesinin hat empedansını değiştirir. Bunun aksine, paralel AGF, endüstride ilgi görmekte ve yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çünkü gerektiğinde şebekeden kolayca ayrılabilir, bu nedenle diğer elektrikli cihazların çalışmasını etkilemez [135].

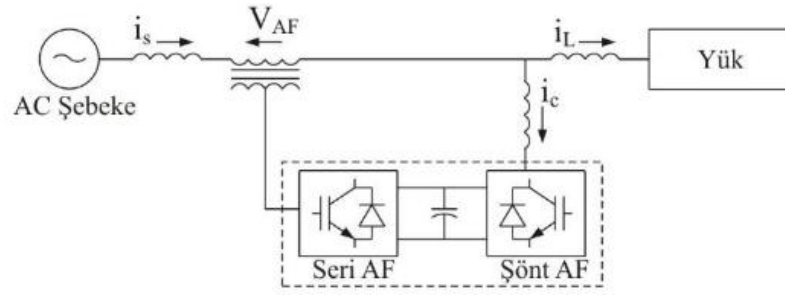


Şekil 2.11. Bir AGF'nin temel şeması [135].

2.1.1.4. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC)

Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC), yüksek gerilimli elektrik şebekelerinde hızlı ve güvenilir reaktif güç kompanzasyonu sağlamak için kullanılan kontrol cihazıdır. Reaktif gücü düzenlerken hassas elektrik yüklerini etkileyebilecek gerilim ve akım bozulmalarının azaltılmasını sağlar [136]. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi seri ve paralel aktif güç filtrelerinin ortak bir DC hat kondansatörü vasıtasıyla birbirine bağlanmış bir filtre sistemidir. Birleşik güç kalitesi düzelticinin ana bileşenleri güç Kaynağı, aktif güç filtresi ve yük'tür [137]. UPQC'nin ana amacı gerilim dengesizliği, reaktif güç ve

harmoniklerin düzeltilmesidir.

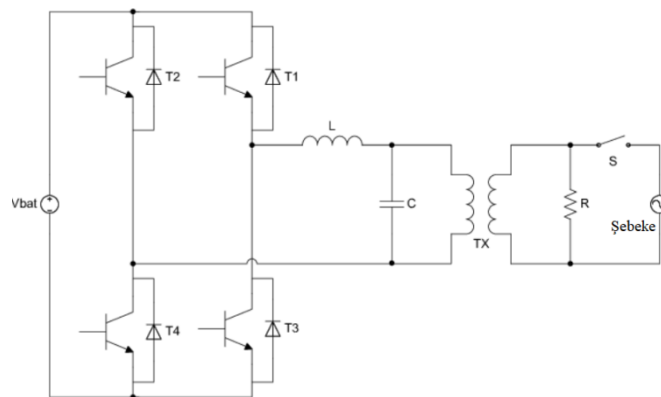


Şekil 2.12. UPQC'nin temel şeması [137].

2.1.1.5. Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS)

Kesintisiz güç kaynağı (UPS) sistemleri, ana güç kaynağı enerji sağlamadığında veya güç kalitesi için gerekli yük gereksinimleri karşılanamadığında hassas yükleri beslemek ve korumak için kullanılan, normal AC kaynağının olmadığı durumlarda kullanıma hazır kaynaklardır. UPS'ler sürekli devrede kalır ve elektrik kesintilerinde kesintinin yük tarafından hissedilmesini engeller. Bunun dışında şebekede meydana gelebilecek dalgalanmalardan yükü korur [138].

Alternatif bir UPS yapısı şekil 2.13'de gösterilmiştir. Bir UPS genellikle bir enerji depolama cihazı, bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü, bir çift yönlü DC-AC evirici, bir çıkış filtresi ve bir statik anahtardan oluşur [139]. Güç kesintisi durumunda batarya eviriciyi besler. Ana kaynak devrede ise evirici, doğrultucu olarak çalışıp bataryayı şarj eder. Bu durumda evirici, temel çıkış frekansında çalışmalıdır. Bu nedenle eviricinin yüksek frekans özelliğinden yararlanılamaz ve dolayısıyla transformatör boyutu küçültülemez.



Şekil 2.13. Tek fazlı basit bir UPS için şematik diyagram [139].

3. FACTS VE ÖZEL GÜÇ CİHAZLARINDA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARI

Eviriciler, bir DC gerilim ile frekansı, genliği ve faz açısı kontrol edilebilen AC gerilim üreten güç elektroniği dönüştürücü devreleridir [79]. Bu devreler motor sürücü devrelerinde, yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerinde, orta ve yüksek güç değişkenli regülatör devrelerinde, yenilenebilir enerji sistemlerinin geniş uygulamalarında, UPS'lerde, FACTS ve özel güç cihazları gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Eviricilerde kullanılan yarı iletken anahtarlar transistör, tristör, GTO, MOSFET, IGBT şeklindedir. Bu yarı iletkenlerden düşük ve orta güç uygulamalarında, transistör ile tristör, yüksek güç uygulamalarında ise GTO, IGBT, IGCT anahtarları kullanılmaktadır. Bu anahtarların tümü, harmonikleri azaltmak için yüksek frekansta çalıştırılır. Eviriciler akım kaynaklı evirici ve gerilim kaynaklı evirici olarak sınıflandırılmaktadır. Eğer DC kısmında endüktans elemanı bulunuyorsa akım kaynaklı evirici, kondansatör elemanı buluyorsa gerilim kaynaklı evirici olarak bilinmektedir. Eviricilerden üretilen çıkış gerilimi seviyelerinin sayısına göre eviriciler iki gruba ayrılır. Bunlar, iki seviyeli eviriciler ve çok seviyeli eviricilerdir. İki seviyeli evirici bilinen en genel evirici yapısıdır. İki seviyeli bir eviricide $+V_{dc}$ ve $-V_{dc}$ olmak üzere sadece iki gerilim seviyesi vardır. Çok seviyeli eviricide ise çıkış seviyesi ikiden fazladır ve ilk üç seviyeli evirici ile başlamıştır. Örneğin, üç seviyeli eviricide gerilim seviyesi $+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$ olmak üzere üç gerilim seviyesi vardır. Daha düşük harmonik içerikler, daha düşük anahtarlama kaybı, yüksek gerilim kapasitesi ve yüksek güç kalitesi sağlayan çok seviyeli eviricilerden çok sayıda çıkış gerilim seviyesi üretilebilir. Çok seviyeli eviricilerin temel işlevi, istenen DC gerilimi birkaç DC gerilim seviyesinden sentezlemektir. Genel olarak üç gruba ayrılan çok seviyeli eviriciler, diyot kenetlemeli evirici, kapasitör kenetlemeli evirici ve kaskat evirici şeklinde sınıflandırılmaktadır [79], [87], [118], [150]. Çok seviyeli evirici, geleneksel iki seviyeli eviriciye göre birçok avantaja sahiptir. Çok seviyeli eviricinin dikkat çekici özellikleri aşağıdaki gibi kısaca özetlenebilir [100]:

1. Anahtarlarda düşük voltaj gerilimi sağlar.

2. Daha yüksek çıkış akımı harmonikleri aynı anahtarlama frekansı ile azaltılabilir, böylece güç kalitesini artırır.
3. Açık durumdayken anahtarlarda düşük güç tüketimi sağlar.
4. Orta ve yüksek gerilim üretilebilir. Yüksek gerilim uygulamaları için uygulanabilir.
5. Düşük anahtarlama frekansı kullanılabilir ve böylece anahtarlama kayıplarında azalma ve daha yüksek verimlilik elde edilebilir.
6. Çok seviyeli dönüştürücüler giriş akımını düşük bozulma ile çekebilir.

Bu çalışmada FACTS ve özel güç cihazlarından özellikle STATCOM ve DSTATCOM cihazlarında kullanılan evirici yapılarına yer verilmiştir. Aşağıda Şekil 3.1’de FACTS ve özel güç cihazlarında kullanılan evirici yapılarının sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Evirici yapılarının sınıflandırılması [79].

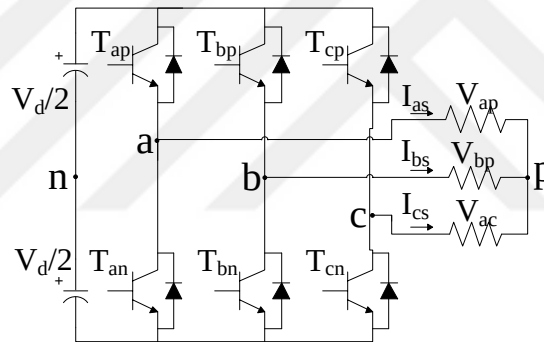
3.1. İKİ SEVİYELİ EVİRİCİLER

Evirici yapısı, evirici tabanlı olan FACTS ve özel güç cihazlarının en önemli bileşenidir. Şekil 3.2’de gösterilen çok darbeli evirici yapısı, temeli iki seviyeli eviriciye dayanan ve ilk zamanlarda tercih edilen bir yapıdır. Bu yapıda büyük zigzag bağlantılı transformatörler bulunur. AC kısımda yer alan hem paralel hem de seri bağlantılı bu transformatörler sayesinde, bir veya birden fazla iki seviyeli evirici şebekeye bağlanırlar. Bu evirici kullanılan transformatörlerin dezavantajı, pahalı olmaları nedeniyle sistem maliyetini artırmalarıdır. Aynı zamanda sistemde oluşan toplam kayıpların yaklaşık yarısının transformatörden kaynaklanması ve denetiminin zor olması, düşük verim diğer dezavantajlarıdır [150], [116].

FACTS ve özel güç cihazlarında kullanılan PWM denetimli iki seviyeli eviriciler diğer iki seviyeli evirici yapılarıdır. Farklı PWM yöntemlerinin kullanılabildiği bu evirici yapısı Şekil 3.3’de gösterildiği gibidir. Bu yapının yer aldığı uygulamalarda güç

Şekil 3.2. Çok darbeli STATCOM yapısı [123].

Şekil 3.3. Üç fazlı iki seviyeli evirici yapısı [117].

[illegible]

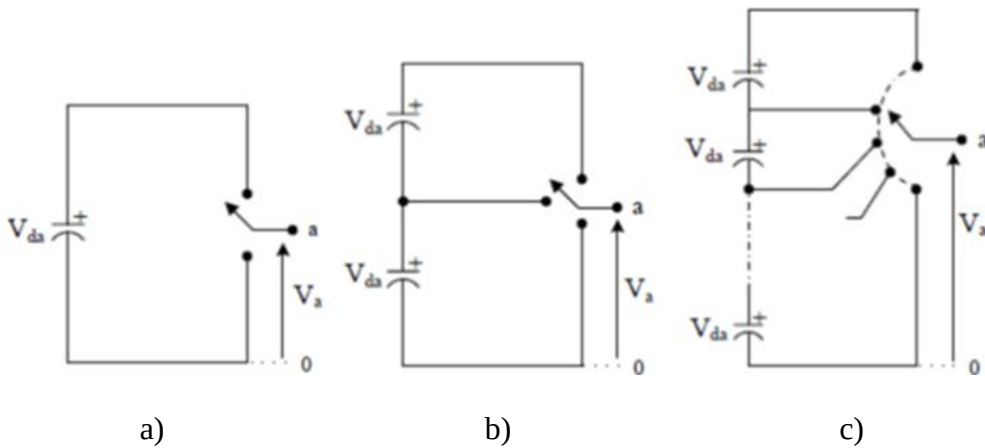
seviyeli eviricili STATCOM için yapılmıştır [145], [146], [147]. Rajiv ve arkadaşları

tarafından güneş tarlası için bir STATCOM uygulaması yapılmıştır [148]. Ayrıca 2014 yılında Vikas ve arkadaşları gerilim düşümünü kompanze etmek için, Pushkar ise 2015 yılında gerilim dalgalanmasına çözüm olarak çalışmalarında iki seviyeli eviricili DSTATCOM'u tercih etmiştir [149], [150].

3.2. ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLER

Çok seviyeli eviriciler, orta gerilimli yüksek güç uygulamaları için tercih edilen seçeneklerden biri olarak ortaya çıkmıştır. Çok seviyeli eviricilerde indüktör ve kapasitör olmadığından yüksek güç, yüksek voltaj, iyi güç kalitesi, düşük mertebeden harmonikler, düşük anahtarlama kayıpları ve düşük elektromanyetik parazit taşıma kabiliyetine sahiptir. Çok seviyeli eviriciler, birkaç DC gerilim kaynağı kullanarak, kademeli gerilim dalga formu biçiminde olduğu gibi, temel referans gerilimine yakın olarak üretilmektedir. Çok seviyeli bir eviricide, çıkış seviyesi sayısının artırılması çıkış geriliminde THD'nin düşmesine neden olur. [150], [151]. Eklenen her DC gerilim seviyesi, AC çıkış geriliminin sinyal şeklinde bir kademe olarak görülür.

Şekil 3.4'te, ideal anahtar kullanan farklı seviyelerdeki eviricilerin bir faz ayağının şematik bir diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.4. İdeal anahtar kullanan farklı seviyelerdeki eviricilerin bir faz ayağının şematik bir diyagramı a) iki seviye b) üç seviye c) m seviye [151].

Şekilden görüleceği üzere, iki seviyeli bir evirici, kapasitörün negatif terminaline göre iki seviyede bir çıkış gerilimi üretir. Üç seviyeli evirici ise üç seviyede üretir. Çok seviyeli eviricilerin en çekici özellikleri aşağıdaki gibidir. [151], [154].

1. Çok düşük harmonik bozulma ve daha düşük çıkış gerilimleri üretebilirler.

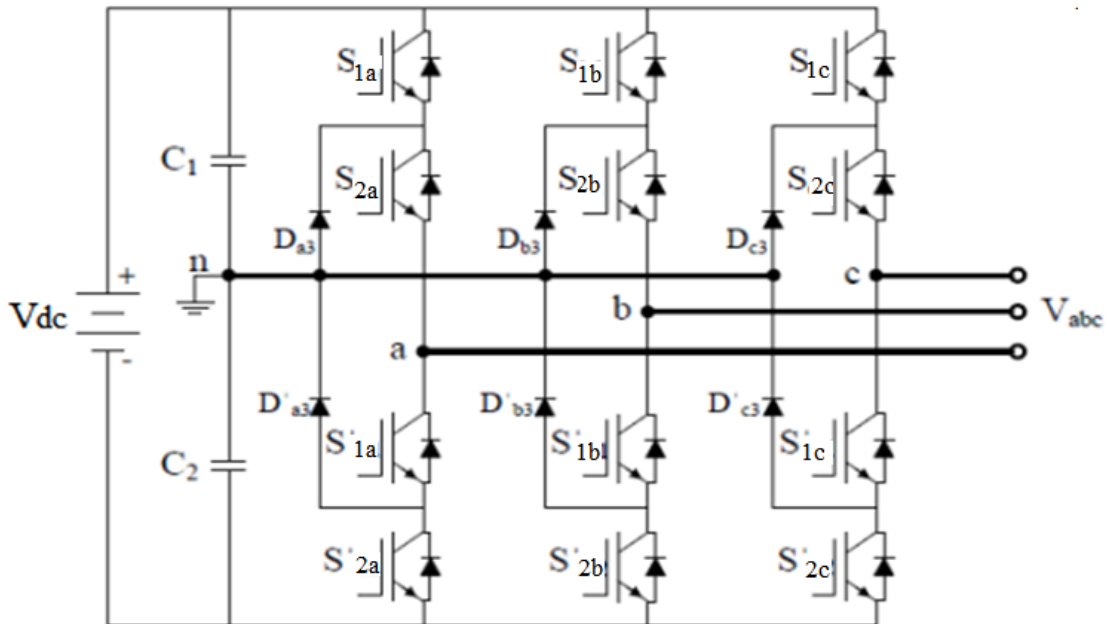
2. Çok düşük bozulma ile giriş akımı çekerler.
3. Daha küçük ortak mod (CM) gerilimi üretir ve karmaşık modülasyon yöntemleri kullanılarak, CM gerilimlerini elimine edilebilirler.
4. Daha düşük anahtarlama frekansı ile çalışabilirler.

Son yirmi yılda birçok çok seviyeli evirici yapısı önerilmiştir. Literatürde belirtilen temel sayılabilecek üç farklı çok seviyeli evirici yapıları aşağıdaki gibidir [150], [151].

- 1- Diyot Kenetlemeli Evirici (DKE)
- 2- Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE)
- 3- Kaskat Evirici (KE)

3.2.1. Diyot Kenetlemeli Evirici (DKE)

İlk çok seviyeli evirici yapısı olan DKE'ler A. Naba, I. Takashash ve H. Akagi tarafından 1981 yılında önerilmiştir [165]. Diğer adı "Nötr Nokta Kenetlemeli" evirici olan DKE'ler ile ilgili günümüze kadar çok sayıda araştırma ve yayın yapılmıştır [151]-[154]. DKE eviricilerde giriş gerilimini farklı seviyelere bölebilmek için seri bağlı kapasitörler arasındaki bağlantı noktaları kullanılır [151]. Şekil 3.5'de üç fazlı üç seviyeli DKE gösterilmektedir. Bu devredeki iki kapasitör üç farklı gerilim seviyesi elde etmek için kullanılır, yani gerilim seviyeleri $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$ şeklindedir. Ayrıca eviricinin her bir fazı, dört anahtar ile iki kenetleme diyotuna sahiptir.



Şekil 3.5. Üç fazlı üç seviyeli DKE'nin devre şeması [154].

Çizelge 3.1'de , DKE'ye ait çeşitli anahtarlama kombinasyonları ile çıkış gerilim seviyeleri gösterilmektedir . İki kapasitörün orta noktası 'n' nötr noktasıdır. Anahtarın iletimde olması ON durumu ve anahtarın kesimde olması OFF durumu anlamına gelmektedir. S_{1i} ve S_{2i} anahtarları ON durumunda iken çıkış gerilimi $+V_{dc}/2$ olur. Benzer şekilde S'_{1i} ve S'_{2i} anahtarları ON durumunda iken çıkış gerilimi $-V_{dc}/2$ 'dir. Çıkış geriliminin sıfır gerilim seviyesi için S_{2i} ve S'_{1i} anahtarları ON durumunda olmalıdır. D_{a3} ve D'_{a3} diyotlarının iletimi ise yük akımı yönlerine bağlıdır ve bu diyotlar sayesinde anahtar gerilimi kaynak DC geriliminin yarısına eşitlenir [155].

Çizelge 3.1. Tek fazlı üç seviyeli DKE'deki anahtarların durumları. [155].

Anahtarlama Durumu				İnverter Gerilimi
S_{1i}	S_{2i}	S'_{1i}	S'_{2i}	(i=a,b,c)
ON	ON	OFF	OFF	$+V_{dc}/2$
OFF	ON	ON	OFF	0
OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc}/2$

DKE'lerin birçok avantajı bulunmaktadır. DKE'lerde seviye sayısı yükseldiğinde filtreye gerek kalmadan harmonik bozulma azalır. Anahtarlama kontrolü en kolay olanıdır. Anahtarlar temel frekansta anahtarlandığı için eviricinin verimi oldukça yüksektir. Aynı zamanda DKE kullanılarak, çok seviyeli gerilim çıkışları, düşük maliyetli bir DC kapasitör dizisi ile kolayca elde edilir. Gereken koruma devresi çok seviyeli eviriciler arasında en az karmaşık olanıdır ve kolay kontrol edilebilir [4], [6], [150]. DKE'nin avantajları yanında dezavantajları da vardır. Ana dezavantajı seri bağlı kapasitörler arasında eşit olmayan gerilim paylaşımıdır. Bu durum ek olarak, daha yüksek seviyelerde çıkış için birçok diyot gereklidir. Bu nedenle, DKE'lerin güvenliğini ve verimliliğini belirleyen DC kapasitör gerilimlerinin dengelenmesi gerekir . Gerilim dengesizliği probleminin iki olası çözümü vardır. Birincisi eviricinin DC tarafına gerilim dengeleme devreleri takılmalıdır. Sistemin maliyeti ve karmaşıklığına katkıda bulunan ek devreler ve güç donanımı gerektirdiğinden, maliyet açısından kesinlikle tercih edilir. Diğeri ise evirici anahtarlama modelini kontrol stratejisine göre değiştirmek gerekir. Daha yüksek seviyeli evirici için, anahtarlama modeli değiştirme stratejileri yoluyla gerilim dengeleme, çıkış gerilimini sınırlandırır [4], [6], [150].

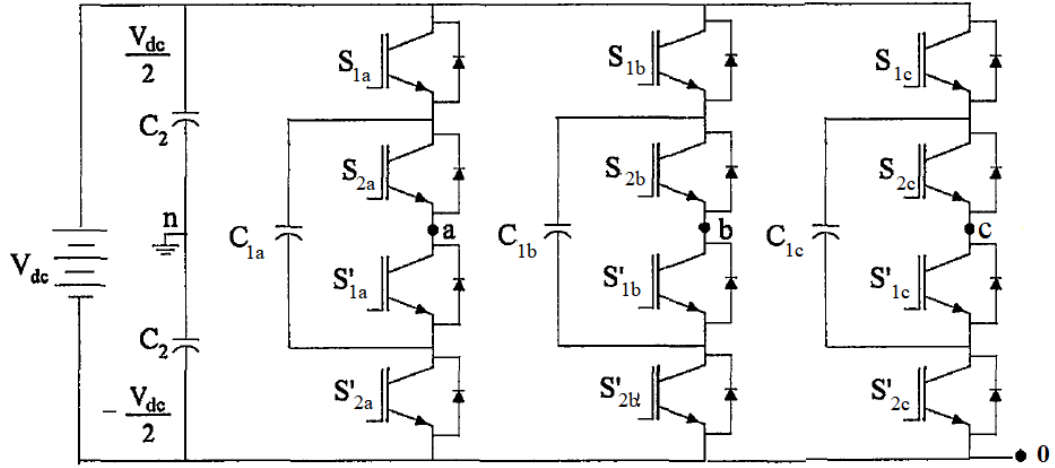
Literatür incelendiğinde FACTS ve özel güç cihazı olan STATCOM ve DSTATCOM'un birçok karakteristiği ile ilgili uygulama yapıldığı görülmektedir. 1997 yılında Chen ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile DKE tabanlı DSTATCOM'da DC kapasitans gerilimlerinin eşitlenmesi ve düzenlenmesi sağlanmıştır [156]. Cheng ve Crow tarafından 2002 yılında gerçekleştirilen DKE'li STATCOM/BESS uygulamasındaki gerilim dengeleme sorunu için bir dengeleme devresi önerilmiştir [157]. 1998 yılında ise Mahajmra ve arkadaşları tarafından DKE evirici kullanılan DSTATCOM ile elde etmek amacıyla kapalı döngülü bir PD kontrolör tasarımı önerilmiştir. [158]. Qingru ve arkadaşları 2004 yılında önerdikleri çalışmayla, üç seviyeli DKE içeren STATCOM sistemi için modellemesi ve analizini gerçekleştirmiştir [159]. Yine 2004 yılında gerçekleştirilen diğer bir çalışmada Sharmeela ve arkadaşları gerilim azalma ve yükselme etkisinin iyileştirilmesi için DKE tabanlı DSTATCOM kullanmıştır [160]. Normal olmayan gerilim şartları altında DKE kullanan DSTATCOM'un simülasyon ve modellemesi Chiang ve arkadaşları tarafından 2005 yılında gerçekleştirilmiştir [161]. Okou ve arkadaşları tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada üç faz üç seviye DKE'li STATCOM için kontrolör devresi sunulmuştur [162]. Ayrıca 2013 yılında Kedareshwari tarafından yapılan farklı bir çalışma ile üç seviyeli ve beş seviyeli DKE kullanan STATCOM için klasik SPWM tekniği önerilmiştir [163].

3.2.2. Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE)

KKE'ler, DKE'lerin dezavantajlarını azaltmak amacıyla Meynard ve arkadaşı tarafından 1992 yılında önerilmiştir [164]. DKE'ye alternatif olarak önerilen ve "Flying Kapasitör Gerilim Kaynağı" evirici olarak da bilinen KKE'ler yapı olarak DKE'ye benzemektedir. Ancak KKE yapısında kenetleme diyotları yerine gerilimin dengelenmesini sağlayan kenetleme kondansatörleri kullanılmaktadır. Esnek anahtarlama yapısı ve hata durumunda ek kapasitenin daha fazla sürülmesi gibi faydaları sergileyen KKE'ler popüler bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, küçük ve büyük kondansatör gerilim dengesizliği sorunu bulunmaktadır [150], [164], [165].

Şekil 3.6'da üç fazlı üç seviyeli KKE devresi gösterilmektedir [165]. Eviricinin çıkış gerilim seviyesi anahtarlama elemanlarının durumlarına göre her bir bağımsız kondansatör geriliminin toplanmasıyla oluşur. KKE'lerde, her kondansatör üzerine

düşen gerilimin kendinden sonra gelen kondansatör gerilimiyle eşit olmaması için DC kondansatörler merdiven şeklinde sıralanmaktadır [166].



Şekil 3.6. Tek fazlı üç seviyeli KKE'nin devre şeması [165].

Üç seviyeli KKE, iki adet DC depolama kapasitörü tarafından desteklenen on iki IGBT anahtarından oluşur. V_{dc} , DC bağlantı gerilimini ve $V_{dc}/2$ ise DC depolama kapasitör gerilimini göstermektedir. C_{a1} , C_{b2} , C_{c3} kenetleme kapasitörleri, DC kaynak geriliminin yarısına eşit olan fazın kapasitörlerini temsil etmektedir. Evirici devresinin her fazı, dört IGBT anahtar ve bir kenetleme kapasitöründen oluşur [167]. Çizelge 3.2' de tek faz çıkış gerilimli üç seviyeli KKE için anahtarlama tablosu verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tek fazlı üç seviyeli KKE'deki anahtarların durumları [167].

Anahtarlama Durumu				İnverter Gerilimi ($i=a,b,c$)
S_{1i}	S_{2i}	S'_{1i}	S'_{2i}	
ON	ON	OFF	OFF	$+V_{dc}/2$
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0
OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc}/2$

Çizelge 3.2'den görüldüğü gibi üç seviyeli KKE yapısında, sıfır gerilim seviyesi iki anahtarlama durumuna sahiptir. Bu devredeki iki kapasitör üç farklı gerilim seviyesi elde etmek için kullanılır, yani gerilim seviyeleri V_{an} noktaları arasında $V_{dc}/2$, 0, şeklindedir. $V_{dc}/2$ gerilim seviyesinin elde edilmesi için S_{1i} ve S_{2i} anahtarları, $-V_{dc}/2$ gerilim seviyesinin elde edilmesi için S'_{1i} ve S'_{2i} , 0 seviyesi için ise S_{1i} ve S'_{1i} veya S_{2i}

ve S'_{2i} anahtarları ON konumunda olmalıdır. C_{1i} kenetleme kondansatörünün şarj olması S_{1i} ve S'_{1i} anahtarlarının ON konumunda olmasıyla,deşarj olması S_{2i} ve S'_{2i} anahtarlarının ON konumunda olmasıyla sağlanır. C_{1i} 'nin şarj durumunun dengelenebilmesi için uygun anahtarlama seçilmelidir.

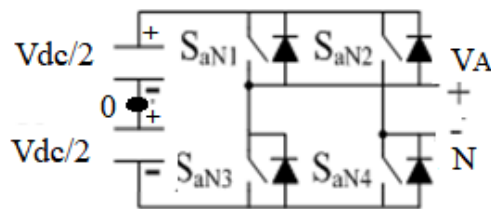
KKE'ler için belirtilen birçok önemli avantaj vardır. KKE yapısında, çok sayıda büyük boy depolama kapasitörleri bulunmasından dolayı geçici koşullar sırasında kapasitelerde ekstra gezinme imkanı sunar. Ayrıca bu kapasitörler enerji kesintisi olsa bile çalışmasını sürdürebilmesini sağlar. Bu avantajlarının yanında maliyeti artırması, şarj vedeşarj kontrolünün hassas olması önemli dezavantajdır. [150], [168]. Ayrıca harmonik içerik, filtre devresine ihtiyaç duyulmadan yeterince düşük çıkar. Bunu sağlamak için seviye sayısının yeterince yüksek tutulması gerekir. Seviye sayısının yükselmesi ise çok fazla miktarda kapasitör kullanılmasına neden olur. Ayrıca, gerilimi büyük boy kapasitörlerde tutmak zordur. Bu nedenle, güç yarı iletken cihazları arasında voltaj gerilmelerinin eşit şekilde paylaştırılmasını sağlamak, sürücünün çıkış geriliminin kalitesini korumak ve toplam harmonik bozulmadaki artışları önlemek için voltaj gerilimi eşitleme ihtiyacı vardır [4]. KKE'lerde birçok anahtar kombinasyonu sayesinde farklı gerilim seviyeleri dengelenebilmektedir. [4], [6], [150], [165].

Shukla ve arkadaşları 2005 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, beş seviyeli KKE tabanlı STATCOM ve SSSC için seri ve şönt kompanzasyon uygulaması önermiştir. Önerilen STATCOM düşük harmonik bozunum ile sinüzoidale yakın çıkış gerilim dalga sinyali oluşturmakta ve yüksek güç işleme kabiliyeti sunmaktadır [169]. Sunulan bir diğer çalışma 2007 yılında Shukla arkadaşları tarafından yine KKE kullanılan DSTATCOM uygulamasıdır. KKE'ye dayalı DSTATCOM ile akım enjeksiyonunu kontrol etmek için bir histerezis akım kontrol tekniği önerilmiştir [170]. Rai ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada ise KKE'li STATCOM yapısının tasarımı ile kontrol şeması incelenmiş ve PSCAD/EMTDC ortamında simülasyonu yapılarak analizleri gerçekleştirilmiştir [171]. Güç sistemlerinde güvenlik ve performansı geliştirmek için Khan ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yapılan çalışmayla KKE tabanlı STATCOM cihazlarına bir bakış açısı sunulmaktadır. Bu cihazlar gerçek şebeke durumlarındaki uygulamalar için dikkate alınmıştır [172]. 2014 yılında ise Viswanathan ve arkadaşı tarafından beş seviyeli KKE tabanlı STATCOM ile güç sistemleri için güç osilasyon sönümleme ve gerilim kontrolü çalışması sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada STATCOM üzerinde birçok anahtarlama yöntemi ve

modülasyon indeksi çalışılarak, analizleri detaylı incelenmiştir [173]. Yine 2014 yılında Lakshmi ve Gandhimath tarafından yenilebilir enerji sistemleri için yedi seviyeli KKE'ye dayalı DSTATCOM önerilmiştir. Önerilen devre yüksek çıkış gerilimi ve düşük elektromanyetik bozunum üretmektedir. Daha yüksek güç dağıtım kapasitesine izin vermektedir. Ayrıca bu yapı sayesinde gerekli güç anahtarlarının sayısı azaltılabilmektedir [174]. Duraisamy ve Gandhi ise 2015 yılında şönt kompanzasyon için beş seviyeli KKE kullanan STATCOM önermiştir. Ayrıca bu çalışmada Kompanzatorün performansları bir SMIB (Tek makineli sonsuz bara) sistemi için incelenmiştir [175].

3.2.3. Kaskat Evirici (KE)

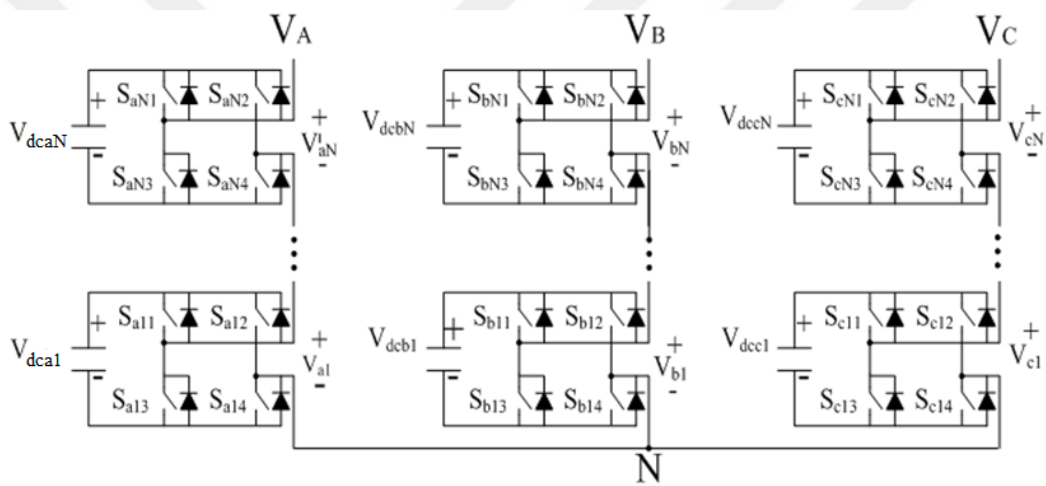
KE'ler, diğer çok seviyeli evirici yapıları arasında en uygun yapıdır, çünkü daha az bileşen gereksinimi, daha az anahtarlama kaybı, kontrol tasarımında uygulanabilirlik, ve daha iyi AC çıkış dalga formu kalitesi gibi birçok ayırt edici özellikleri vardır. Aynı zamanda yüksek modülerlik derecesine sahiptir, çünkü her evirici benzer devre yapısına, kontrol yapısına ve modülasyona sahip bir modül olarak görülebilir [43], [150]. Bu nedenle, bu modüllerden birinde bir arıza olması durumunda, hızlı ve kolay bir şekilde değiştirilmesi mümkündür. Ayrıca, uygun bir kontrol stratejisi ile hatalı modülü yükü durdurmadan atlayarak neredeyse kesintisiz bir genel kullanılabilirlik elde etmek mümkündür. DC gerilim dengeleme ve ortak bağlantı noktasındaki reaktif güç kompanzasyonu ise KE'lerin üstünlüğünü artıran diğer konulardır. Bu özellikler son yıllarda FACTS ve özel güç cihazları, orta gerilim endüstriyel sürücüler, yüksek güçlü motor sürücü devreleri, fotovoltaik hücre üretim sistemleri, yüksek gerilim ve güce sahip iletim ve dağıtım sistemlerinde kompanzasyon uygulamalarında kullanımı artmıştır [150], [176]. KE'lerin temel birimi, tek fazlı H köprü hücresidir ve bu yapı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tek fazlı H köprü hücresi [176].

Farklı anahtarlama durumu kombinasyonları kullanarak, H köprü hücresi $+V_{dc}$, 0 ve -

V_{dc} şeklinde üç farklı gerilim seviyesi üretebilir. Bu üç gerilimin toplamı, sonuçta ortaya çıkan çıkış dalga formunun üretilmesine neden olur [150], [176]. KE'ler, yüksek gerilimli düşük harmonik AC çıkış dalga formu üretmek için birbirine seri bağlı ve birbirinden ayrı denetlenebilen, her birim için ayrı DC kaynağına sahip çok sayıda H köprü bloğu kullanır. Çıkış geriliminin seviye sayısı artırılması için, her faza ait H köprü hücreleri seri olarak bağlanmalıdır. Her H köprünün DC tarafında farklı bir DC kondansatör mevcuttur. Her fazdaki seviye m sayısı, $m=2n+1$ formülü ile hesaplanabilir. Buradaki n modül sayısını gösterir [176]-[178]. Üç faz m seviye H köprüsü KE'nin genel yapısı Şekil 3.8'de gösterilmektedir [179]. Çizelge 3.3 ise, Şekil 3.8'deki A fazı için ilgili gerilim seviyelerine sahip anahtarlama durumlarını göstermektedir .



Şekil 3.8. Üç fazlı, H köprü KE genel yapısı (yıldız bağlı) [179].

Çizelge 3.3. A fazına ait H köprü KE'nin ilgili voltaj seviyelerinin anahtarlama durumları [176].

Anahtarlama Durumu				İnverter Gerilimi
S_{aN1}	S_{aN2}	S_{aN3}	S_{aN4}	
ON	OFF	OFF	ON	+Vdc
ON	ON	OFF	OFF	0
OFF	ON	ON	OFF	-Vdc

KE'lerde H köprü modül sayısının artırılması kaskat evirici çıkışındaki güç ve gerilim kapasitesini artırabilmektedir. Ayrıca hiçbir bağlantı trafosu kullanılmadan orta gerilim dağıtım hattına doğrudan bağlanabilir [177]. KE'lerde, kullanılan anahtarlama

yöntemlerine bağılı olarak, çıkış geriliminde harmonik bozunum azalır [178].

KE'lerde, her bir H köprüye ait ayrı kondansatör olması her fazın kontrolünü kolaylaştırır ve meydana gelen AC sistem gerilimlerinin yeniden dengelenmesini sağlar [180].

KE'ler için belirtilen birçok önemli avantaj vardır. Aynı seviyedeki diğer topolojilere kıyasla en az sayıda bileşene sahiptir. Ayrıca kontrol edilmesi kolaydır ve gerilim dengeleme sorunu yoktur. Güvenilir, tasarımı kolay ve maliyeti düşüktür. Yapısında dengeleme kondansatörü ile kenetleme diyotu yoktur. Ayrıca devre katlarının her birinin yapısı aynıdır. Ek olarak, kaskat H köprülü çok seviyeli evirici yapısı yenilenebilir enerji kaynakları için, özellikle de ayrılan DC kaynakları özelliğinden dolayı PV sistemi için kullanılabilir. Bununla birlikte, DC kaynak kapasitörlerin kontrolü KE yapısının en büyük dezavantajıdır. Diğer dezavantaj ise, her bir H köprüsü için kullanılan DC gerilim kaynakları gerekliliğidir, bu durum sistemin güvenilirliğini azaltır ve uygulama alanlarını sınırlandırır [4], [6], [12], [31], [150], [178].

Deniz ve arkadaşları tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada, KE tabanlı STATCOM'daki DC kaynak gerilim dengesizliği sorunu için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen HEPWM yöntemi 7 seviyeli KE içeren STATCOM modeline uygulanmıştır [181]. 1995 yılında Peng ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada 11 seviyeli KE tabanlı STATCOM için bir laboratuvar modeli önerilmiştir [182]. Haw ve arkadaşları ise 2014 yılında yaptıkları çalışmayla, tek fazlı KE kullanan transformatörsüz STATCOM için çok seviyeli bir seçici harmonik eliminasyon PWM yöntemi önerilmiştir. Önerilen PWM yöntemi diğer yöntemlerle karşılaştırılarak yöntemin DC gerilim düzeylerini ve anahtarlama açılarını en iyileştirdiği ifade edilmiştir [183]. Yine 2015 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada reaktif güç kompanzasyonu ile şebekenin güç faktörünü düzeltmek amacıyla 5 seviyeli KE'li STATCOM kullanarak yeni bir algoritma önermişlerdir. Önerdikleri algoritmayı bir laboratuvar prototipinde uygulamışlardır [184].

3.3. EVİRİCİ YAPILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Geçen zaman içerisinde STATCOM ve DSTATKOM'un devre yapısının güç kısmında çeşitli evirici yapıları kullanıldığı yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir. Eviricilerin temel yapı taşını oluşturan iki seviyeli eviriciler ilk kullanılan evirici

yapısıdır. Bu eviriciler ile birlikte zigzag transformatörleri kullanılarak STATCOM'un çıkışında meydana gelen harmonik bozulma azaltılmaya çalışılmıştır. Daha öncede ifade edildiği gibi zigzag transformatörlerin dezavantajları, yapı olarak ağır bir yapıya sahip olması ve maliyet açısından daha pahalı olduğu için sistemin maliyetini artırmasıdır [150].

İki seviyeli eviricilerde $+V_{dc}/2$ ve $-V_{dc}/2$ şeklinde iki gerilim seviyesi vardır. Eleman sayısı açısından bakıldığında Çizelge 3.4'den anlaşılabacağı üzere, iki seviyeli eviricilerde DC bara kapasitörü bir tane bulunur ve temel diyot sayısı $2.(m-1)$ 'ye eşittir. Bir fazda bulunan yarı iletken güç anahtarı sayısı ise iki tanedir. Çıkıştaki gerilim seviyesinin artması için anahtarlama elemanı sayısının artırılması gerekir. Yüksek güçlü bir reaktif çıkış içinde yarı iletken anahtarlar seri bağlanmalıdır. Bu yarı iletken anahtarların bir sinyalin oluşması için geçen süre boyunca ilettime geçmesi ya da kesime gitmesi, evirici içerisinde anahtarlama kayıplarında artışa neden olur. Bu durumun giderilmesi için eviricide yüksek anahtarlama frekansı tercih edilir. Yüksek anahtarlama frekansı ile çıkışta istenilene yakın akım sinyali ile gerilim sinyali elde edilir. Ancak bu avantajının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlardan en önemlisi yüksek güç uygulamaları sırasında meydana gelen anahtarlama kayıpları ile anahtarların anma akımının ve geriliminin üstündeki değerlerde kullanılmamasıdır. Ayrıca istenen verimin elde edilememesi, sistem maliyetinin zigzag transformatörlerden dolayı yüksek olması, elemanlar üzerinde meydana gelen kayıpların sistem kayıplarının yarısını oluşturması, kontrolünün zor olması da dezavantajları arasında sayılabilir. Ancak buna rağmen literatür incelendiğinde çözüm olarak sunulduğu ve çeşitli uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir. Bu uygulamalar arasında doğrusal olan ve doğrusal olmayan yük için kompanzasyon, kömür madeninde kullanılan makineler için kompanzasyon, kömür konveyör sürücülerini için kompanzasyon, gerilim düşümü için kompanzasyon, oluşan gerilim dalgalanmaları ve güneş tarlaları sayılabilir [43], [140]-[150].

Günümüzde yapılan çalışmalar sonucunda iki seviyeli eviricilere alternatif olarak çok seviyeli eviriciler önerilmektedir. Çok seviyeli eviriciler genellikle yüksek gerilim ve akım uygulamaların yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu, motor sürücülerini, evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazları, enerji piyasası, taşımacılık, yakıt hücre uygulaması, yenilebilir enerji uygulaması alanlarında da tercih edilmektedir. İki seviyeli eviricilerde belirtilen zigzag transformatörler ile seri bağlı anahtarlama cihazları çok seviyeli eviricilerde kullanılmaz. THD değeri küçük yüksek gerilim elde edebilmek için

anma değeri yüksek eleman kullanılmaz. Eviricideki gerilim seviyesi arttıkça çıkış gerilimindeki THD değeri küçülür, eviricinin çıkışındaki gerilim değeri yükselir ve güç değeri artar. Eviricide yer alan elemanlar üzerindeki gerilim denetlenebilir. Bu avantaj düşük THD değerli ve yüksek gerilimli evirici üretimini kolaylaştırmıştır [150].

Liteatüre bakıldığında DKE'ler, çok seviyeli eviricilerde ilk önerilen yapılardır [165]. DKE'lerde giriş gerilimi istenen seviyeye bölünebilmektedir. Bu seri bağlı kapasitörler arasındaki yer alan düğüm noktası ile gerçekleşir. Seviye sayısı arttıkça çıkışta daha düzgün sinüzoidal sinyal elde edilir. Eleman sayısı açısından değerlendirilecek olursa Çizelge 3.4'de verildiği gibi, m seviyeli çok seviyeli DKE'lerde, DC bara kapasitör sayısının seviye sayısından bir eksik olduğu görülmektedir. Ayrıca DC barada C1,C2,C3 ve C4 şeklinde dört adet kapasitör vardır. Her kapasitör üzerine düşen gerilim seviyesi $V_{dc}/4$ kadardır. Burada kapasitörlerin uçlarındaki gerilim değerleri farklı olduğu için kapasitörler tarafından sağlanan akım değerleri de farklıdır. Evirici birim güç katsayısında çalışırken, her kapasitörün boşalma süresi farklıdır. Bu durum, eviricilerde seviye sayısı arttıkça denetimi zorlaştırır ve anahtarlama esnasında gerilim dengesizliği oluşmasına sebep olur. Bir dezavantaj olarak görülen diyot kenetlemeli eviricilerdeki bu sorun literatürde yer alan [150], [154]-[163] çalışmalarda incelenmiş, birçok çözüm yöntemi önerilerek uygulaması gerçekleştirilmiştir. Diyot kenetlemeli eviricilerde ekstra kenetleme diyotları vardır. Bu kenetleme diyotları her anahtarlama elemanı üzerine $V_{dc}/4$ kadar gerilim düşümünü sağlar. Çizelge 3.4'de verildiği üzere, seviye sayısı m olan diyot kenetlemeli bir evirici (m-1) adet kapasitör, 2.(m-1) adet yarı iletken anahtar ile (m-1).(m-2) adet kenetleme diyotu kullanmaktadır. Bu eviricilerde, gerilim dengesizliği, ekstra kenetleme diyotları, DC kapasitörler ve kontrol zorluğu nedeniyle seviye sayısının artırılması istenmez.

Bu olumsuzluklardan dolayı DKE yerine daha sonra KKE yapıları önerilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. KKE'ler yapı olarak DKE'ye benzer, ancak DKE'ye göre farkı gerilim kenetleme diyotları kullanılmaz, yerine dengeleme kapasitörleri kullanılır. Aktif güç akışı ve reaktif güç akışını kontrol edebilmesi ve filtreye gerek duyulmaması avantajlarına sahiptir. Dezavantajı ise bu evirici yapısının diğer evirici yapılarına göre daha zor gerçekleştirilmesidir. Bunun nedeni KKE'lerde çıkış gerilim seviyesini elde edebilmek için, anahtarlama elemanlarının durumuna göre kapasitörlerin her birinin geriliminin toplanması gerekir. Eviricinin çıkış gerilim seviyesi artırıldığında kapasitörlerin her biri farklı gerilim seviyelerinde şarj edilir. Bu ise devredeki

elemanların kontrol edilmesini güçleştirir. Ayrıca, harmonik dalgalanma bakımından DKE'ye göre daha verimli olan KKE yapısının FACTS ve özel güç cihazlarında kullanımını kısıtlar. Bu kısıtlamalara rağmen literatürde yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi [150], [169], [171], [173] şönt kompanzasyon uygulamaları, yenilebilir enerji sistemi uygulamaları, güç sistemlerinde güvenliğin geliştirilmesi, verimin artırılması, osilasyon sönümlleme ile gerilimin kontrol edilmesi, yüksek çıkış gerilimi ile düşük elektromanyetik bozulma gibi birçok uygulama için önerilmiş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Çizelge 3.4'de verildiği gibi, seviye sayısı m olan bir KKE'de $(m-1)$ tane ana kapasitör ile $(m-1).(m-2)/2$ tane yardımcı kapasitör kullanılır. Eviricideki seviye sayısının artması kapasitör sayısını artırır. Bu durumun dezavantajı maliyeti artırması ve elemanların kontrolünü zorlaştırmasıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda KKE'ye alternatif olarak birbirine seri olarak bağlı H köprü bloklarından oluşan çok seviyeli KE yapıları önerilmiştir. KE'ler diğer çok seviyeli evirici yapıları arasında en uygun yapıdır, çünkü yapıdaki modülerlik ve kontrol tasarımında uygulanabilirlik, daha az anahtarlama kaybı ve daha iyi çıkış dalga formu kalitesi bakımından ayırt edici özelliklere sahiptir. Kullanılan eleman açısından diğer eviricilerden farkı, gerilim kenetleme diyotu ile gerilim dengeleme kapasitörü yoktur. Ayrıca diğer evirici yapıları ile kıyaslandığında en az sayıda elemana gereksinim duyar. Çizelge 3.4'de verildiği gibi, seviye sayısı m olan bir KE'de $2.(m-1)$ tane temel anahtarlama elemanı ile temel diyot elemanı ve $(m-1)/2$ tane ana kapasitör kullanılmaktadır. KE'lerde gerilim paylaşımı için bağımsız DC kaynak gerilimine ihtiyaç duyulur. İstenilen gerilimin üretilmesi ve kontrolünün sağlanması birden fazla bağımsız DC kaynak ile gerçekleştirilebilir. Eviricide DC kaynak olarak, batarya, solar hücre, en üst seviye kapasitör yada yakıt hücreleri kullanılabilir. Bu özellik KE'lerin birçok yenilebilir enerji kaynaklarında kullanımını sağlar. KE'lerde ana frekansa benzer şekilde her bir H köprünün anahtarlama düşük frekansta gerçekleşir. Düşük frekansta anahtarlama nedeniyle toplam harmonik bozunum daha düşüktür ve eviricinin çıkış gerilimi sinüzoidal sinyale daha çok benzer. Faz akımının sinüzoidal olması durumunda, bir periyot boyunca her bir kondansatör için ortalama yükün sıfır olduğu görülür ve böylece kondansatör gerilimleri dengelenmiş olur. Bu durum seviye sayılarının genişletilebilmesi kolaylığını sağlar. KE'ler aynı zamanda modülerliği, kullanılabilirliği, genel verimliliği gibi avantajları sebebiyle FACTS ve özel güç cihazları, HVDC, SVC ve yüksek güç motor sürücüler vb. uygulamalarda kullanılmıştır. Aynı zamanda

literatürde açıklandığı üzere [53], [61], [150], [182] FACTS ve özel güç cihazlarında DC gerilim seviyesi ile anahtarlanmanın düzeltilmesi, kaynağın güç faktörünün iyileştirilmesi, verimli ve güvenilir şekilde reaktif güç kompanzasyonun hızlı yapılması, yüksek gerilim özellikli enerji iletim hatlarının reaktif güç kompanzasyonu için çok seviyeli KE'ler tavsiye edilmiş ve uygulamalarda kullanılmıştır. KE'lerin kullanıldığı uygulamalar literatürde yer alan çalışmalarda [7], [40], [93], [109], [149], [150], [182]-[184] desteklenmiştir.

İki seviyeli eviriciler ile çok seviyeli evirici yapılarının her faz için kullanılan eleman sayısı açısından kıyaslaması Çizelge 3.4'de verilmiştir. Gerilim değerinin bütün elemanlarda aynı olduğu farz edilmiştir. Akım değerleri ise farklı olabilir.

Çizelge 3.4. İki seviyeli evirici ile m seviyeli çok seviyeli eviricinin her fazı için gereken farklı bileşen sayısı açısından yapılan kıyaslanmanın değerlendirilmesi.

Evirici Yapısı	Temel anahtarlama	DC bara kapasitörü	Dengeleme kapasitörü	Temel diyot	Kenetleme diyotu	Kullanım Yeri
2 Seviyeli Evirici	2	1	-	2.(m-1)	-	Alçak gerilim, aktif güç filtresi uygulamaları.
DKE	2.(m-1)	(m-1)	-	2.(m-1)	(m-1).(m-2)	Motor sürücüler, evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazları (STATCOM, SSSC, vb.), yakıt hücresi uygulamaları.
KKE	2.(m-1)	(m-1)	(m-1).(m-2)/2	2.(m-1)	-	Motor sürücüler, evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazları (STATCOM, SSSC, vb.).
KE	2.(m-1)	(m-1) / 2	-	2.(m-1)	-	Bazı orta ve yüksek gerilim uygulaması, Evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazları, PV sistemler, motor sürücüler, kesintisiz güç kaynağı.

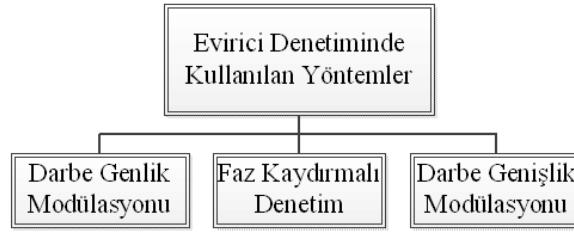
Yapılan araştırma sonucunda, iki seviyeli evirici ile çok seviyeli evirici yapıları karşılaştırıldığında, Çizelge 3.4'de görüldüğü gibi, KE yapısı daha üstün özellikleriyle dikkat çekmektedir. Alternatif evirici yapılarına göre, modüler yapısının yüksek olması, kullanılabilir olması, maliyetinin düşük olması, eleman sayısının yeterli olması, yapılarının esnek olması sebebiyle seviye sayılarının ve güç kapasitelerinin kolay artırılabilmesi, anahtarlama frekansı aynı iken çıkıştaki gerilimin toplam harmonik bozunumunun düşük olması, daha düşük DC hat gerilimi ile aynı çıkış geriliminin elde

edilmesi KE yapısının kullanılabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca literatür incelendiğinde, istenen reaktif akımın KE tabanlı FACTS ve özel güç cihazlarında çok kısa sürede karşılandığı görülmektedir. KE tabanlı FACTS ve özel güç cihazlarıyla yapılan uygulamalarda reaktif gücün çok hızlı sağlanması, KE'nin diğer çok seviyeli evirici yapılarının dezavantajlarını giderdiğini göstermektedir. Gerçekleştirilen çalışmada bulunan sonuçlar, KE yapısının FACTS ve özel güç cihazlarıyla yapılan uygulamalar için oldukça kullanışlı olduğunu göstermektedir.



4. EVİRİCİLERDE KULLANILAN MODÜLASYON TEKNİKLERİ

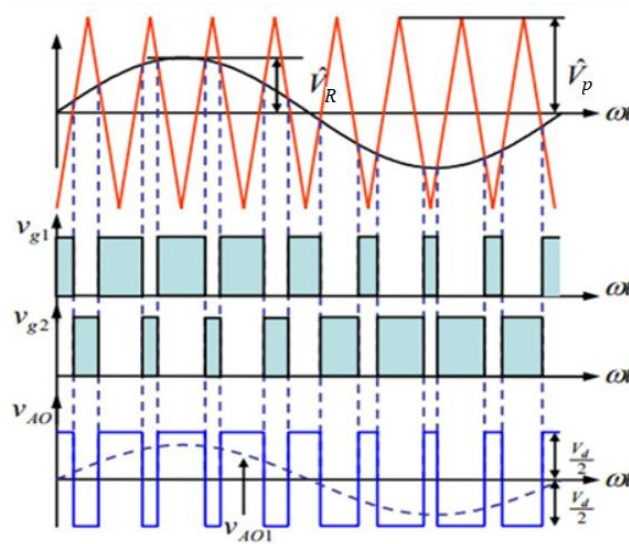
FACTS ve Özel Güç cihazları, PV sistemler, AC motor kontrolü, kesintisiz güç kaynakları gibi birçok alanda kullanılan eviriciler bir DC gerilimi AC gerilime dönüştürür. Yüksek verimli bir evirici için düşük anahtarlama kayıpları, en uygun ortak mod gerilimi, daha az toplam harmonik bozulma ve maksimum DC kaynak gerilimi kullanımı olmalıdır. Bu performans endeksini elde etmek için çeşitli anahtarlama yöntemleri mevcuttur. DC kaynaktaki gerilimin yüksek verim ile AC çıkış gerilimine dönüştürülebilmesi için az sayıda anahtarlama elemanı kullanılmalı ve anahtarlama işleminde kullanılacak kontrol yöntemine dikkat edilmelidir. Anahtarlama elemanları doğru bir şekilde kontrol edildiğinde yüksek verim sağlanarak DC kaynaktaki gerilim AC çıkış gerilimine dönüştürülebilmektedir. Evirici devre yapılarının kontrol edilebilmesi için gerekli bazı şartlar sağlanmalıdır. Bu şartlar, kullanılacak anahtarlama tekniği, DC giriş geriliminde meydana gelen değişimleri kontrol altına alabilme, eviricilerin çıkışındaki gerilimi kontrol edebilme, sabit gerilim ile frekansın kontrolünü sağlayabilme ve harmonik bozunumu giderebilmeyi kapsamaktadır. Bir evirici devre çıkışındaki AC gerilimin genlik değeri ile frekans değerinin istenilen şekilde ayarlanması ve sinyalin sinüzoidal sinyale benzer sinyal olması gerekmektedir. Pratikte sinüzoidal sinyal için belirtilen net bir görüş yoktur. Genel olarak gerçek bir sinüzoidal sinyal, gerilim dalga formundaki THD'nin %3 oranından az olduğu çıkış gerilimleri olarak düşünülmektedir [185]. Gerçek sinüzoidal sinyal içeren eviricilerin yapısı daha karmaşık olmakla beraber ve maliyeti de yüksektir. Bu nedenle eviricinin kullanılacağı uygulamaya uygun bir şekilde seçilmesi ve kullanılacak kontrol tekniği çok önemlidir. Eviricilerin çıkışındaki gerilimin genlik ve frekans değerini kontrol edebilmek için tercih edilen kontrol tekniği, evirici yapıların kendi içerisinde gerçekleştirilmesiyle elde edilir. Bu teknikte yükte oluşan gücün kontrolünü sağlayabilmek için, evirici yapının çıkışındaki gerilimin frekans değeri ile harmonik değer kontrolü evirici yapının içinde sağlanır. Aşağıda verilen Şekil 4.1'de evirici devre yapılarında kullanılmak için geliştirilen ve gerilim ile frekans kontrolünü gerçekleştiren yöntemler verilmiştir [151], [186].



Şekil 4.1. Evirici devre yapılarında gerilim ile frekans kontrolünü gerçekleştiren yöntemler

Bu yöntemlerden Darbe Genlik Modülasyonu ve Faz Kaydırmalı Denetim tekniklerinin harmonik içeriği yüksektir ve sinyaller sinüzoidal değildir. Bu nedendaha kullanışlı birçok yeni yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntemlerden en çok kullanılanı Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) yöntemidir [151].

PWM yöntemi en çok iki seviyeli eviricilerde tercih edilmektedir. Bu yöntemde darbe genişliği ayarlanarak ve sabit anahtarlama frekansı kullanılarak eviricinin çıkışında temel frekansta sinüzoidal sinyal üretilir. Bir taşıyıcı dalga ile bir modülasyon dalgasının karşılaştırıldığı yöntemde, taşıyıcı dalga olarak anahtarlama frekansında bir üçgen dalga ve modülasyon dalgası olarak ise istenilen frekans ve genlikte bir sinüzoidal dalga karşılaştırılır. Taşıyıcı dalga ile modülasyon dalgasının birleşme noktaları anahtarların anahtarlama durumlarını belirlemektedir. Evirici devredeki tüm fazlarda taşıyıcı dalga ortaktır ancak sinüzoidal dalga her bir fazda bulunur. Şekil 4.2’de tek fazlı evirici için anahtarlama sinyali ile PWM’in için çıkış dalga formu verilmektedir [187].



Şekil 4.2. Tek fazlı evirici için anahtarlama sinyali ile PWM çıkış dalga formu [187].

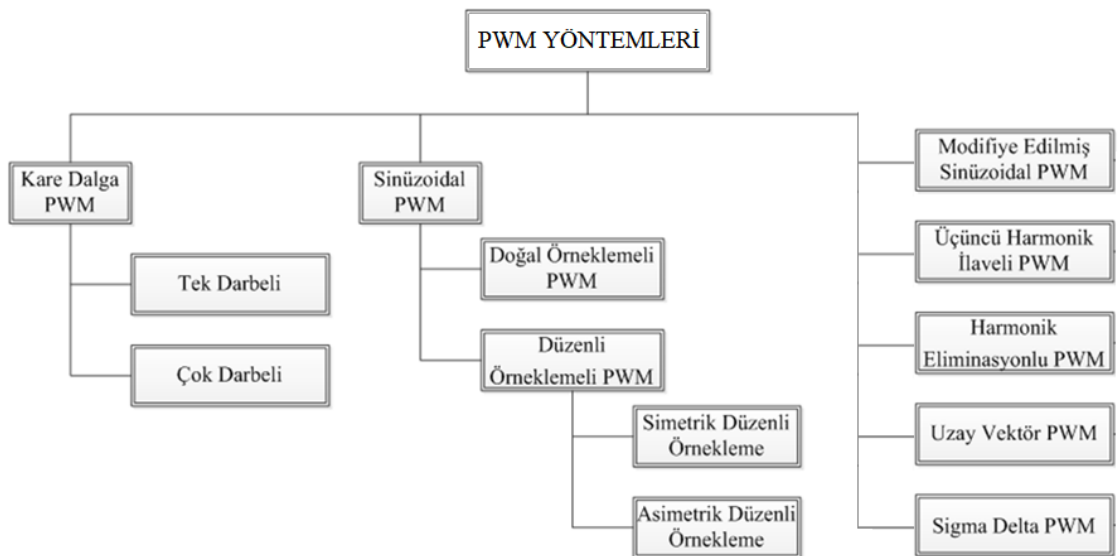
Gerilim kontrolü için bu yöntemlerden en çok kullanılanı Sinüzoidal PWM yöntemidir. Bununla beraber, darbe genişlik modülasyonu, PWM modülasyon tekniklerinin daha iyi anlaşılması için bir temel oluşturur.

Bu çalışmada iki seviyeli evirici ile diyet kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat eviricilerin üç ve beş seviyeli devrelerinin MATLAB/SimPower System’de SPWM yöntemi kullanılarak simülasyonu yapılacağı için sadece darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM)’dan bahsedilecektir.

4.1. DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU (PWM)

Eviricilerden istenen en önemli şey, çıkış işaretinin genliğini ve frekansı ayarlayabilmektir. Ayrıca çıkışın harmoniksiz olması yani sinüzoidale yakın olması istenir. Ancak evirici çıkışında ana harmoniğe çok yakın ve genlikleri büyük harmonikler oluşmaktadır. Bu harmonikler yükü, özellikle de motor olması durumunda çok etkilemektedir. Eviricilerde çıkış harmonik bileşenlerinin büyüklüğünü azaltmak ve çıkış geriliminin genliğini ayarlamak amacı ile PWM anahtarlama yöntemi kullanılır. Gerilimini ve frekansını denetleyebildiğimiz bağımsız bir AC kaynağın çıkış gerilimi harmonik bileşen içermektedir. Yine DC kaynak giriş akımında harmonik bozulma görülebilmektedir. Bu dalgalanmaları önlemenin çeşitli yöntem ve uygulamaları vardır.

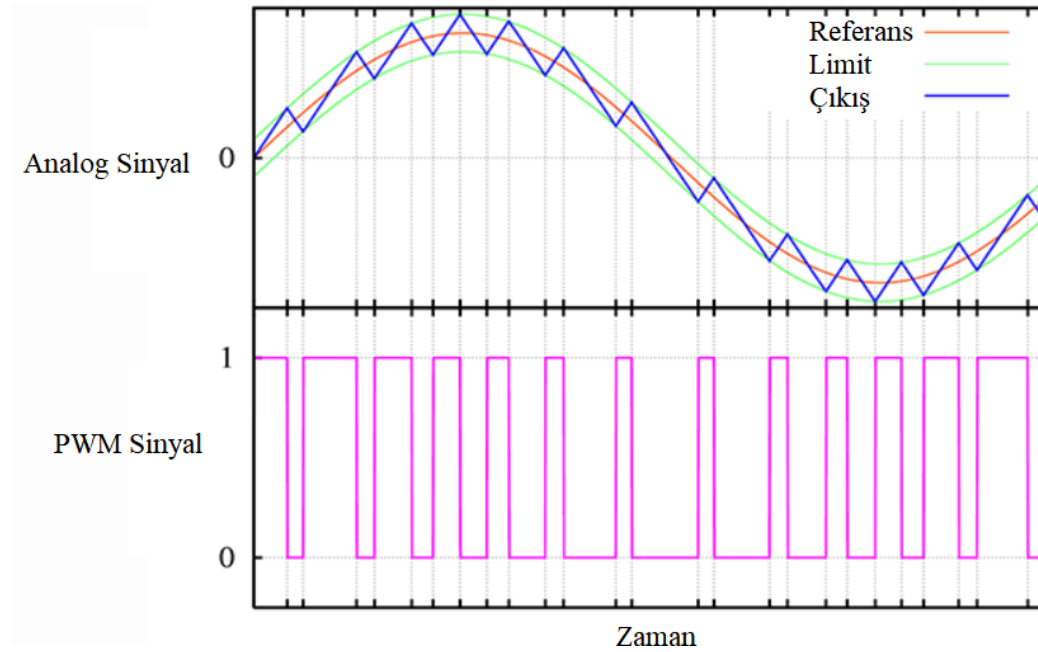
Darbe Genişlik Modülasyonunda en çok tercih edilen yöntemler Şekil 4.3’de verilmektedir [4].



Şekil 4.3. PWM yöntemleri [4].

PWM’de istenen darbe şeklinin kare dalga olması ve evirici çıkışındaki dalganın harmoniğini azaltmak için bu darbelerin genişliği değiştirilebilir. İlk yarı periyotta iken darbe sayısı artırılarak anahtarlama harmoniklerinin frekansının yükseltilmesi sağlanır. Ancak bu durum anahtarlama kayıplarını artırmaktadır. Bu nedenle PWM yöntemi seçilirken dikkat edilmesi gereken nokta, düşük seviyeli harmonik akımların engellenmesi ve anahtarlama kayıplarının minimum yapılmasıdır. Böylece çıkış geriliminin frekans ve harmonik içeriklerinin büyüklüğü aynı anda eviriciden kolayca kontrol edilebilecektir. Üç fazlı eviricilerin çıkış dalga şekillerinde ise çıkış gerilimleri arasında 120° faz farkı bulunduğundan, PWM sinyalleri arasında da 120° faz farkı bulunmalıdır. [151], [188].

Genel olarak PWM sinyalleri frekansı yüksek bir üçgen taşıyıcı sinyal ile frekansı düşük sinüzoidal referans sinyalin karşılaştırılması sonucu meydana gelir. Bu yöntemde eviriciler belirli bir süre içerisinde anahtarlama yöntemini kullanarak DC gerilimi açıp kapatarak çıkışta elektriksel sinyal oluşturur. Bu sinyal sinüzoidal sinyale benzemektedir. Bu durum Şekil 4.4’de gösterilmektedir [187].



Şekil 4.4. PWM’in çalışma prensibi [187].

Referans sinyalin tepe değerinin (V_R) üçgen sinyalin tepe değerine (V_P) oranı modülasyon indeks değerini verir. Modülasyon indeks sembolü M_i 'dir. Modülasyon indeks değeri değiştirilerek çıkış geriliminin ana harmonik genliği ayarlanır. Bu çalışmada DC bara sabit tutularak M_i değeri değiştirilmiştir. Üçgen sinyalin frekansının

(f_s) referans sinyalin frekansı (f_m)'na oranı frekans modülasyon oranı denir ve sembolü m_f 'dir. m_f değerinin minimum 9 olması gerekir. m_f değeri büyüdükçe harmonik bileşenler azalır.

Aşağıda modülasyon indeksi ve frekans modülasyon oranı hesabı için gerekli formül verilmektedir.

M_i =Modülasyon indeksi,

m_f =Frekans modülasyon oranı,

f_s = Üçgen taşıyıcı dalganın frekansı,

f_m =Referans dalganın frekansı,

f_1 =Çıkıştaki işaretin ana harmoniğinin frekansı olmak üzere,

$$M_i = \frac{V_R}{V_P} \quad (4.1)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_m} \quad (4.2)$$

Bu çalışmada DC bara sabit tutularak M_i değeri değiştirilmiştir. Modülasyon indeksi değişince eviricinin çıkış gerilimide değişmektedir. Aşağıda fazlar arası gerilim ile faz gerilimi hesaplamak için gerekli formül verilmektedir.

Faz gerilimi için,

$$V_f = \frac{M_i V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

Fazlar arası gerilim için,

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3} M_i V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

Modülasyon indeksinin (M_i), üretilen AC çıkış voltajının büyüklüğünün, üretilebilecek maksimum AC çıkış voltajının büyüklüğüne oranı olarak da tanımlanabilir. Bu durumda AC çıkış voltajında üretilen toplam harmonik bozulma (THD) yüzdesi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [190].

$$THD(\%) = 100 \cdot \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots} V_n^2} / V_1 \quad (4.5)$$

$$V(n) = 4 \cdot V_{dc} (\cos(n\alpha_1) + \dots + \cos(n\alpha_5)) / n\pi \quad (4.6)$$

4.2. SINÜZOİDAL DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU (SPWM)

SPWM tekniği, çok seviyeli PWM teknikleri içerisinde PWM sinyallerinin elde edilmesi ve aynı zamanda birçok uygulamada kullanılması açısından bilinen en eski tekniktir. SPWM uygulanırken bir üçgen sinyal ile bir sinüzoidal sinyal doğal örneklemeye yoluyla karşılaştırılmaktadır. Bu yöntem Sinüzoidal PWM denilmesinin nedeni, referans işaret olarak bir sinüzoidal sinyalin kullanılmasından kaynaklanır. SPWM yönteminde sinüzoidal sinyal sabit kalmak koşuluyla, eviricinin seviye durumuna bağlı olarak taşıyıcı sinyal sayısı artırılmaktadır. m seviyeli bir eviricide, taşıyıcı sinyal sayısının $(m-1)$ tane olması gerekir. Ancak burada taşıyıcı sinyalin genliği ve frekansı aynı olmalıdır [150].

Literatür taraması, Sinüzoidal PWM yönteminin tüm modülasyon teknikleri içerisinde en basit yöntem olduğunu göstermektedir [191]. Sinüzoidal PWM yönteminde modülasyon indeksi M_i , frekans modülasyon oranı m_f ve sinüzoidal referans sinyalinin frekansı f_m olmak üzere üç kontrol bileşeni bulunur [4].

Doğal örneklemeli sinüzodal PWM’de kullanılan referans sinüzoidal sinyal ve taşıyıcı üçgen sinyalin özellikleri ile bu sinyallerin frekans ve genliklerindeki değişikliklerin eviricinin çıkışını nasıl etkilediği aşağıdaki verildiği gibidir [4].

1- Referans Sinüzoidal Sinyalin Özellikleri ve Etkisi:

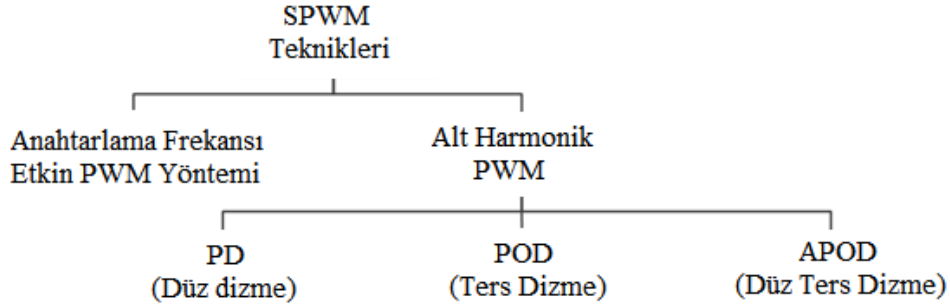
- Referans işareti temsil eden sinüzoidal sinyale aynı zamanda, kontrol işareti denilmektedir. Genliği V_R ile frekansı f_m ile gösterilmektedir.
- Sinüzoidal sinyalin frekansı f_m , eviricin çıkış frekansıdır. Bu nedenle eviricinin çıkış frekansı sinüzoidal sinyalin frekansı değiştirilerek ayarlanabilmektedir.
- Eviricinin çıkış gerilimindeki harmoniğin genliği azaltılabilir veya artırılabilir. Bunun için M_i ve V_P sabit tutulmak şartıyla referans sinyalin genliği azaltılmalı yada artırılmalıdır.

2- Taşıyıcı Üçgen Sinyalin Özellikleri ve Etkisi:

- Taşıyıcı sinyal olan üçgen sinyalin genliği V_P ile frekansı f_s ile gösterilmektedir. Buradaki f_s frekansı eviricinin anahtarlama frekansıdır.
- Taşıyıcı sinyalin frekansı ile sinüzoidal sinyalin frekansı karşılaştırıldığında, taşıyıcı sinyalin frekansının çok büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle eviricinin anahtarlama frekansını belirlemede etkilidir.

3. Taşıyıcı sinyalin genliğinin genellikle sabit olması istenir.

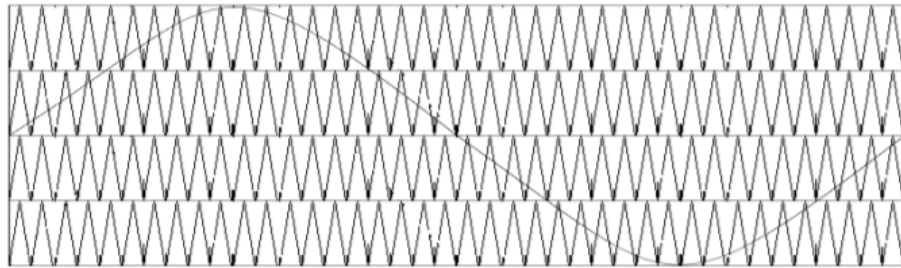
SPWM yönteminde, taşıyıcı dalgaların referans sinyale göre yerleştirilme şekillerine bağlı olarak, PD (Düz dizme), POD (Ters dizme) ve APOD (Düz ters dizme) PWM olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma Şekil 4.5’de gösterilmiştir [193].



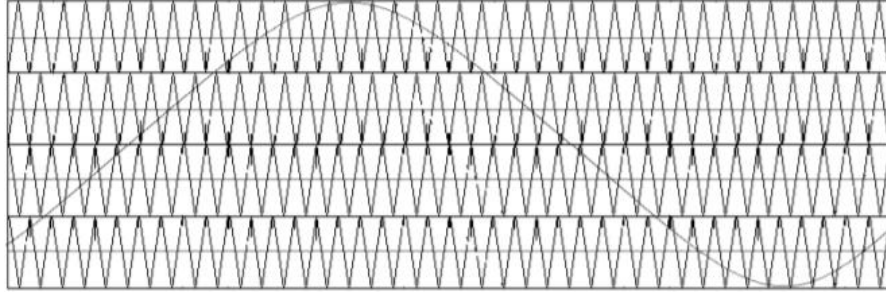
Şekil 4.5. SPWM’in sınıflandırılması [192].

PD-PWM’de, tüm taşıyıcı sinyaller aynı fazdadır. POD-PWM’de, sıfır referansın üzerindeki tüm taşıyıcılar aynı fazdaysa, referansın altındaki taşıyıcı sinyaller ile aralarında 180° faz farkı vardır. Bu yöntem, daha düşük modülasyon indeksleri içindeki harmonik performanslar açısından daha iyi sonuçlara sahiptir. APOD-PWM’de ise, her taşıyıcı sinyal, bitişiğinden 180° derece kaydırılır. Bu nedenle, hat gerilimleri için POD yöntemine göre daha iyi bir THD sağlar [193].

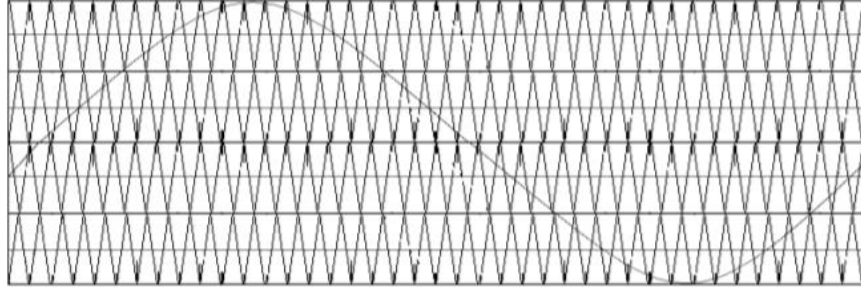
Aşağıdaki şekil 4.6’da PD, POD ve APOD PWM’in sabit anahtarlama frekansı tekniğinde taşıyıcı ve referans dalga formlarının düzenini göstermektedir [194]. Bu çalışmada PD (Düz Dizme) tekniği kullanılmıştır. Bunun nedeni en az miktarda THD üretmesi ve diğer tekniklere göre en yüksek voltaj çıkışını sağlamasıdır.



a)



b)



c)

Şekil 4.6. Alt-harmonik PWM a) PD b) POD c) APOD yöntemlerinin taşıyıcı ve referans dalga formları [192].



5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

5.1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında FACTS ve özel güç cihazlarının devre yapıları incelenmiş, sonrasında bu cihazlarda kullanılan iki seviyeli ve çok seviyeli evirici yapıları araştırılmıştır. Bu amaçla iki seviyeli evirici, diyot kenetlemeli evirici, kaskat evirici, kapasitör kenetlemeli evirici yapılarının modellenmesi MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde benzetim sonuçları gösterilmiş ve bütün detaylarıyla ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan benzetimlerde kullanılan parametreler, $M_i=1$, $f_m=50$ Hz, $f_{sw}=4$ kHz ve $V_{dc}=650$ V şeklindedir. Benzetim çalışmaları iki ana kısımdan oluşmaktadır;

Birinci kısımda SPWM ile anahtarlama yapılan eviricilerin yük kullanılmadan benzetimi gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir.

İkinci kısımda yine SPWM ile anahtarlama yapılan filtreli ve filtresiz evirici yapılarının üç fazlı asenkron motor yükü kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan benzetimlerde ilk önce iki seviyeli eviricinin, daha sonra 3 ve 5 seviyeli evirici yapıları kullanılarak diyot kenetlemeli, kaskat ve kapasitör kenetlemeli eviricinin benzetimi yapılarak incelenmiştir. Çok seviyeli eviricilerin PWM denetiminde PD modülasyonu kullanılmıştır. Bu benzetimlerde, modülasyon indeksi değiştirilen filtreli ve filtresiz eviricilerin MATLAB FFT aracı ile analizi yapılarak elde edilen THD sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sinyaller ile THD sonuçları çizelge halinde gösterilmektedir. LC filtre tasarım metodolojisi ise şu şekildedir;

Sincap kafesli asenkron motorun ihtiyaç duyduğu reaktif güç tamamen filtre kapasitörü tarafından sağlanmaktadır. Aktif güç ise sadece inverter ucu tarafından sağlanmaktadır. Filtre kapasitörünün değeri aşağıdaki Denklem (5.1) ile hesaplanmıştır [195].

$$C_f = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2 \cdot L_m} \quad (5.1)$$

Bu denklemde;

f_s = Temel frekansı,

L_m = Motorun mıknatıslanma indüktansını ifade etmektedir.

LC filtenin indüktans bileşeni ise Denklem (5.2) ile hesaplanmıştır. Burada filtre indüktör maksimum dalgalanma akımı kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. LC filtrenin indüktörünün maksimum dalgalanma akımı ise şu şekilde hesaplanır [195].

$$\Delta i_{L_f} \max = \frac{V_{dc}}{8.f_{sw}.L_f} \quad (5.2)$$

Verilen Denklem (5.2)'de;

V_{dc} = DC bara gerilimini,

f_{sw} = Eviricinin anahtarlama frekansını,

L_f = LC filtre indüktör değerini,

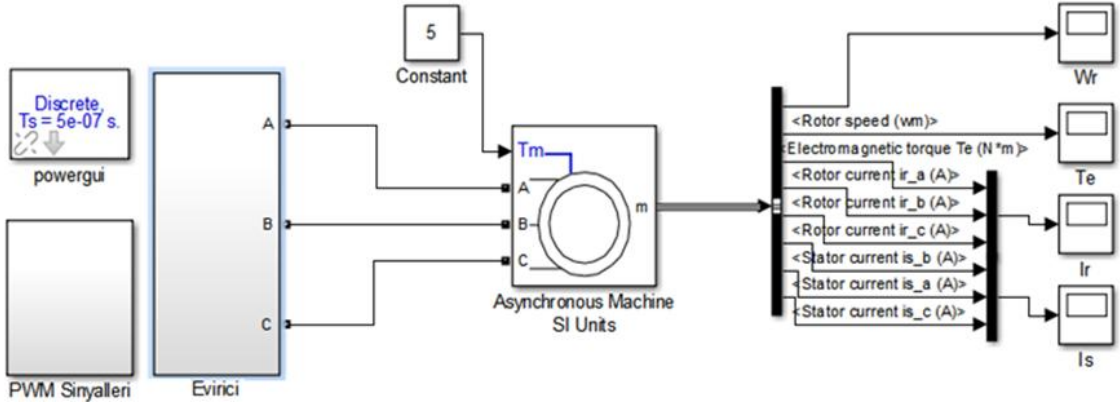
$\Delta i_{L_f} \max$ = Filtre indüktör akımının maksimum dalgalanma akımını ifade etmektedir. Burada maksimum dalgalanma akımı motor faz akımının tepe değerinin %20'si olarak alınmıştır. LC filtre hesabında L_f değeri bu şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan filtre değerleri aşağıda tabloda verildiği gibidir.

Çizelge 5.1. Benzetimde kullanılan filtre parametreleri.

V_{dc}	C_f	f_r	f_{sw}	$\Delta i_{L_f} \max$
650 V	$5,88.10^{-5}$ F	196,12 Hz	4 kHz	1,2

5.2. ÜÇ FAZLI SEVİYE SAYILARI FARKLI EVİRİCİLER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN MATLAB/SİMULİNK BENZETİMİ

Tezin bu kısmında SPWM denetimli iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli evirici ile beslenen, asenkron motorun açık çevrim kontrolünün hem filtre ile hem de filtre kullanılmadan benzetimi MATLAB/Simulink'te yapılmış ve buna ait sistem modeli Şekil 5.1'de verilmiştir. Modellemede sabit referans çatısı ile sincap kafesli 400 V gücünde üç fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Eviriciler için kullanılan anahtar ise IGBT'dir.



Şekil 5.1. Sistemin MATLAB/Simulink modeli.

Benzetim sonuçları anahtarlama frekansının 4 kHz olduğu farklı modülasyon değerleri için gerçekleştirilmiş olup, tablo halinde verilen eviricilerin benzetiminde kullanılan parametreler, asenkron motora ait parametreler, filtreye ait parametreler ile filtre hesabında kullanılan formüller aşağıda verilmektedir.

Çizelge 5.2. İki, üç ve beş seviyeli eviricilerin benzetiminde kullanılan parametreler.

Vdc	f	R	Lf	Cf	Mi
650 V	50 Hz	0,001Ω	0,0120 H	5,88.e ⁻⁵ F	0,6-1

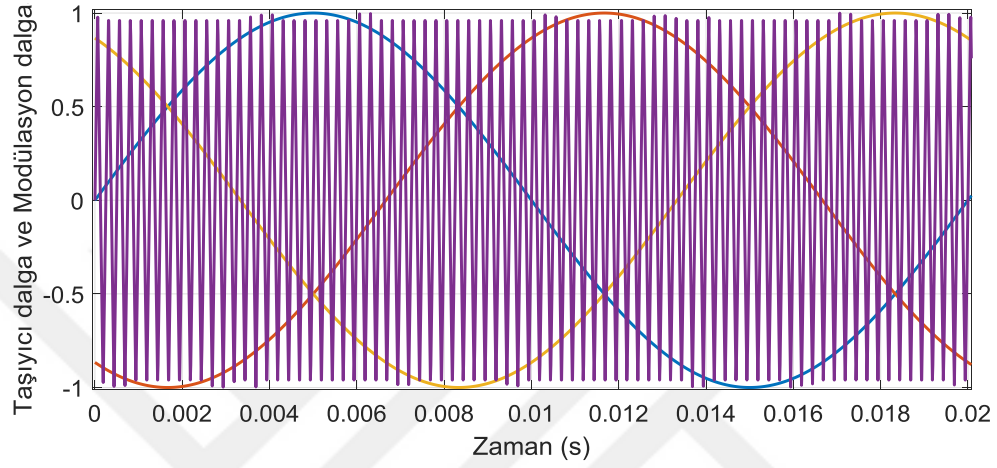
Çizelge 5.3. Benzetimde kullanılan asenkron motor parametreleri.

Güç	Gerilim	Frekans	Anma hızı
4 kW	400V	50 Hz	1450 RPM

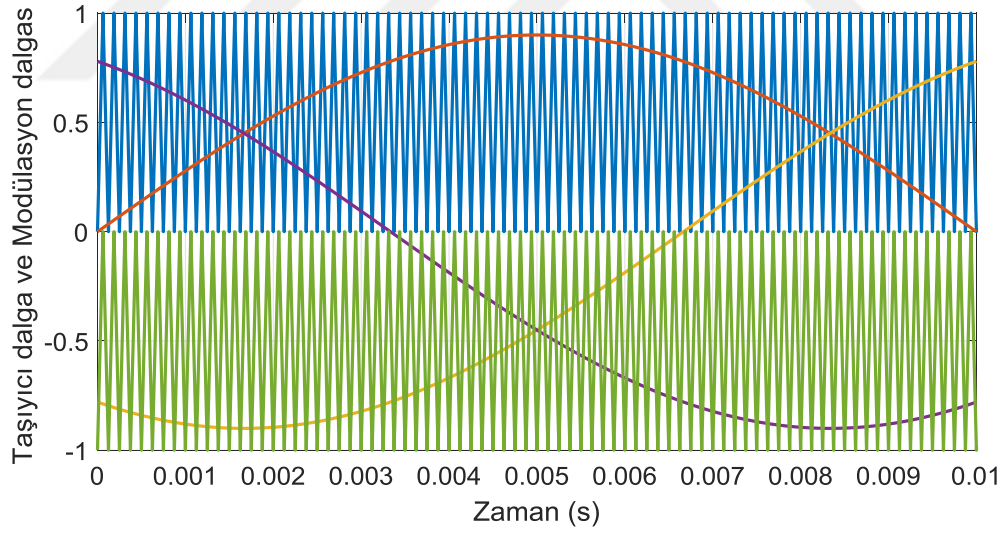
Ancak evirici çıkışına bağlanan filtre devresindeki endüktans değerinin büyük olması ve sinyallerin dengeye ulaşmasını geciktirmesi nedeniyle motorun çalışmasını yavaşlattığı gözlemlenmiştir. İndüktansın düşürülmesi gerilimi azaltmakta ve harmoniği artırmaktadır. Bu nedenle sistem davranışını önemli ölçüde etkileyen filtre devresi için önce filtre hesabı yapılmıştır. Bunun için önce $C_f=5,88.10^{-5}$ F ve $f_r \cong 196$ Hz olarak belirlenmiş, ardından L_f değeri hesaplanmıştır. Daha sonra deneme yanılma yoluyla en iyi sonuç elde edilmiştir. Yapılan hesaplama ile bulunan sonuç $L_f=0,0169$ H olmasına

karşılık, bu değer deneme yanılmaya yoluyla simülasyonun daha hızlı cevap vermesi ve gerçek sistem değerlerine yaklaşılması için $L_f=0,0120$ H'ye düşürülmüştür. Böylece harmoniğin azalması ve cevap süresinin daha hızlı olması sağlanmıştır.

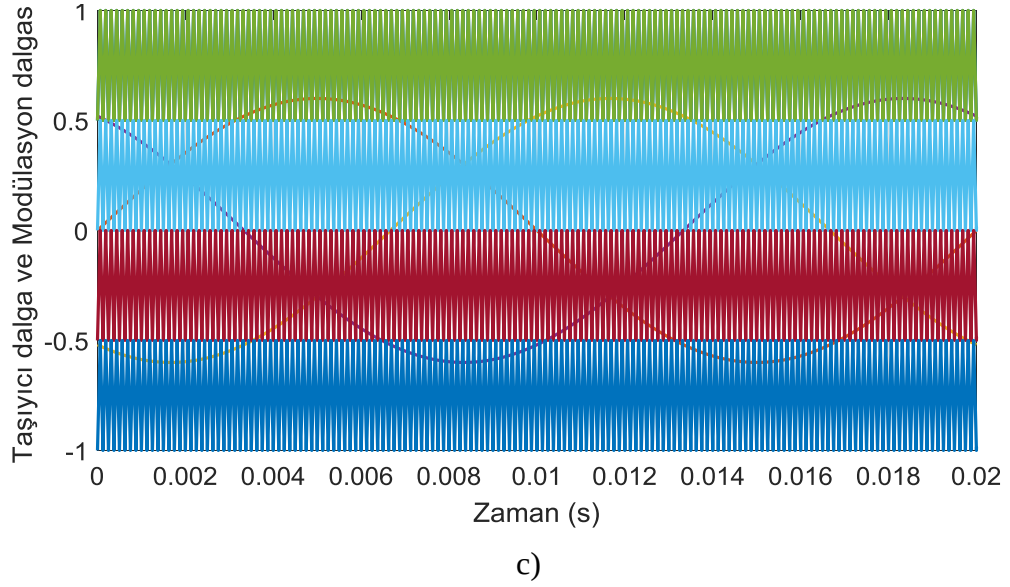
Eviricilerin anahtarlama için gerekli SPWM işaretlerini üretmek amacıyla, referans üç faz sinüs dalgaları ile bir adet taşıyıcı üçgen dalga kullanılmıştır. Şekil 5.2'de referans üç faz sinüzoidal sinyaller ile taşıyıcı üçgen sinyallerin karşılaştırılması verilmiştir.



a)



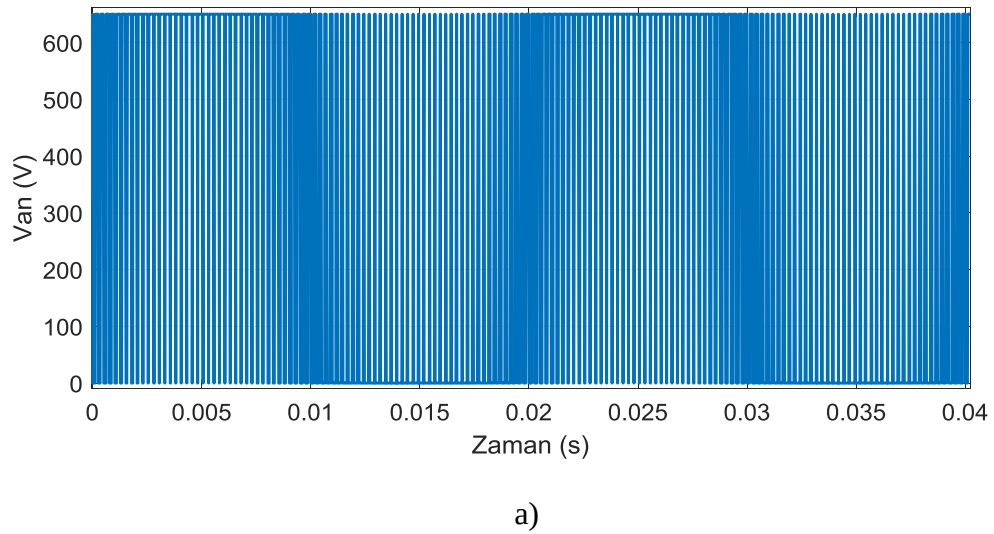
b)

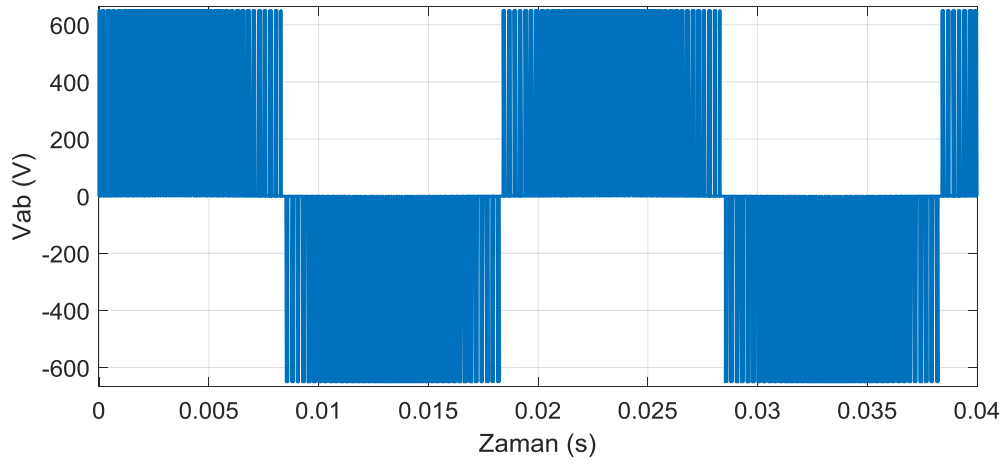


Şekil 5.2. PD modülasyonu ile anahtarlanan üç fazlı eviriciye ilişkin referans ve taşıyıcı sinyal şekilleri a) iki seviyeli b) üç seviyeli c) beş seviyeli.

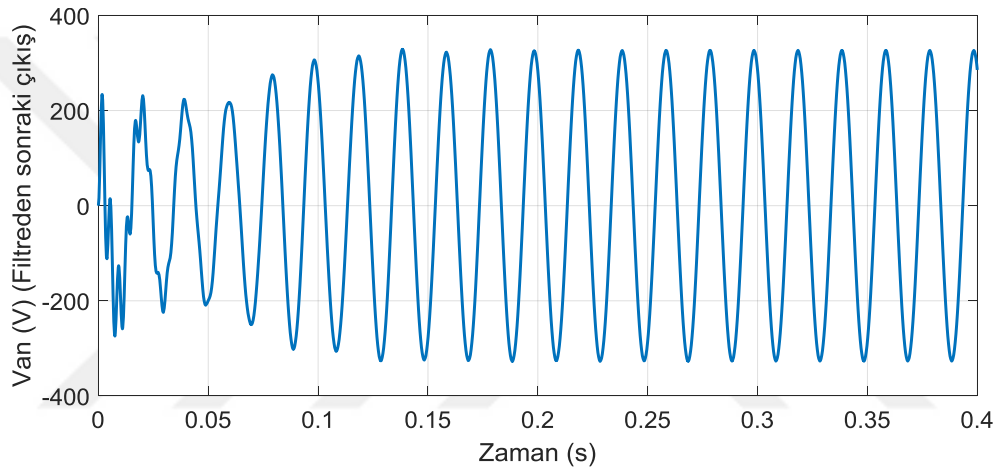
Bu karşılaştırmadan elde edilen SPWM işaretleri ile anahtarlanan üç fazlı iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli eviricilerin faz-nötr ve faz-faz gerilim dalga şekilleri, faz-faz çıkış gerilim ve faz-nötr çıkış gerilim dalga şekilleri elde edilmiştir. Daha sonra ise filtre kullanılarak ve filtre kullanılmadan oluşturulan SPWM beslemeli eviricili asenkron motor sürücünün dalga şekilleri gösterilmiştir.

5.2.1. İki Seviyeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

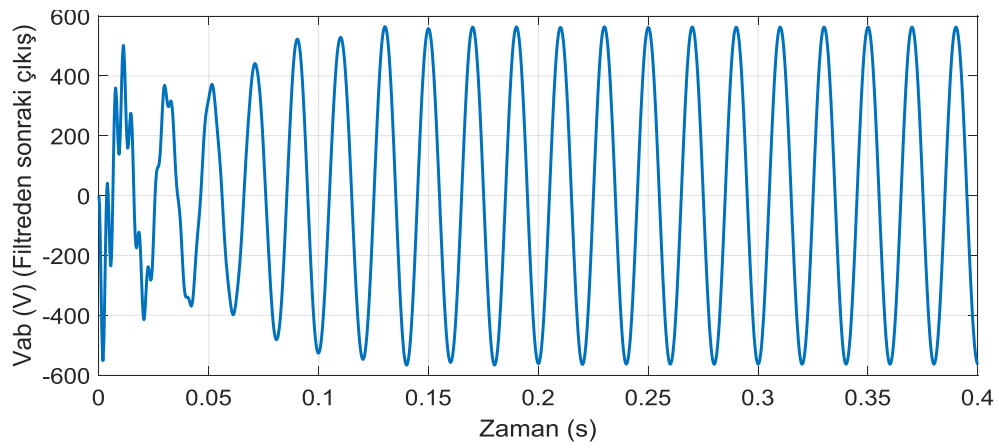




b)

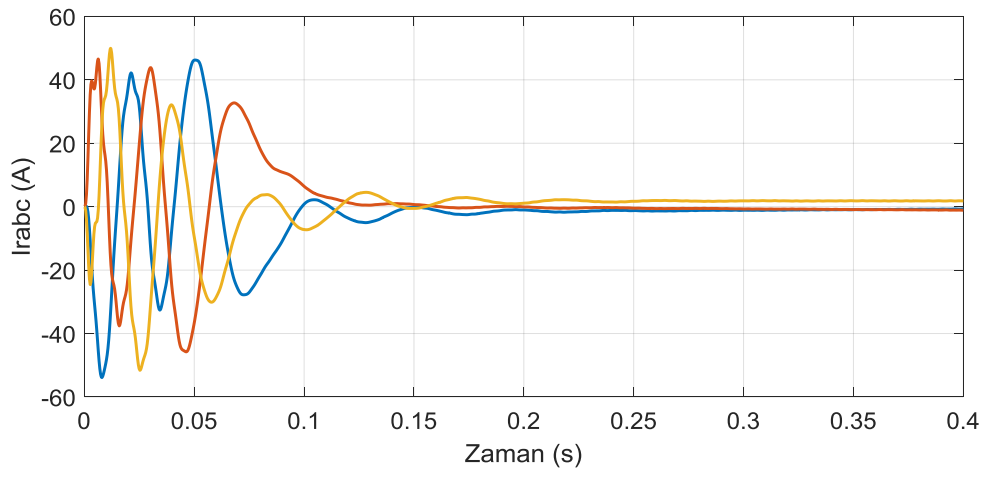


c)

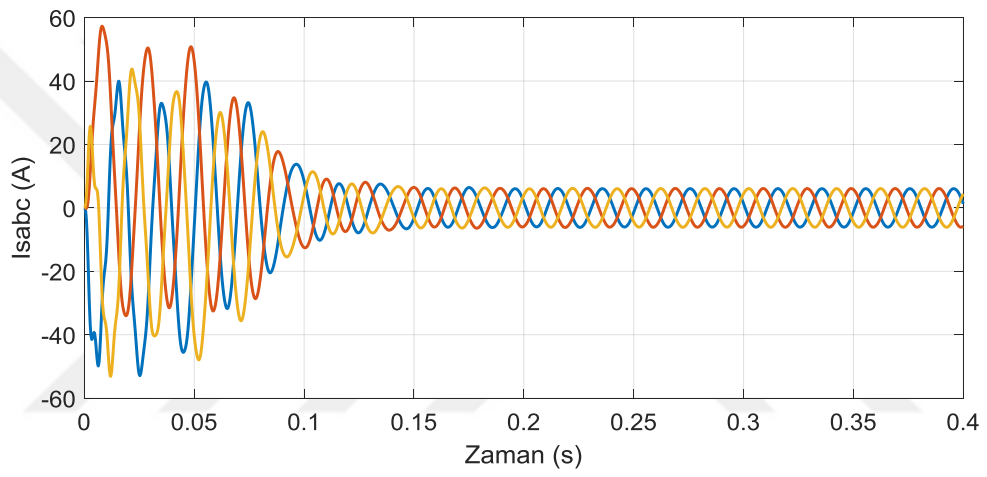


d)

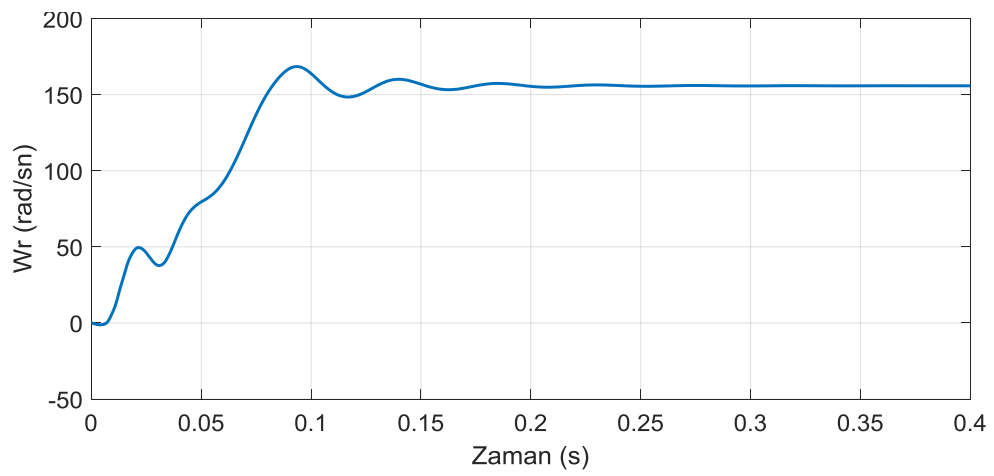
Şekil 5.3. SPWM denetimli iki seviyeli filtreli eviriciye ilişkin $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.



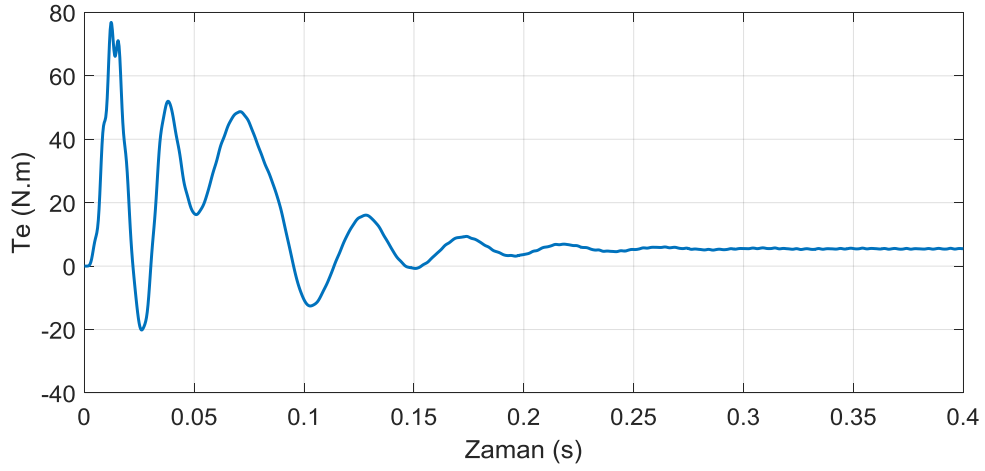
a)



b)



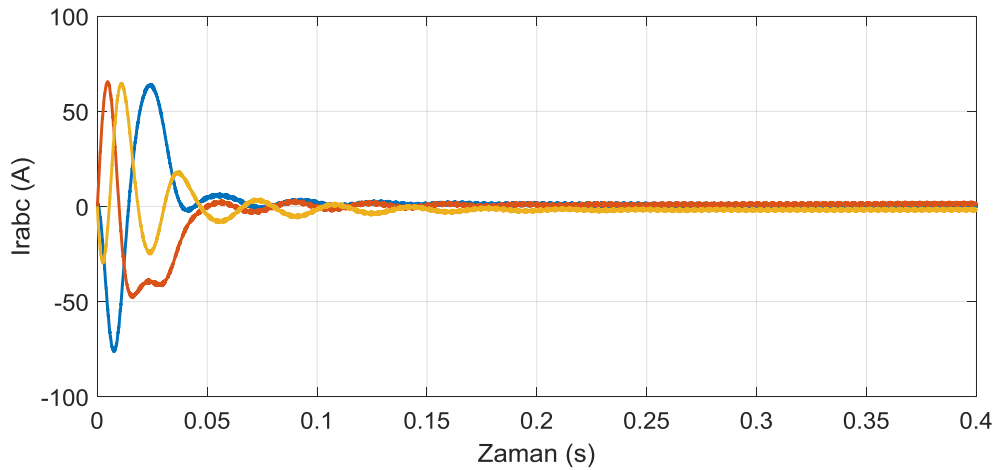
c)



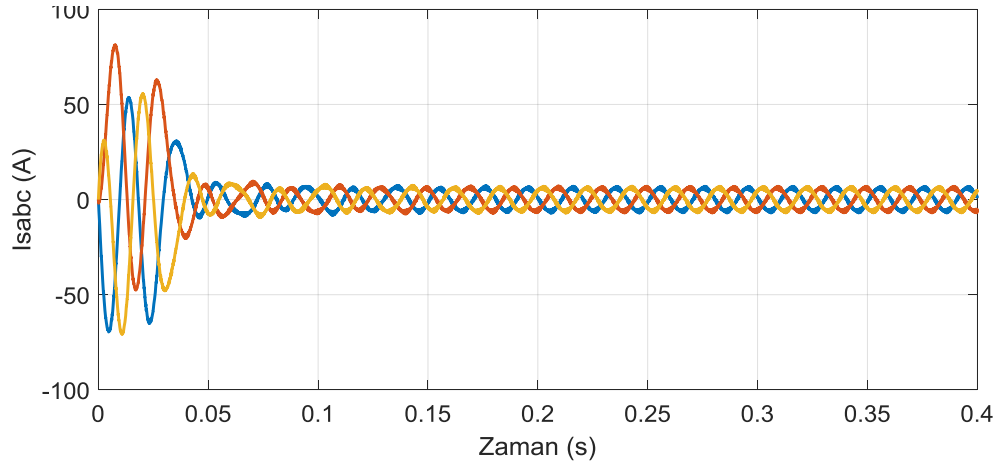
d)

Şekil 5.4. SPWM denetimli iki seviyeli filtreli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

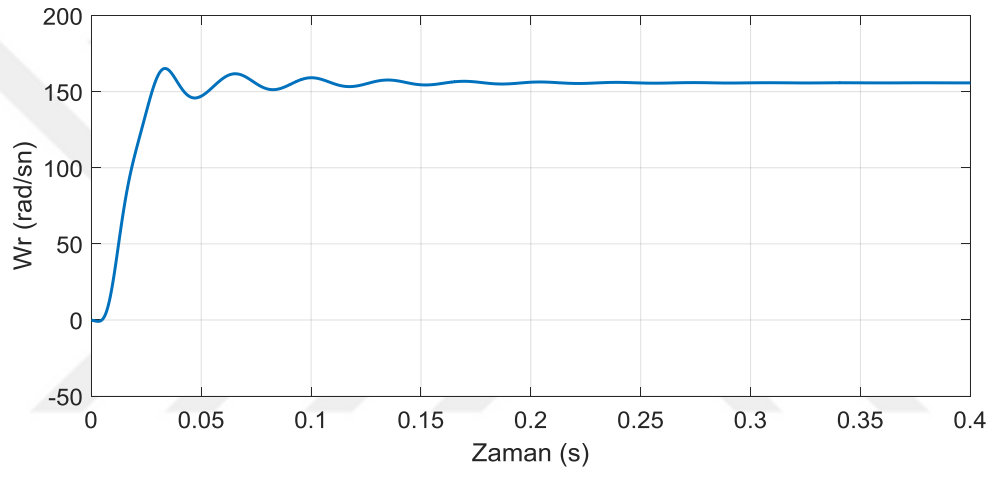
Şekil 5.3 a)'da iki seviyeli eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.3 b)'de iki seviyeli eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.3 c), d)'de ise iki seviyeli filtreli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi filtre kullanıldığında evirici çıkışı dalga şekli sinüzoidal olmaktadır. Şekil 5.4 a)'da asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.4 b)'de asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.4 c), d)'de ise sırasıyla asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir. Şekil 5.5 a)'da iki seviyeli filtresiz evirici için asenkron motor rotor akımları verilmiştir.



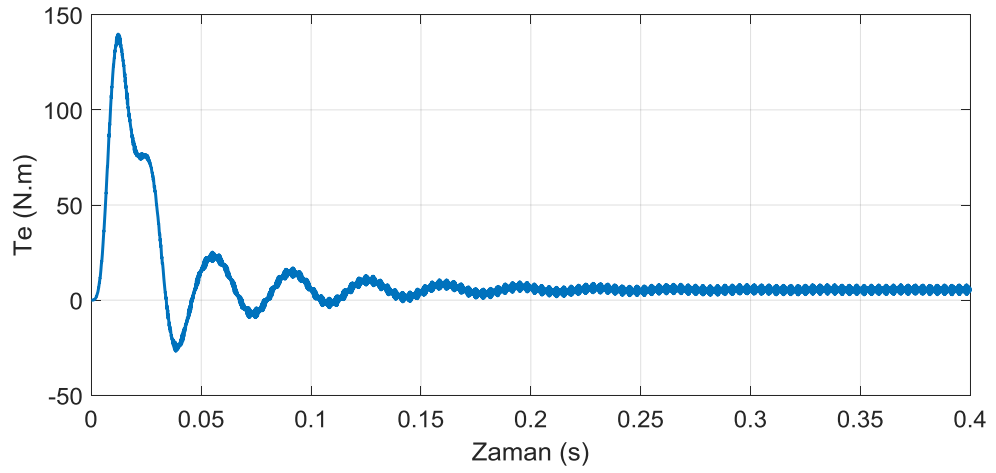
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.5. SPWM denetimli iki seviyeli filtresiz evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.5 b)'de iki seviyeli filtresiz evirici için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.5 c) ve d)'de sırasıyla iki seviyeli filtresiz evirici için asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.3 ve 5.4'de SPWM yöntemi ile anahtarlanan filtreli ve filtresiz üç faz iki seviyeli eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça genel olarak stator akım harmonikleri azalmaktadır. Eviricinin çıkış faz gerilimi ile fazlar arası çıkış gerilim harmonikleri modülasyon indeksi arttıkça benzer olarak azalmıştır. İki seviyeli filtresiz eviricide ise eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilim harmonikleri modülasyon indeksi arttıkça azalma göstermiştir. İki seviyeli filtresiz eviricinin stator akım harmonikleri ise modülasyon indeksi arttıkça fazla bir değişme göstermemiştir.

Çizelge 5.3. Filtreli üç faz iki seviyeli eviricinin THD değerleri.

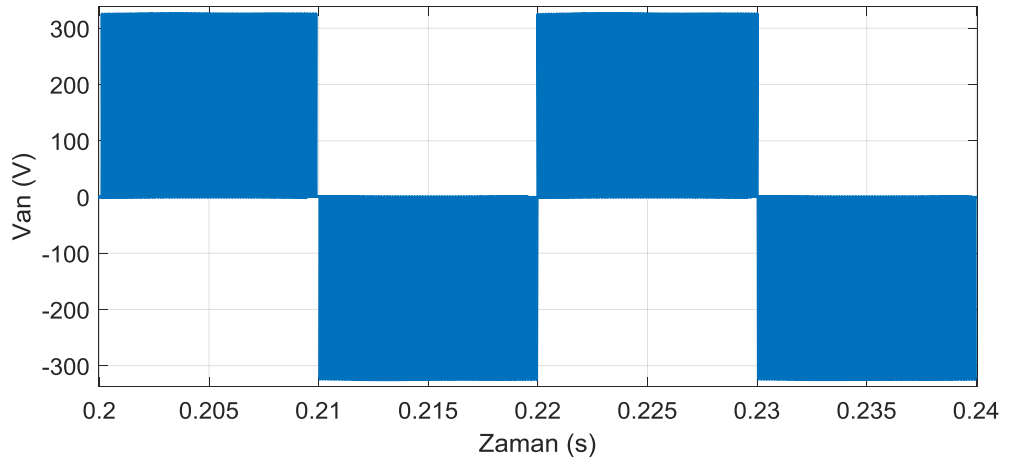
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.46	0.28	0.37	0.78	1.48
Vab	0.22	0.16	0.16	0.32	0.33
Van	0.24	0.17	0.16	0.32	0.25

Çizelge 5.4. Filtresiz üç faz iki seviyeli eviricinin THD değerleri.

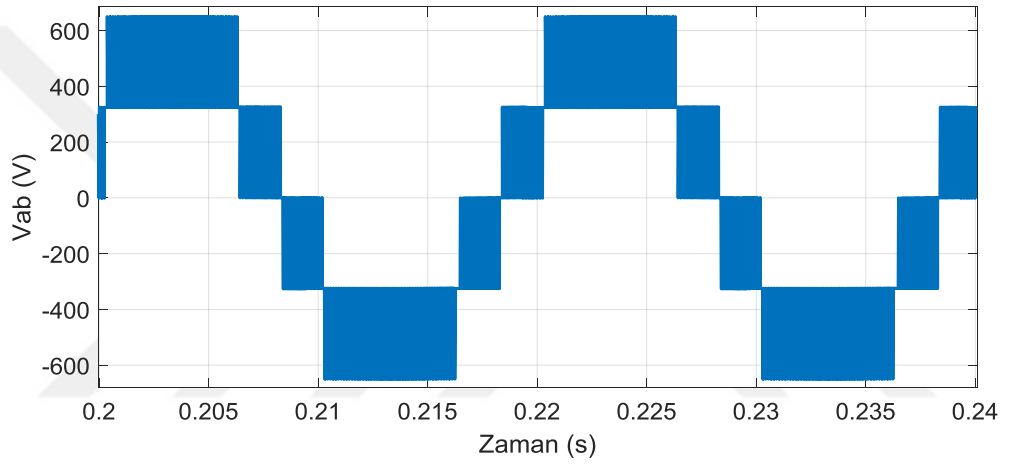
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	8.92	8.77	8.72	8.60	8.19
Vab	68.60	79.61	91.57	104.85	120.48
Van	99.98	121.30	145.95	175.37	213.54

5.2.2. Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

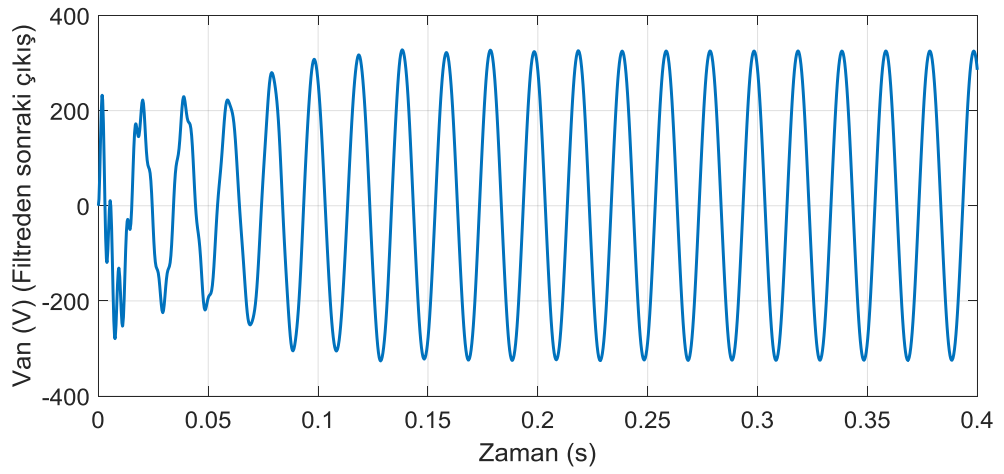
Şekil 5.6 a)'da üç seviyeli DKE eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.6 b)'de üç seviyeli DKE eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.6 c), d)'de ise üç seviyeli DKE filtreli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi fazlar arası çıkış gerilimi üç seviyelidir.



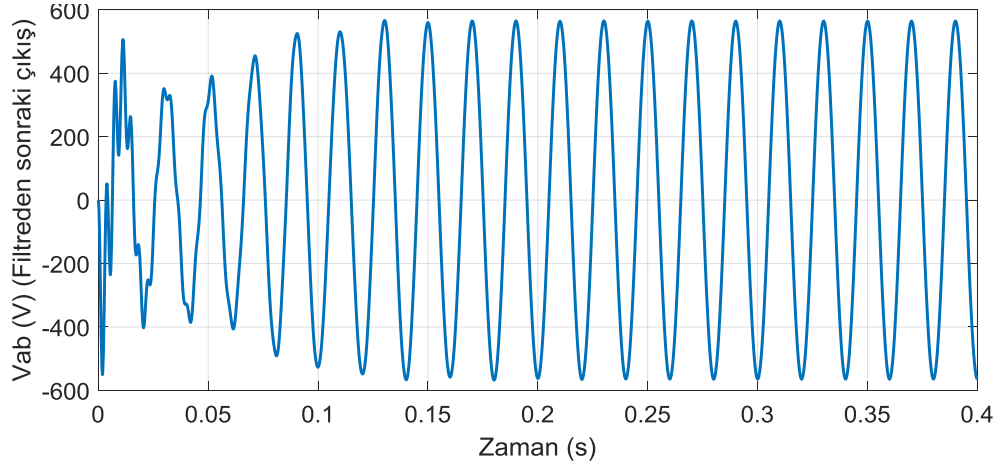
a)



b)



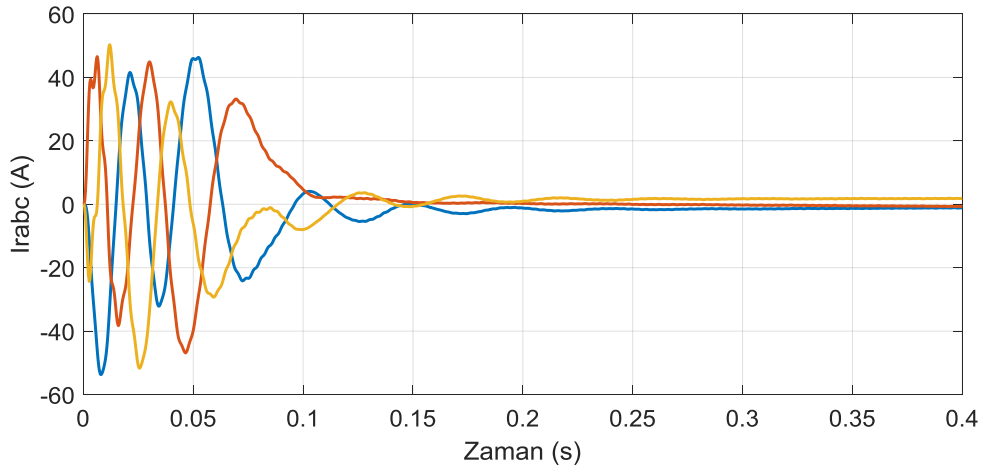
c)



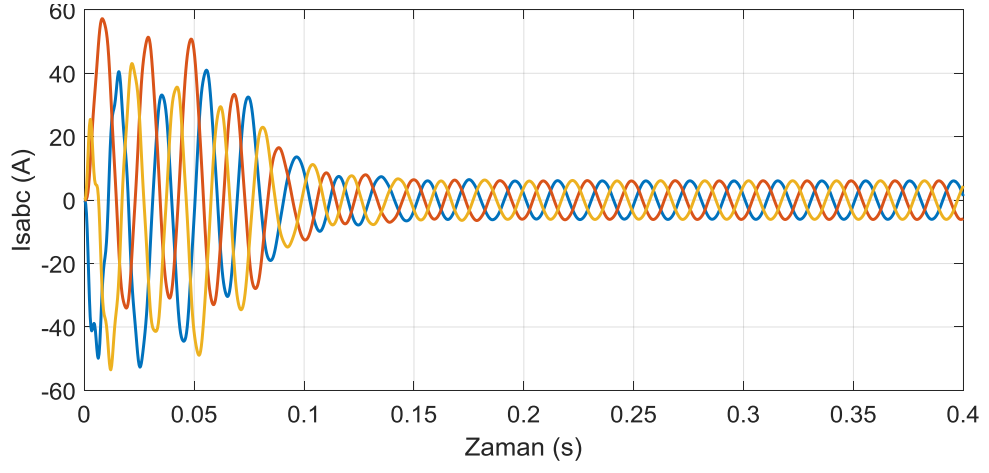
d)

Şekil 5.6. SPWM denetimli üç seviyeli filtreli diyot kenetlemeli eviriciye ilişkin $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.

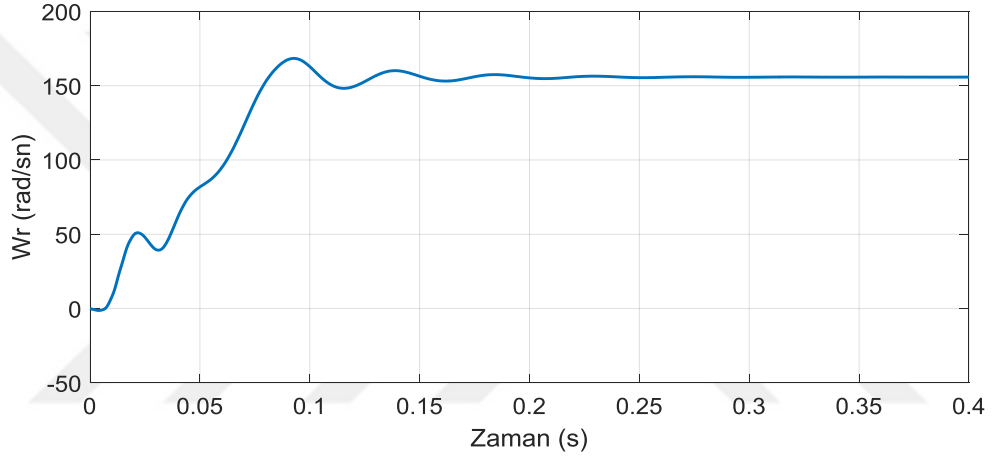
Şekil 5.7 a)'da üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.7 b)'de üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. İki seviyeli eviriciye nazaran stator ve rotor akımlarının daha düzgün olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.7 c), d)'de ise sırasıyla asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir.



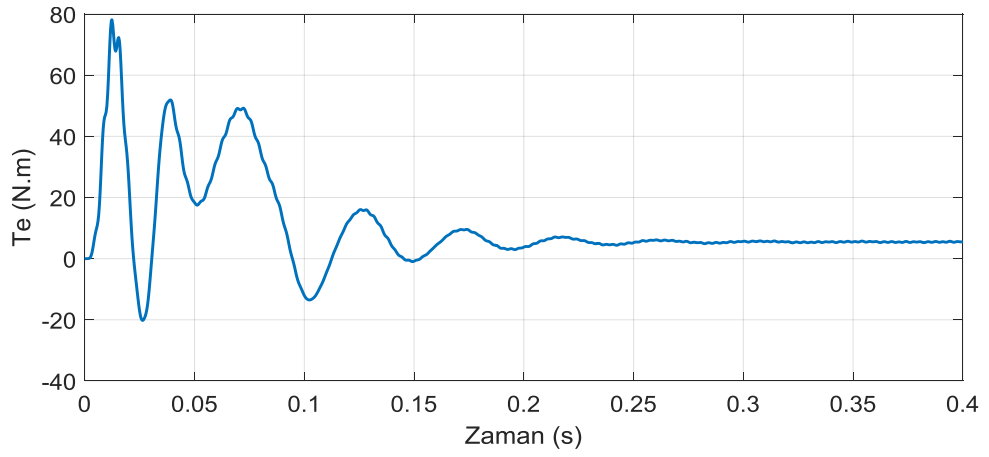
a)



b)

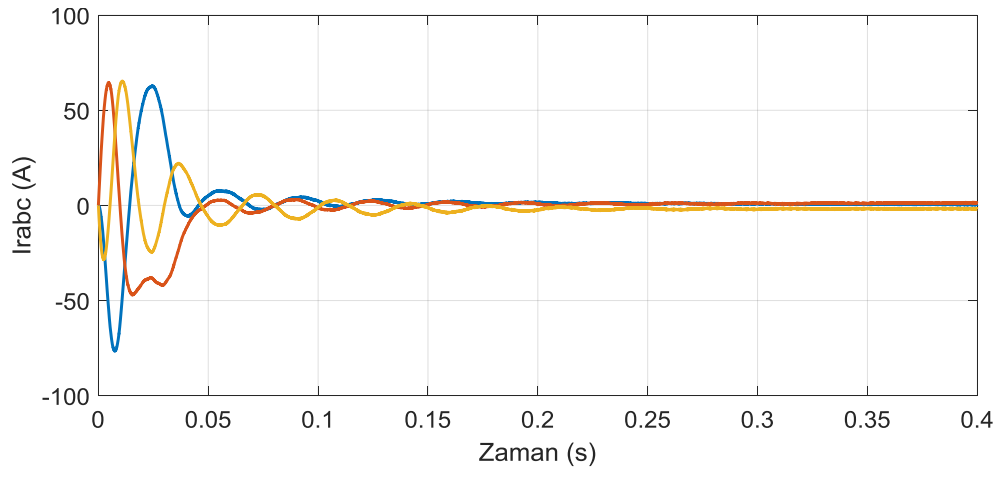


c)

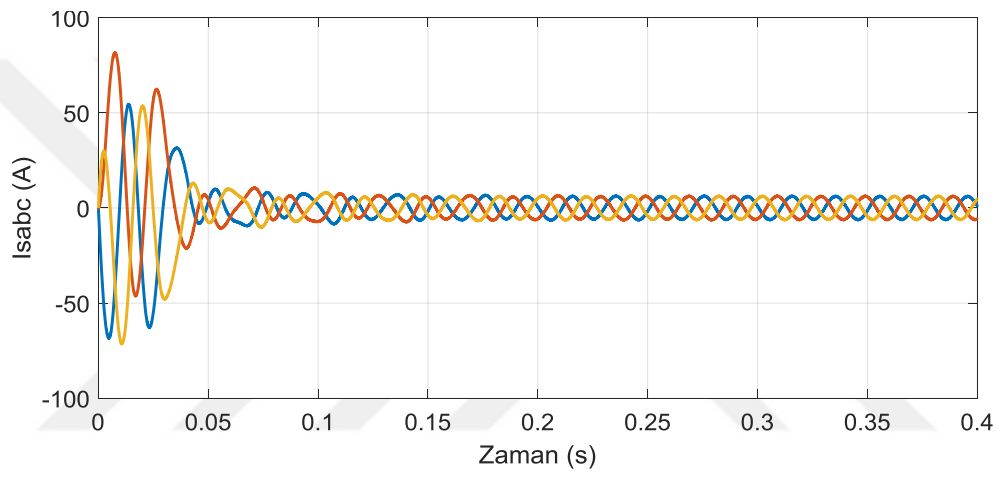


d)

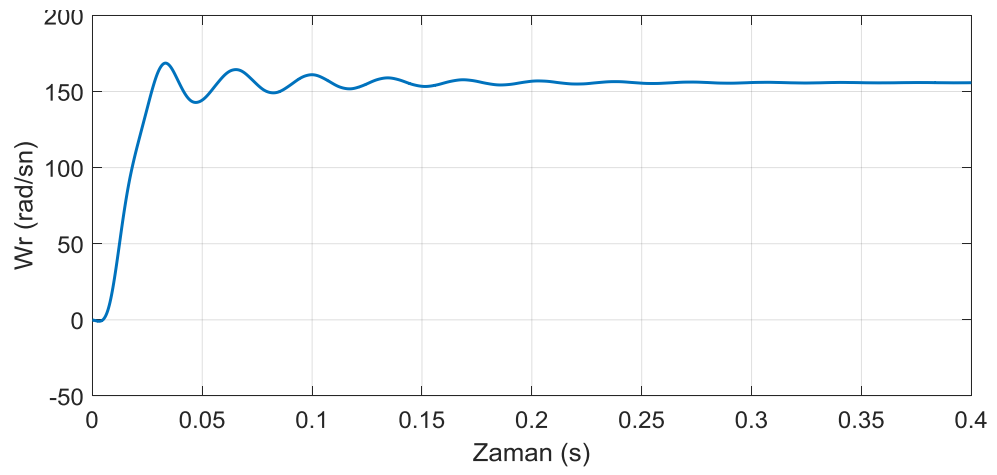
Şekil 5.7. SPWM denetimli üç seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açışal hız d) tork dalga şekilleri.



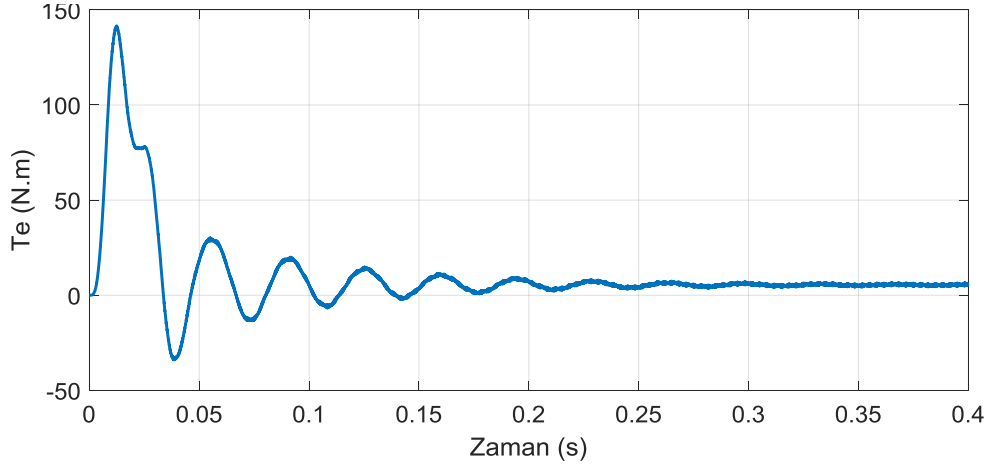
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.8.SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.8 b)'de üç seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.5 c) ve d)'de sırasıyla üç eviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici için asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.5 ve 5.6'da SPWM yöntemi ile denetlenen filtreli ve filtresiz üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli ve filtresiz eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça asenkron motorun stator akım harmoniklerinde azalma olmaktadır.

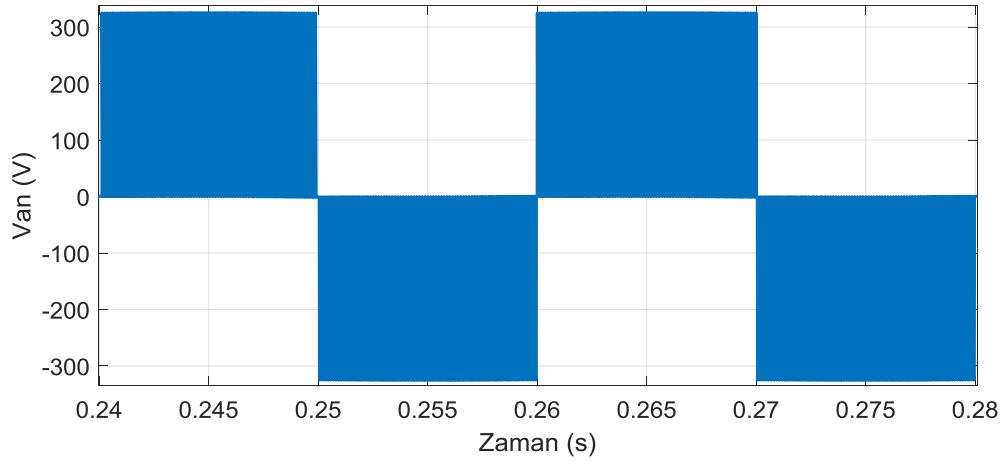
Çizelge 5.5. Filtreli üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.73	0.81	0.99	0.54	1.84
Vab	0.31	0.23	0.38	0.24	0.55
Van	0.31	0.22	0.40	0.26	0.47

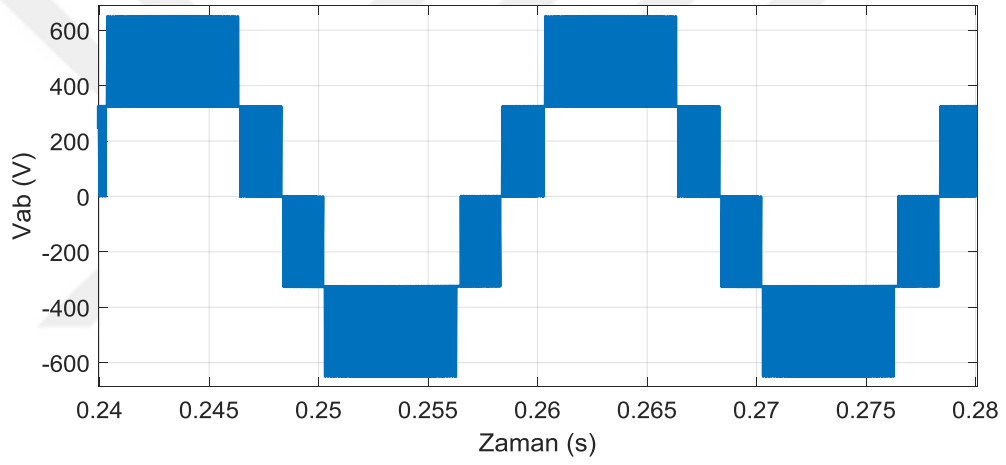
Çizelge 5.6. Filtresiz üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	2.23	2.08	2.01	2.06	2.35
Vab	35.12	39.08	42.03	44.37	49.39
Van	51.99	64.22	76.86	90.46	106.15

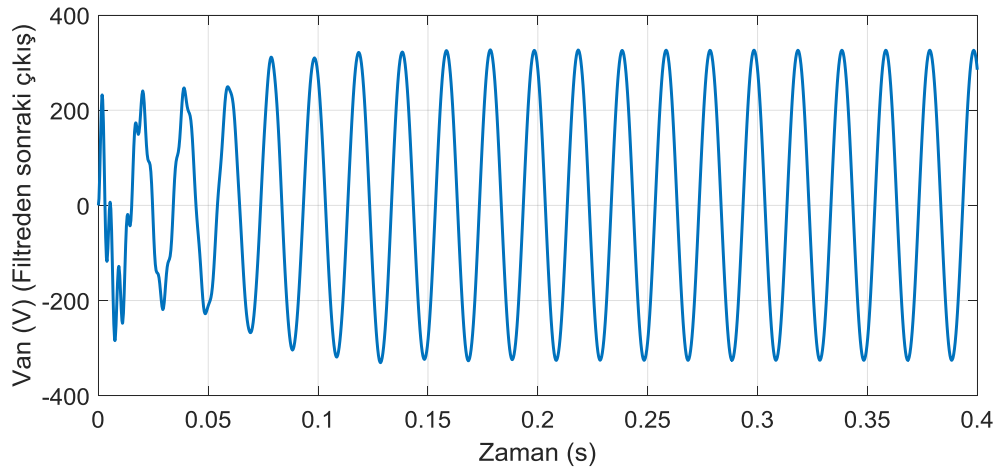
5.2.3. Üç Seviyeli Kapasitör Kenetlemeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi



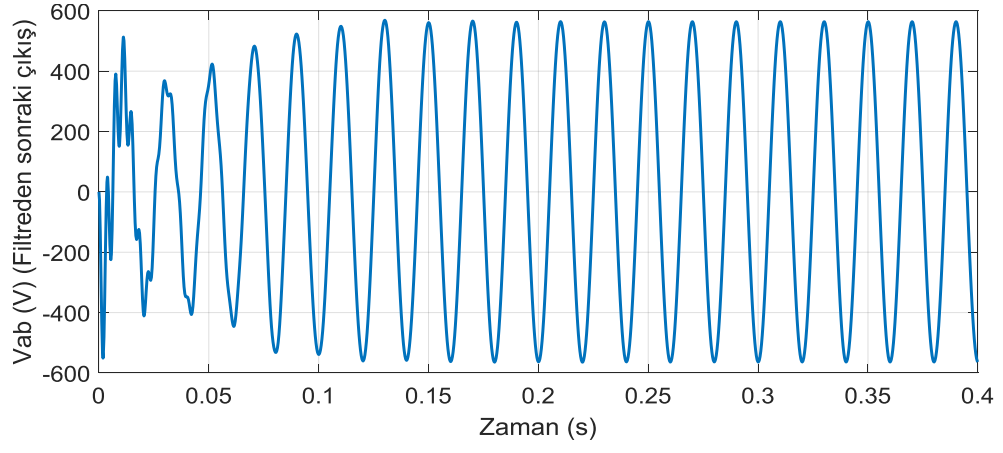
a)



b)

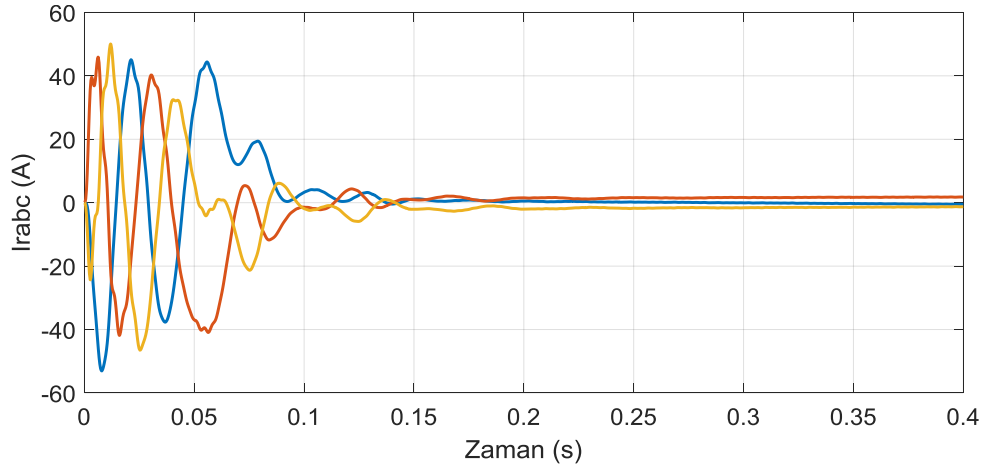


c)

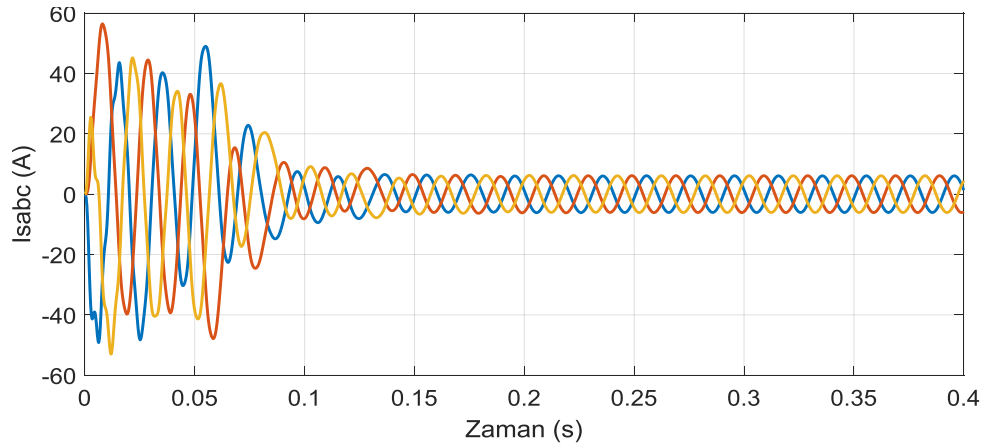


d)

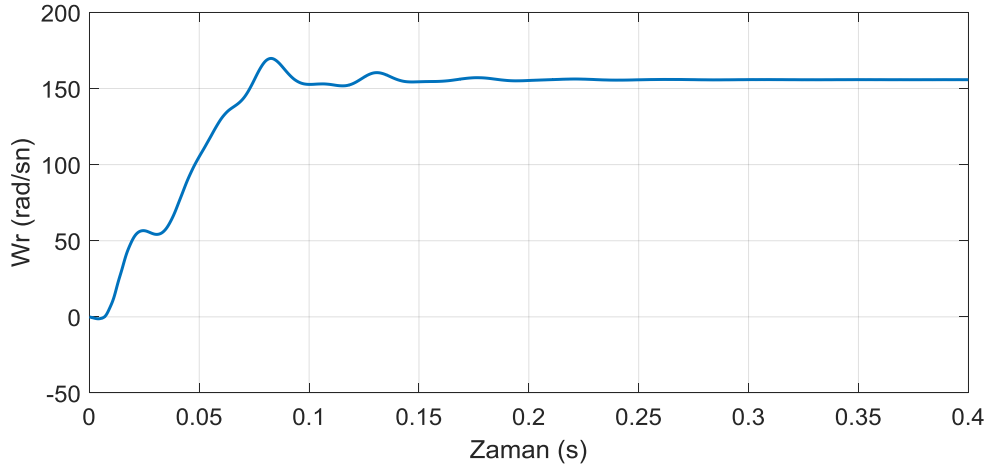
Şekil 5.9. SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli eviriciye ilişkin $M_1=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.



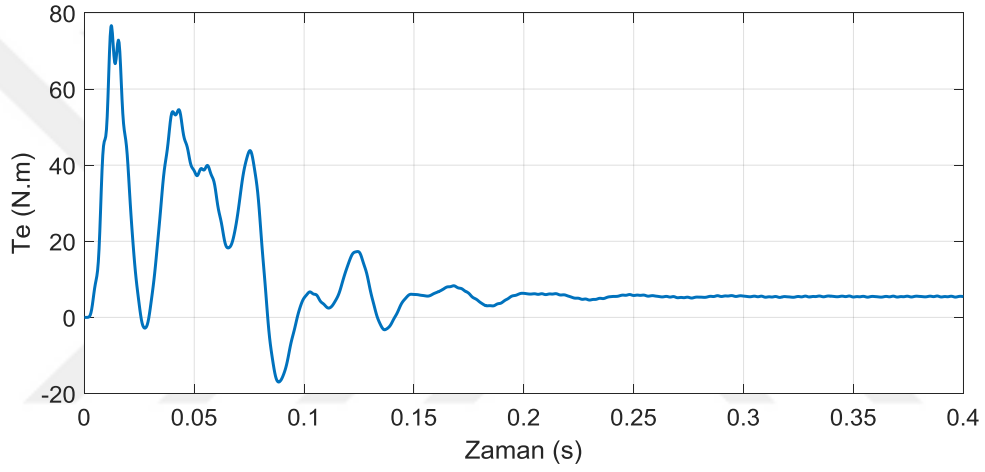
a)



b)



c)

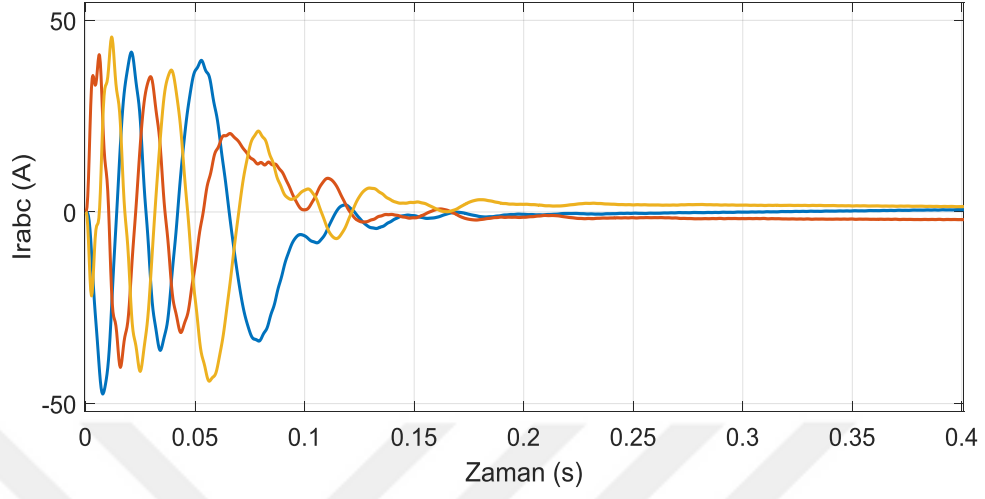


d)

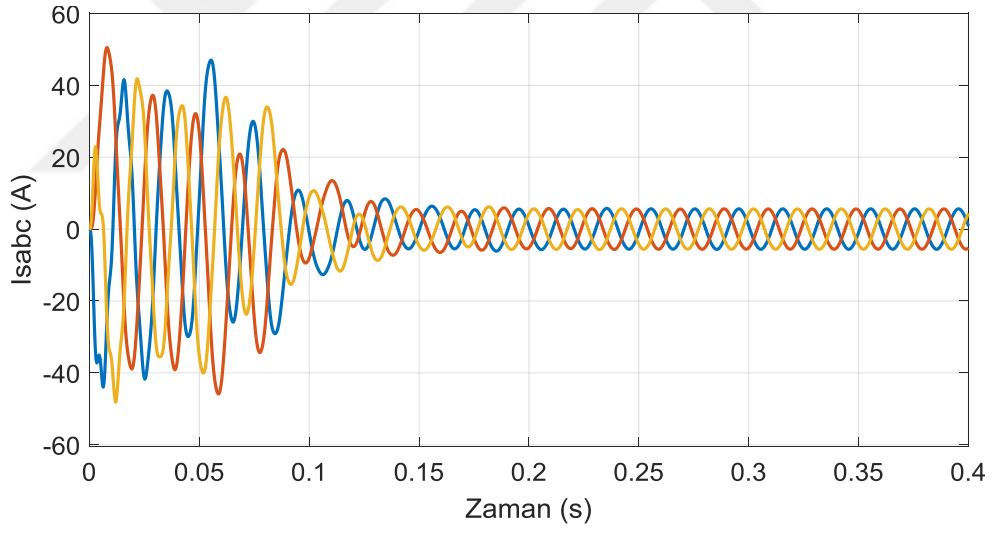
Şekil 5.10.SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.9 a)'da üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.9 b)'de üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.9 c), d)'de ise üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi filtre kullanılarak evirici çıkışı dalga şeklinin sinüzoidal olması sağlanmaktadır. Şekil 5.10 a)'da üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.10 b)'de üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.10 c), d)'de ise sırasıyla üç seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli

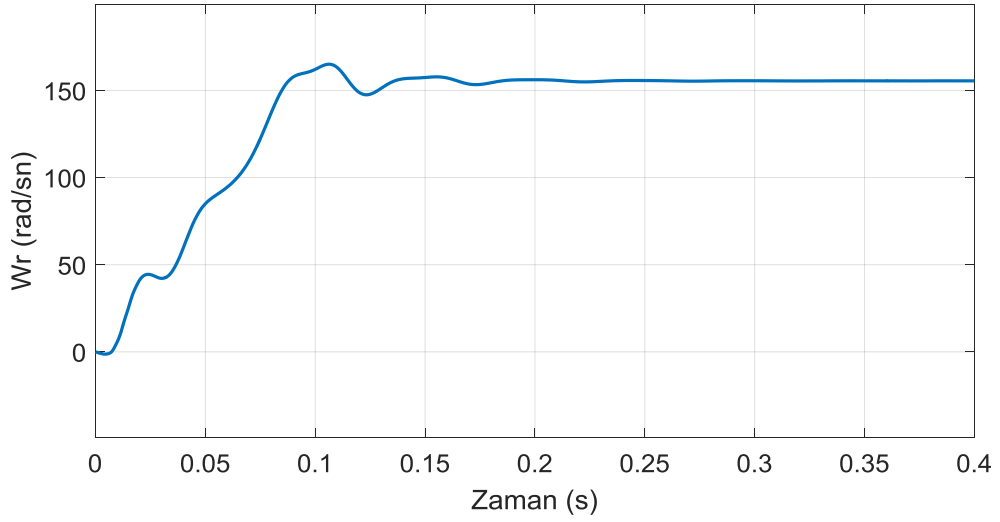
evirici kullanan asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir. Şekil 5.11 a)'da üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici için asenkron motor rotor akımları verilmiştir.



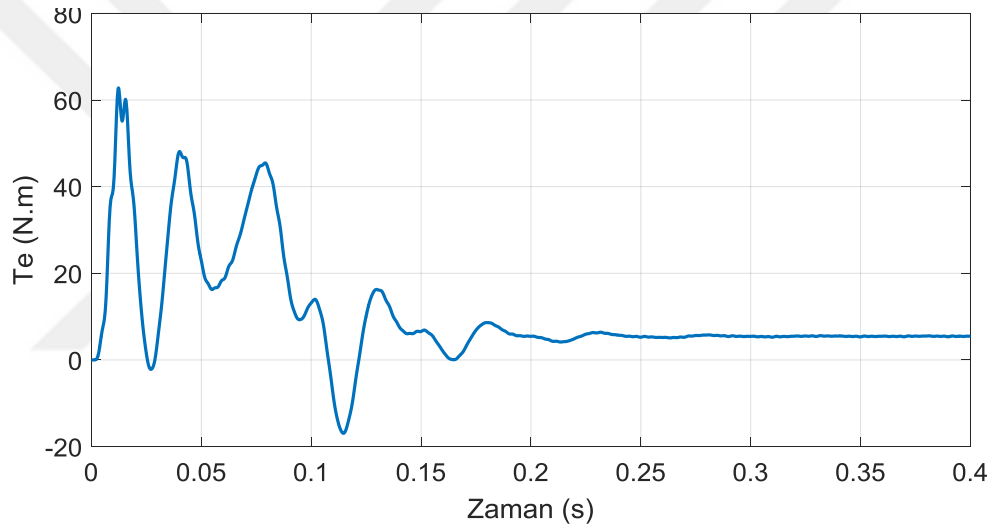
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.11. SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.11 b)'de üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.11 c) ve d)'de sırasıyla üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici için asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.7 ve 5.8'de SPWM yöntemi ile anahtarlanan filtreli ve filtresiz üç faz üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça genel olarak stator akım harmonikleri

azalmaktadır. Eviricinin çıkış faz gerilimi ile fazlar arası çıkış gerilim harmonikleri modülasyon indeksi arttıkça benzer olarak azalmıştır. Üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli eviricide ise eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilim harmonikleri modülasyon indeksi arttıkça azalma göstermiştir. Üç seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli eviricinin stator akım harmonikleri ise modülasyon indeksi arttıkça bir artış göstermiştir.

Çizelge 5.7. Filtreli üç faz üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

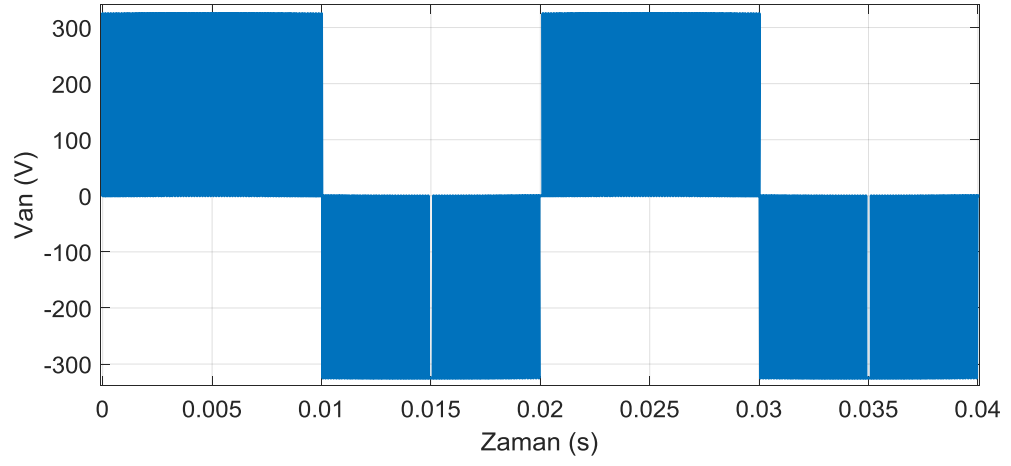
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.29	0.52	0.42	0.44	1.00
Vab	0.14	0.13	0.17	0.15	0.35
Van	0.19	0.11	0.20	0.17	0.26

Çizelge 5.8. Filtresiz üç faz üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

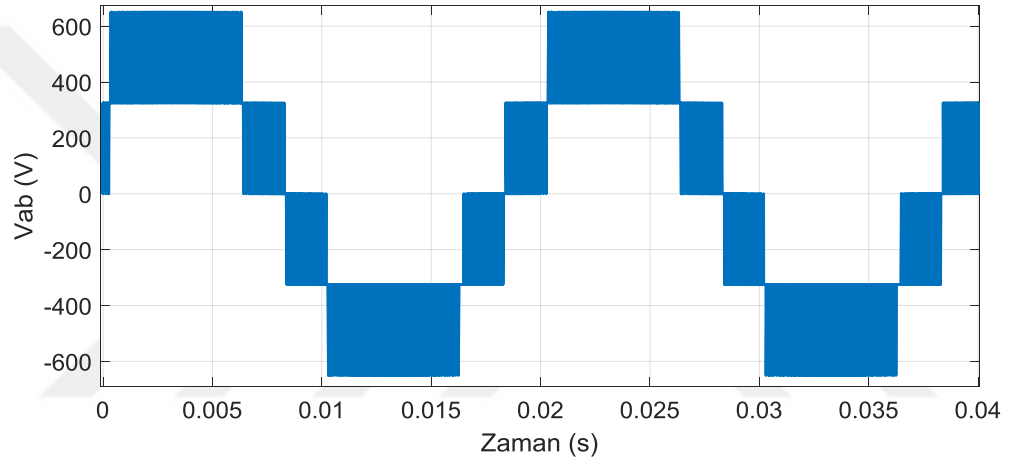
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	40.96	26.33	18.24	11.22	16.90
Vab	34.81	38.60	41.35	43.46	48.14
Van	51.56	63.45	75.68	88.67	103.49

5.2.4. Üç Seviyeli Kaskat Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

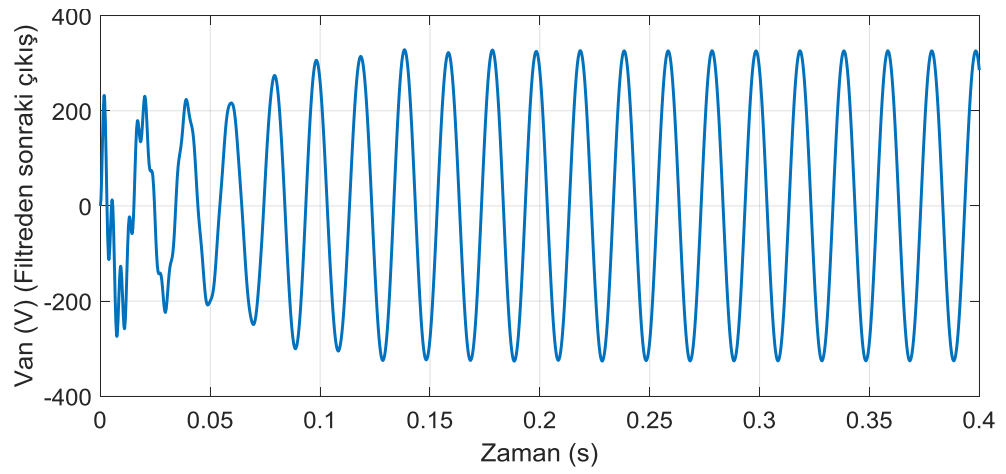
Şekil 5.12 a)'da üç seviyeli KE eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.12 b)'de üç seviyeli KE eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.12 c), d)'de ise üç seviyeli DKE filtreli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Dalga şekillerinden fazlar arası çıkış geriliminin üç seviyeli olduğu görülmektedir.



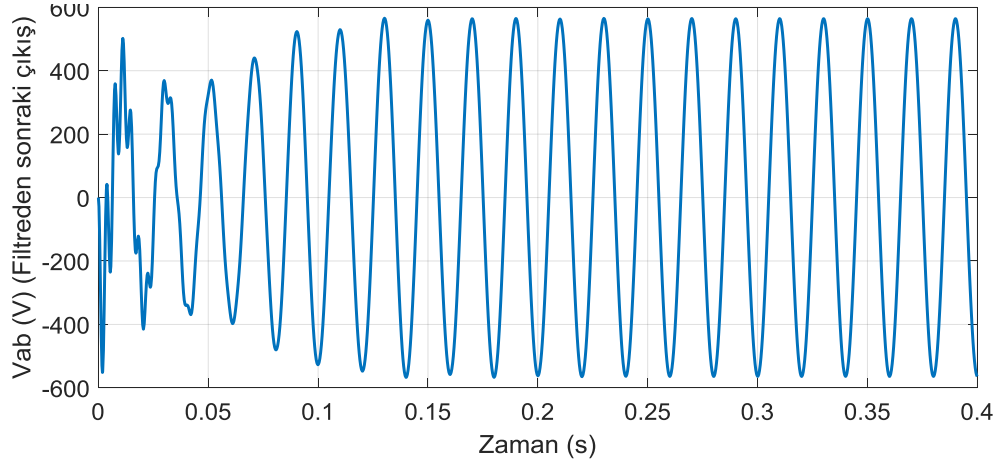
a)



b)



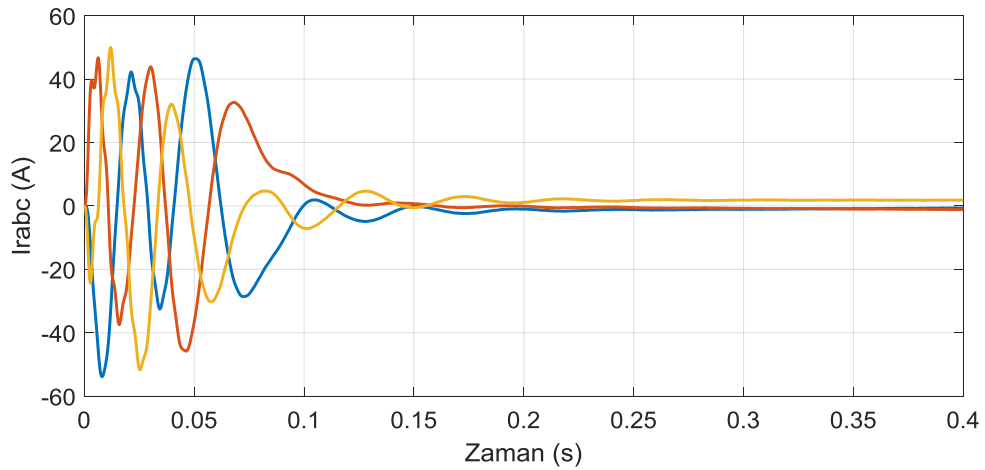
c)



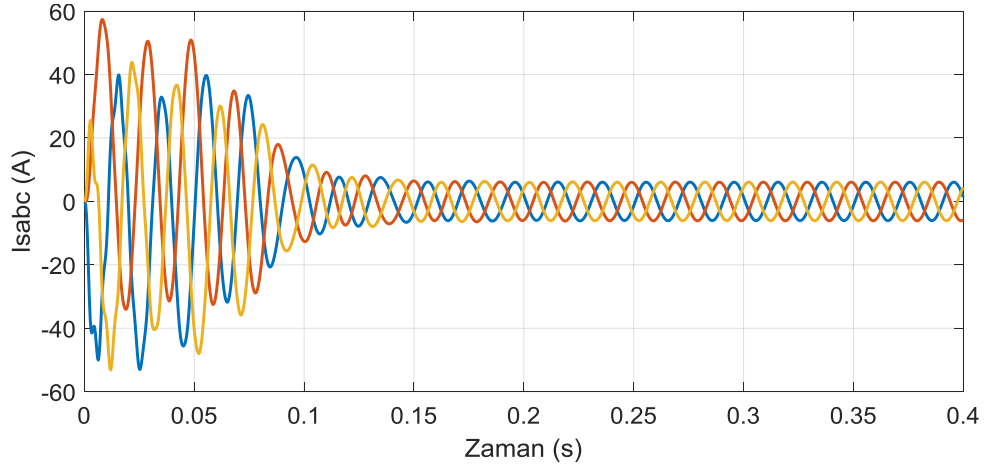
d)

Şekil 5.12. SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kaskat eviriciye ilişkin $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.

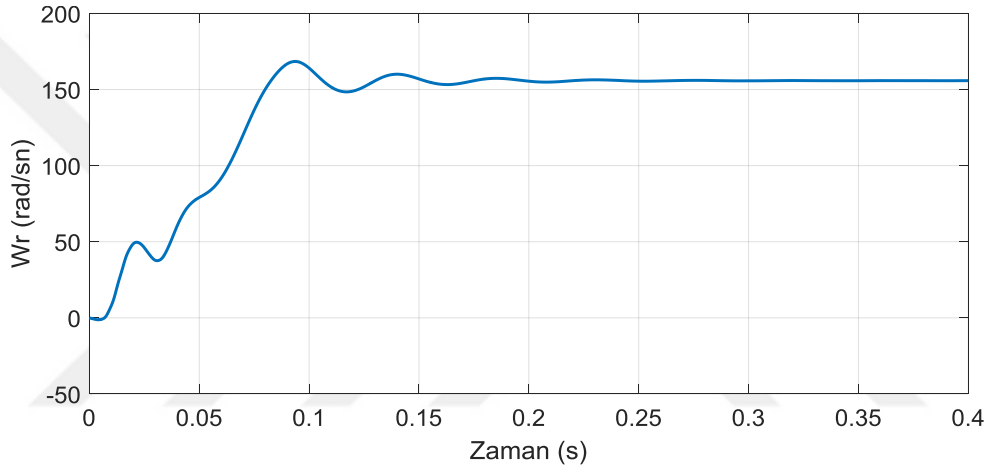
Şekil 5.13 a)'da üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.13 b)'de üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. İki seviyeli eviriciye ve üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviriciye göre stator ve rotor akımlarının daha düzgün olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.13 c), d)'de ise sırasıyla üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir.



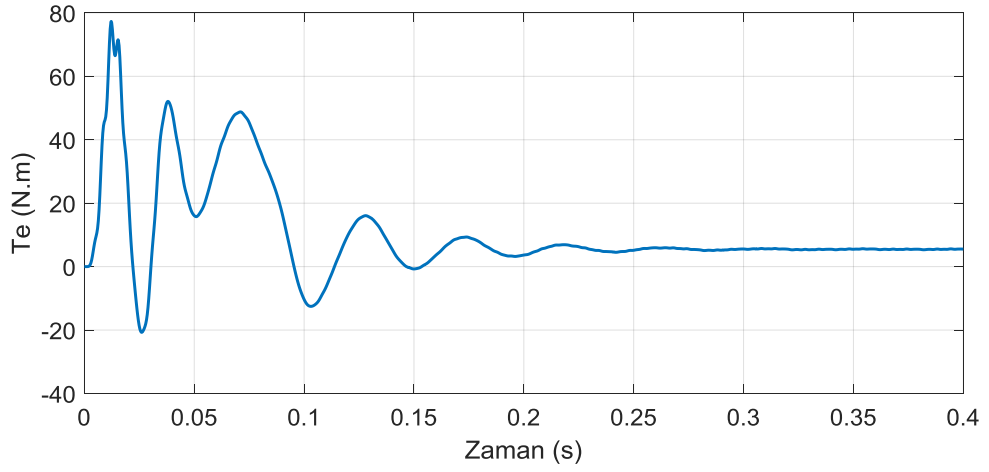
a)



b)

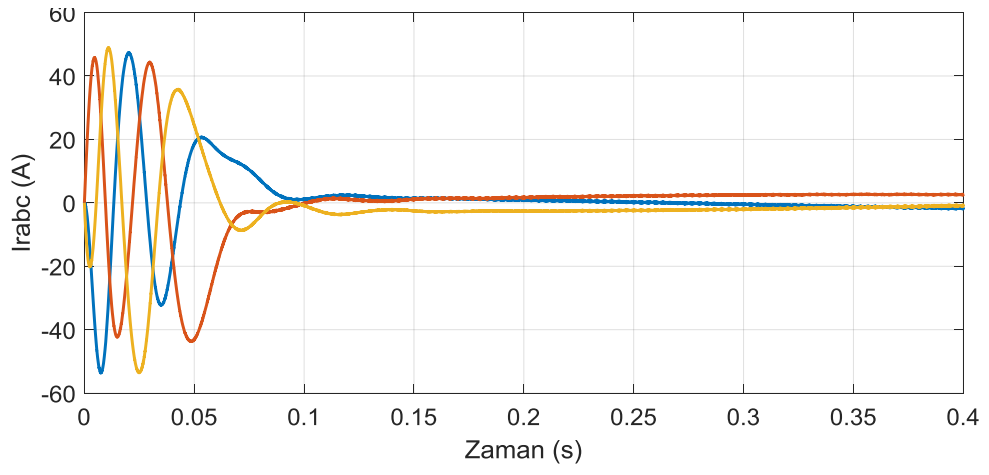


c)

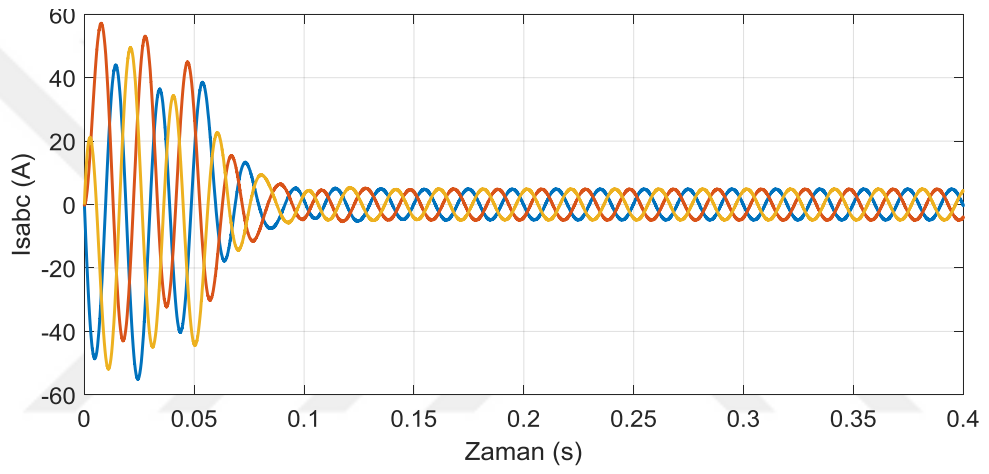


d)

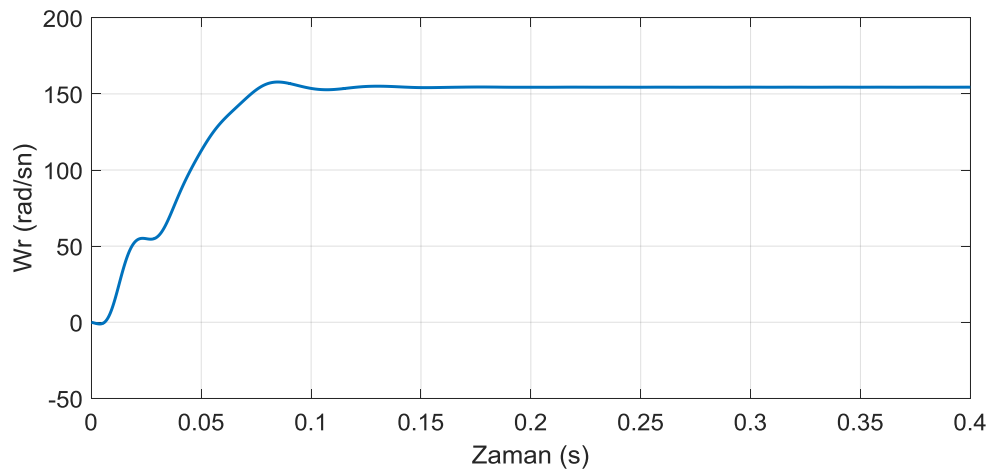
Şekil 5.13. SPWM denetimli üç seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.



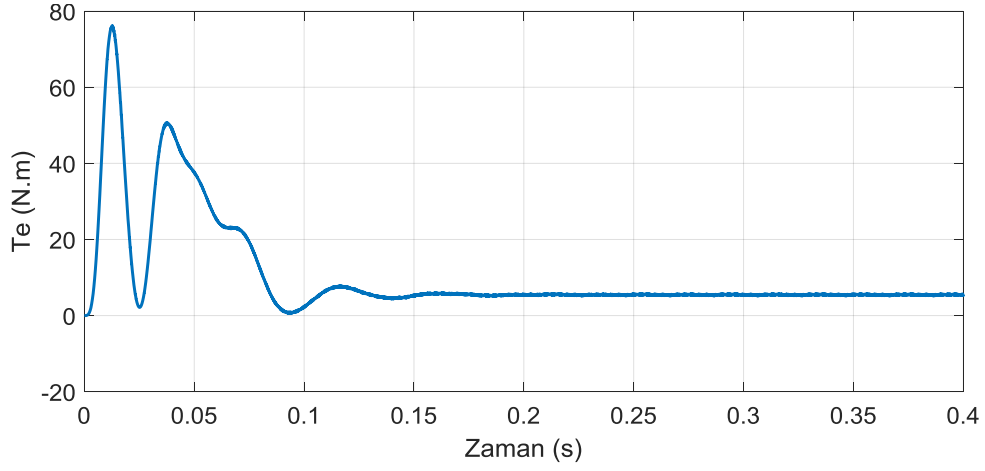
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.14. SPWM denetimli üç seviyeli filtresiz kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.14 a)'da üç seviyeli filtresiz KE evirici için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.14 b)'de ise üç seviyeli filtresiz KE evirici için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Çizelge 5.9 ve 5.10'da SPWM yöntemi ile denetlenen filtreli ve filtresiz üç faz üç seviyeli KE eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli ve filtresiz eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça stator akım harmonikleri azalma göstermektedir.

Çizelge 5.9. Filtreli üç faz üç seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.28	0.26	0.31	0.39	1.25
Vab	0.13	0.06	0.14	0.11	0.25
Van	0.15	0.06	0.15	0.08	0.22

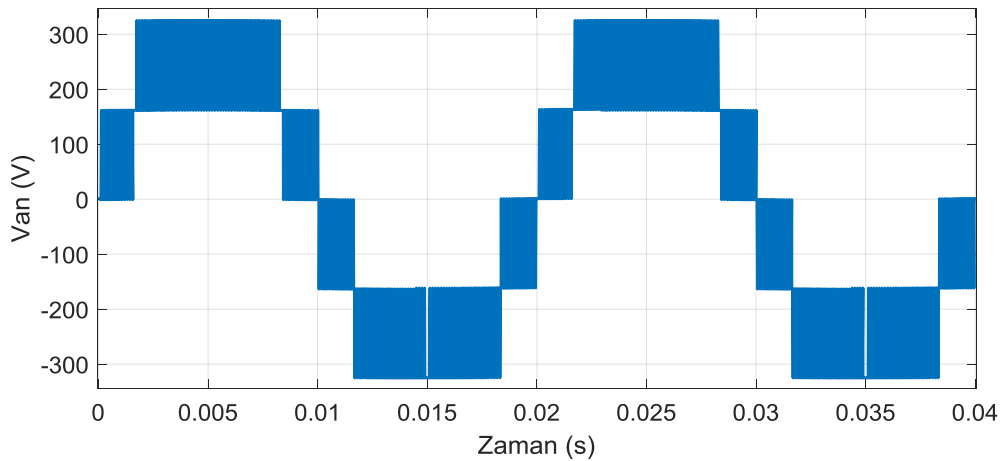
Çizelge 5.10. Filtresiz üç faz üç seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	2.19	2.02	1.96	2.06	2.31
Vab	35.31	39.20	42.07	44.34	49.27
Van	52.28	64.41	76.96	90.43	105.95

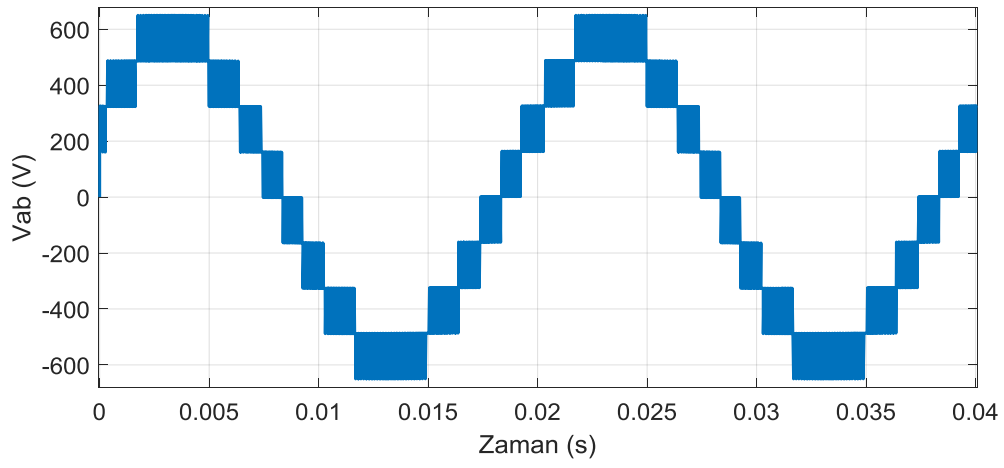
5.2.5. Beş Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

Beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricide Şekil 5.15 a)'da görüldüğü gibi faz çıkış geriliminin üç seviyeye sahip olduğu ve Şekil 5.15 b)'de görüldüğü gibi fazlar arası çıkış geriliminin beş seviyeye sahip olduğu görülmektedir. Bu eviricide DC kaynak barası dört adet kondansatörden oluşur. Ancak DC hatta bulunan kondansatörler nedeniyle, DC hat gerilim seviyelerinde gerilim dengesizliği oluşur. Bundan dolayı çıkış gerilimi beş seviyeli olması gerekirken üç seviyeli olarak görülür. Eviricinin çalışmasını düzgün bir şekilde devam ettirebilmesi için kondansatör geriliminin dengelenmesi gerekir. Gerilim dengesizlik problemini çözmek amacıyla kondansatör yerine DC gerilim kaynakları kullanılmıştır. Beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin üç seviyeli eviriciye göre kullanışsız olduğu görülmüştür. Bunun sebebi seviye sayısı arttıkça kullanılması gereken ekstra diyotlardan kaynaklanmaktadır. Seviye sayısının artmasının bir avantajı çizelgelerde görüldüğü gibi çıkış dalgasında harmonik bozulmanın azalmış olmasıdır.

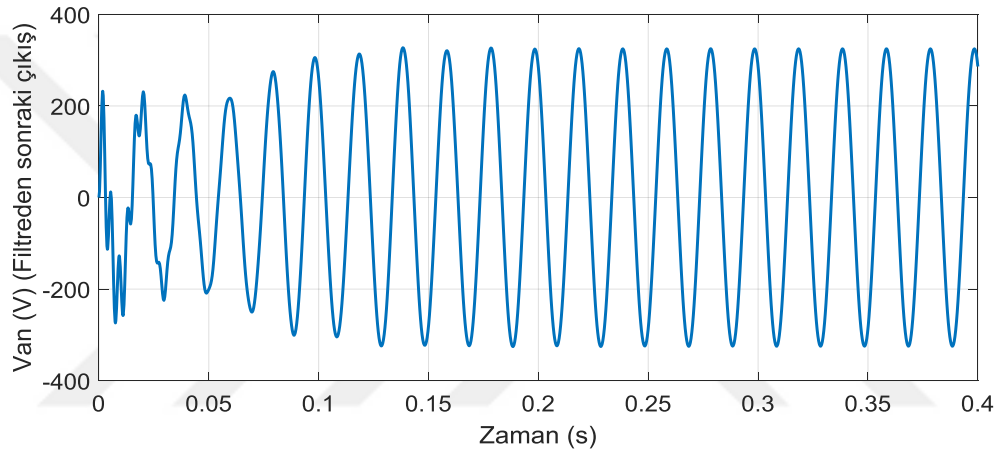
Şekil 5.15 a)'da beş seviyeli DKE eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.15 b)'de beş seviyeli DKE eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.15 c), d)'de ise beş seviyeli DKE filtreli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi fazlar arası çıkış gerilimi beş seviyelidir.



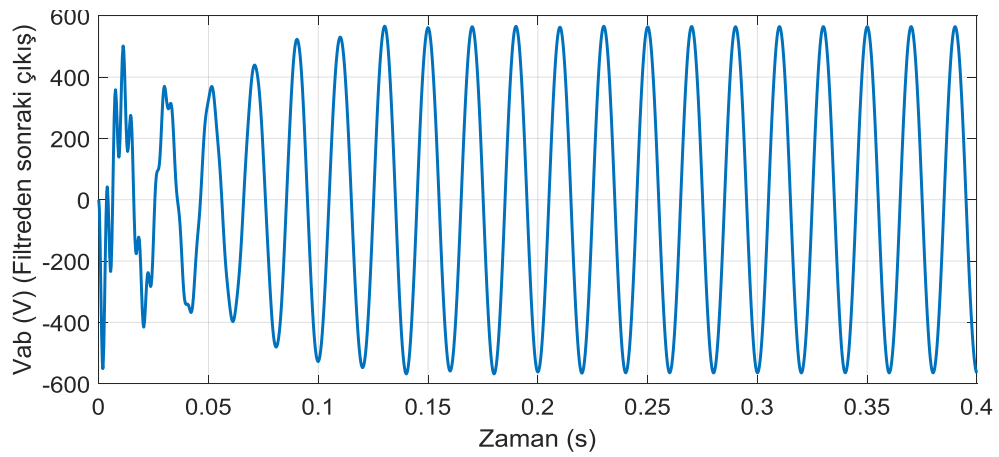
a)



b)



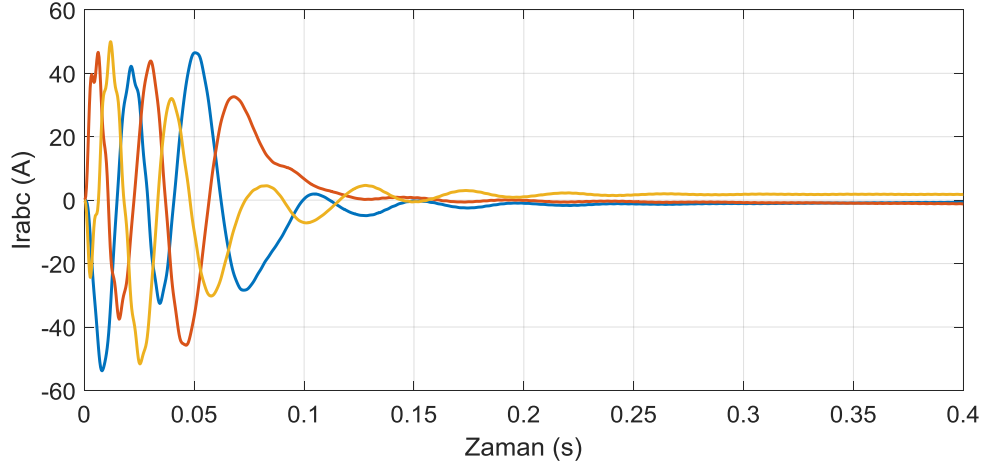
c)



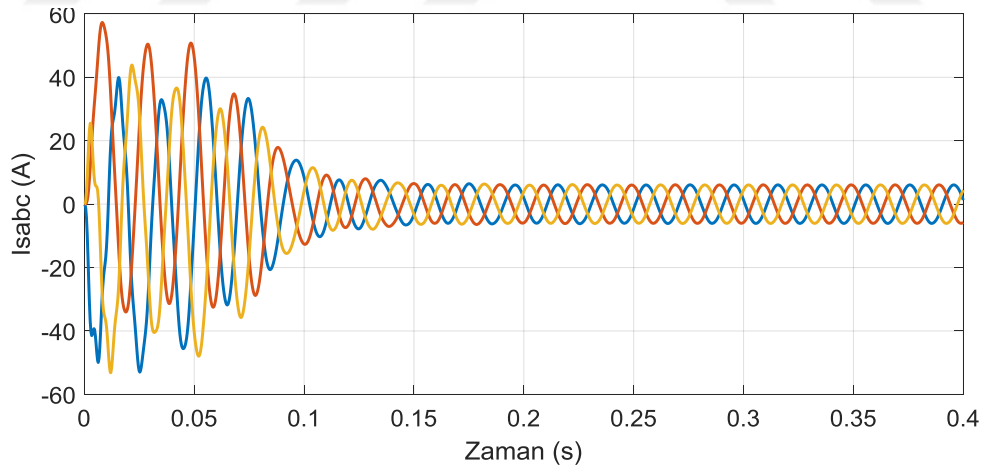
d)

Şekil 5.15. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli diyot kenetlemeli eviriciye ilişkin $M_1=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.

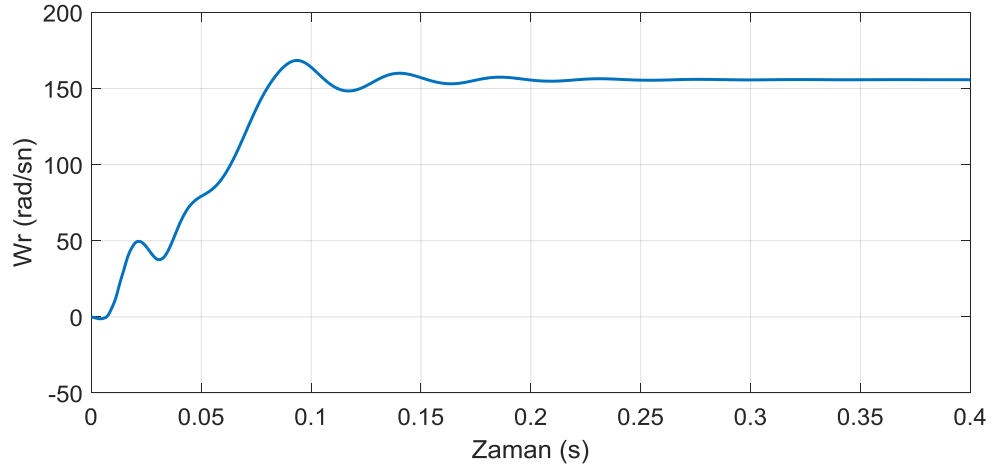
Şekil 5.16 a)'da kullanılan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.16 b)'de beş seviyeli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviriciye nazaran stator ve rotor akımlarının daha düzgün olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.16 c), d)'de ise sırasıyla beş seviyeli diyot kenetlemeli evirici asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir. Şekil 5.17 a)'da beş seviyeli filtresiz KKE kullanılan asenkron motor için rotor akımları verilmiştir.



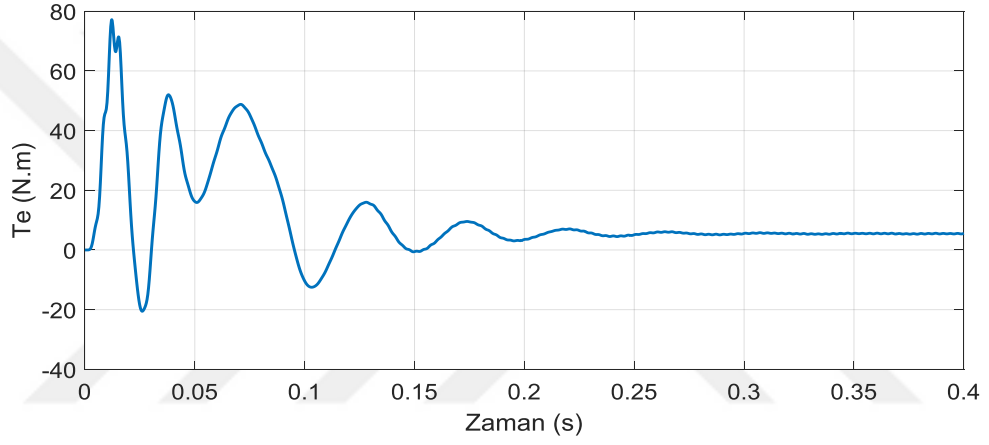
a)



b)

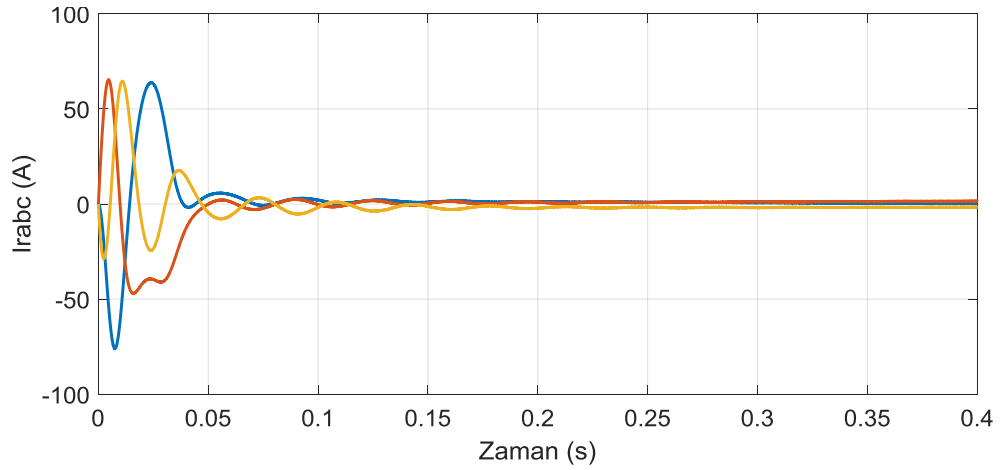


c)

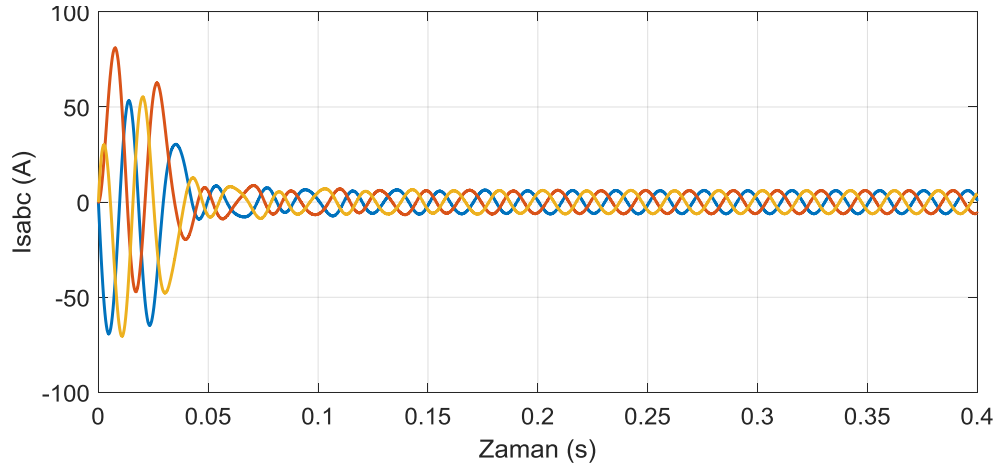


d)

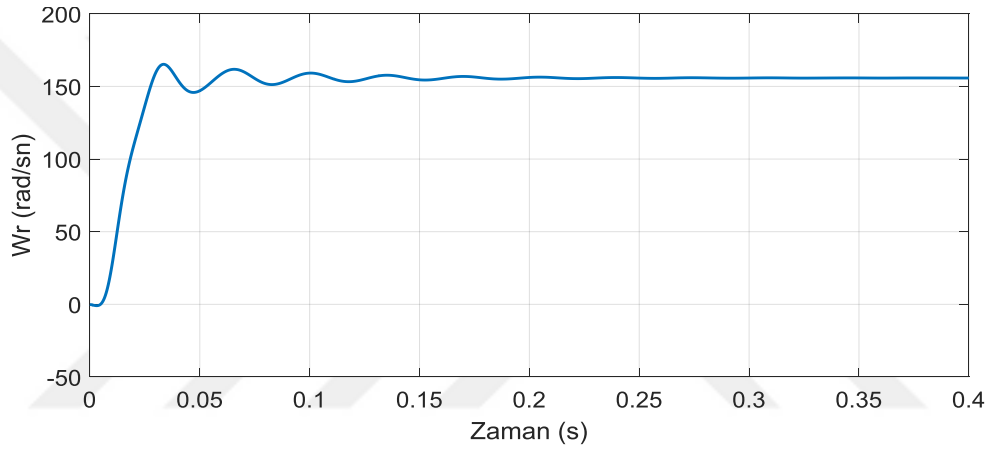
Şekil 5.16. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.



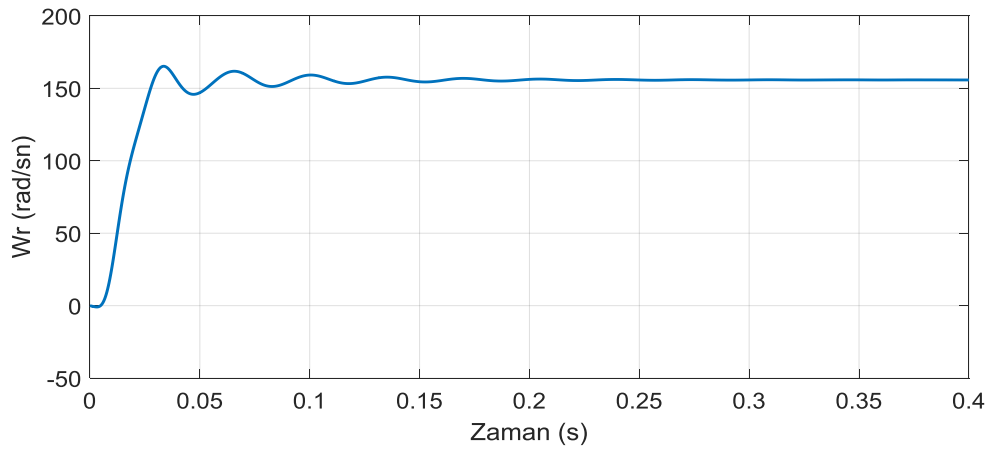
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.17. SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.17 b)'de beş seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanan asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.17 c) ve d)'de sırasıyla beş seviyeli filtresiz diyot kenetlemeli evirici kullanan asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.11 ve 5.12'da SPWM yöntemi ile denetlenen filtreli ve filtresiz üç faz beş seviyeli diyot kenetlemeli eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli ve filtresiz eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça asenkron motorun stator akım harmoniklerinde genel olarak azalma olmaktadır. Filtresiz beş seviyeli DKE eviricide ise modülasyon indeksi değeri arttıkça stator akım harmoniklerinde dalgalanma olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5.11. Filtreli üç faz beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

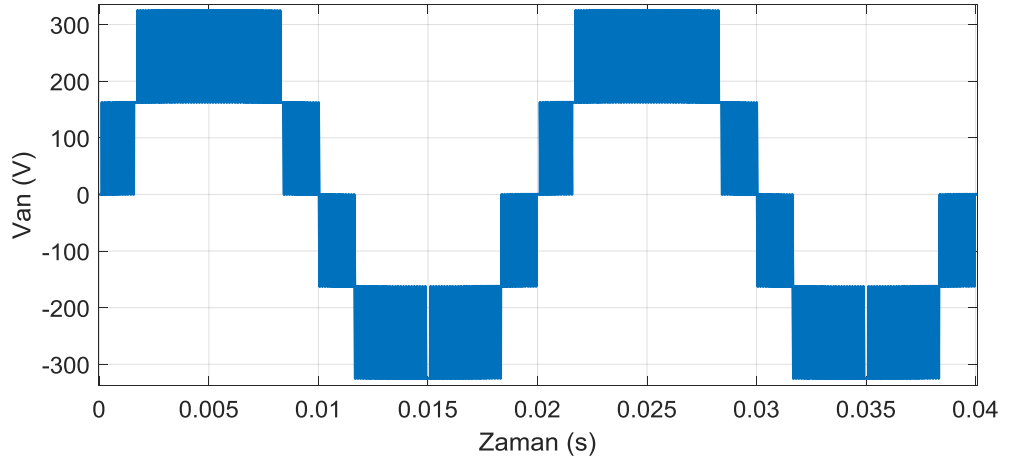
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.55	0.52	0.69	0.74	1.38
Vab	0.17	0.18	0.24	0.23	0.36
Van	0.18	0.18	0.25	0.22	0.38

Çizelge 5.12. Filtresiz üç faz beş seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

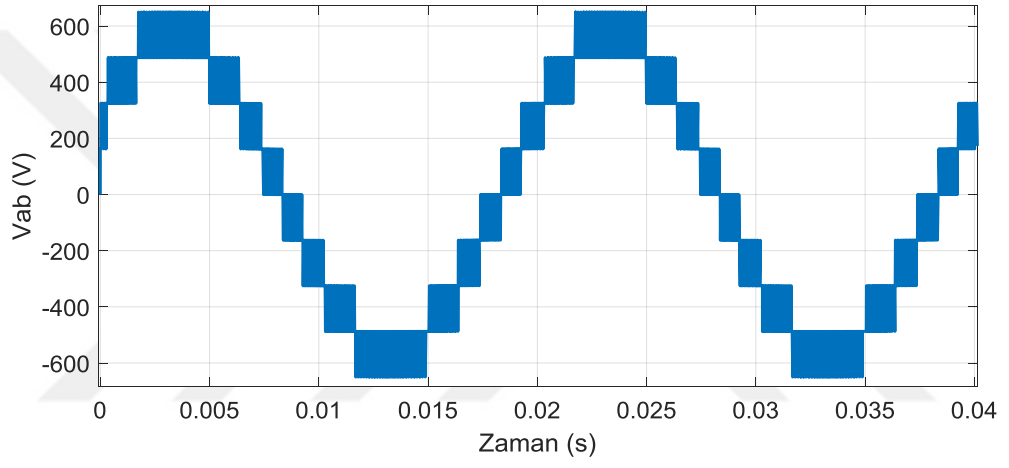
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.96	0.87	1.18	1.19	0.93
Vab1	17.07	17.39	21.75	24.35	25.65
Van1	26.95	33.50	38.50	42.04	44.75

5.2.6. Beş Seviyeli Kapasitör Kenetlemeli Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

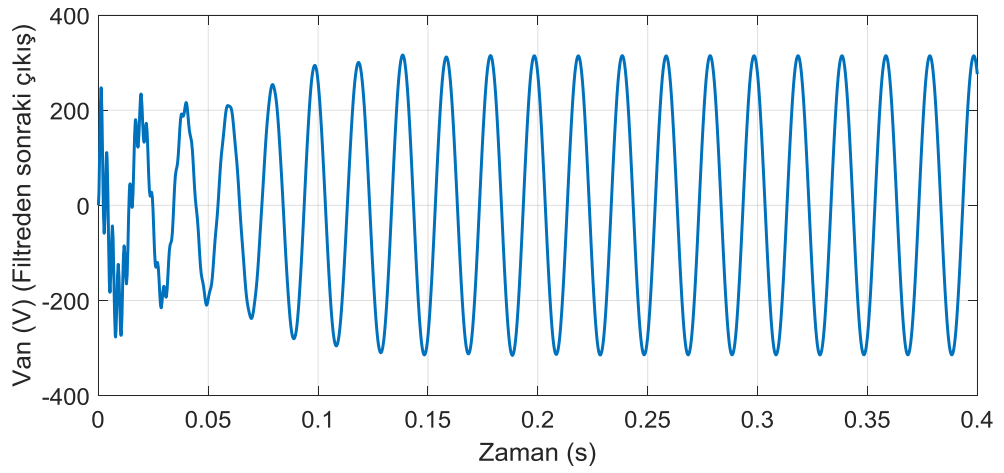
Bu eviricide beş seviyeli çıkış gerilimi oluşabilmesi için dört adet kondansatör ve altı adet kenetleme kondansatörü kullanılır. Bu nedenle diyot kenetlemeli eviriciye göre daha fazla yer kaplar ve maliyeti yüksektir. Buradaki çıkış gerilim seviyesini iki kondansatör arasındaki gerilimde oluşan artış belirlemektedir. Her faz bacağına yapıları diğer fazlarla aynı yapıya sahiptir. Beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin diyot kenetlemeli eviriciye göre daha esnek olduğu görülmektedir. Birçok anahtarlama kombinasyonu sayesinde farklı gerilim seviyelerini dengeleyebilmektedir. Bununla birlikte yüksek değere sahip kondansatör kullanılarak gerilim kenetlenmektedir. [191]. Üç seviyeli kapasitör kenetlemeli eviriciye göre seviye sayısı arttığı için harmonik bozulmanın azaldığı verilen çizelgede de görülmektedir.



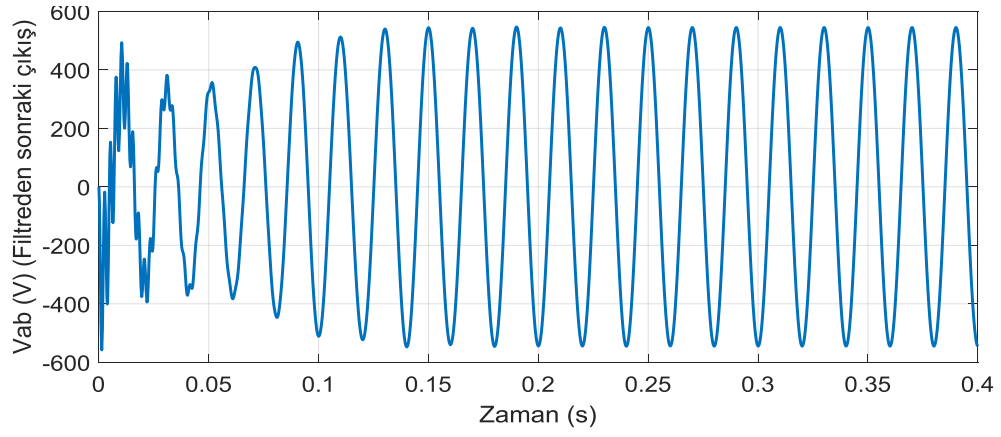
a)



b)

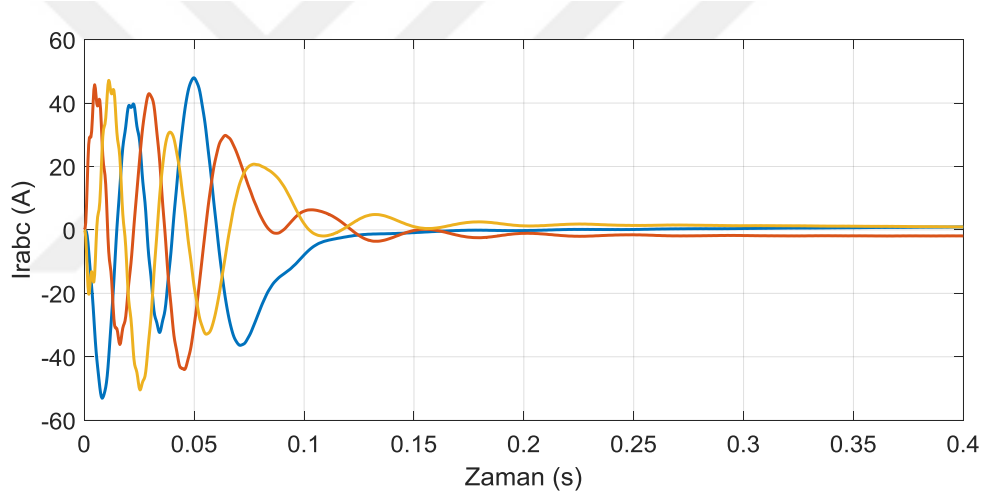


c)

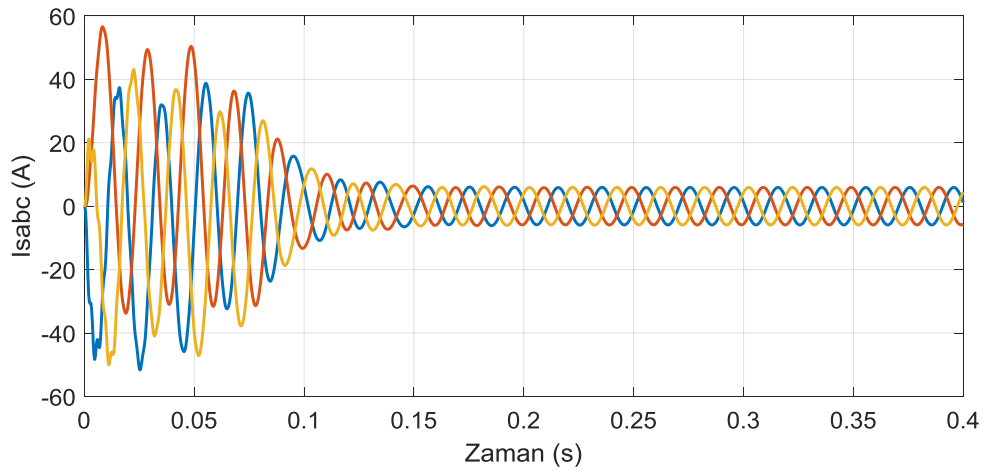


d)

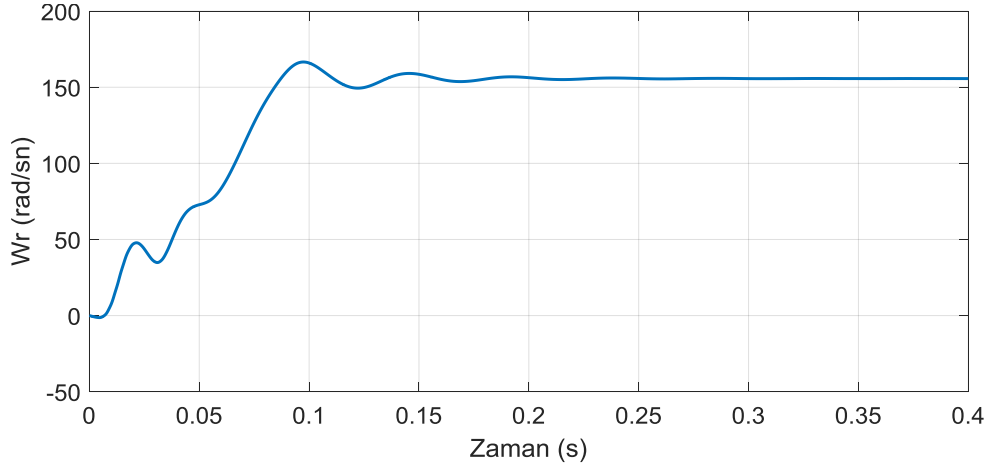
Şekil 5.18. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli eviriciye ilişkin $M_1=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.



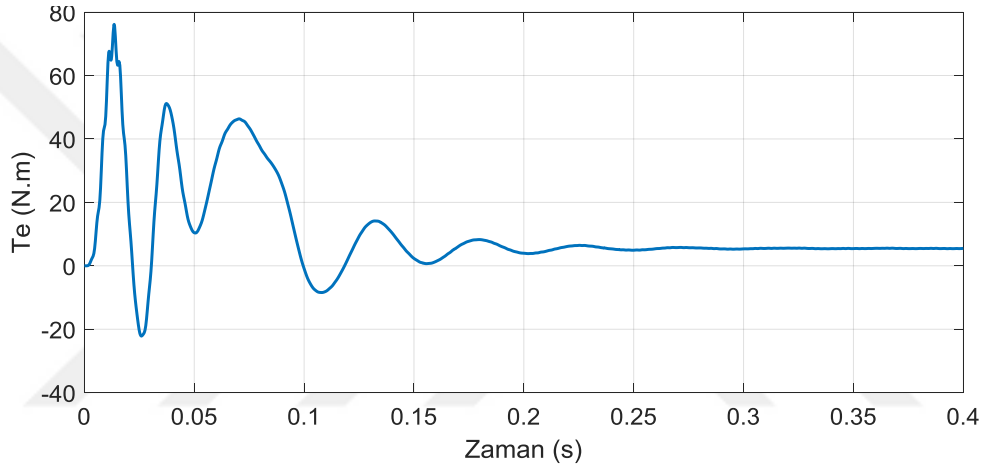
a)



b)



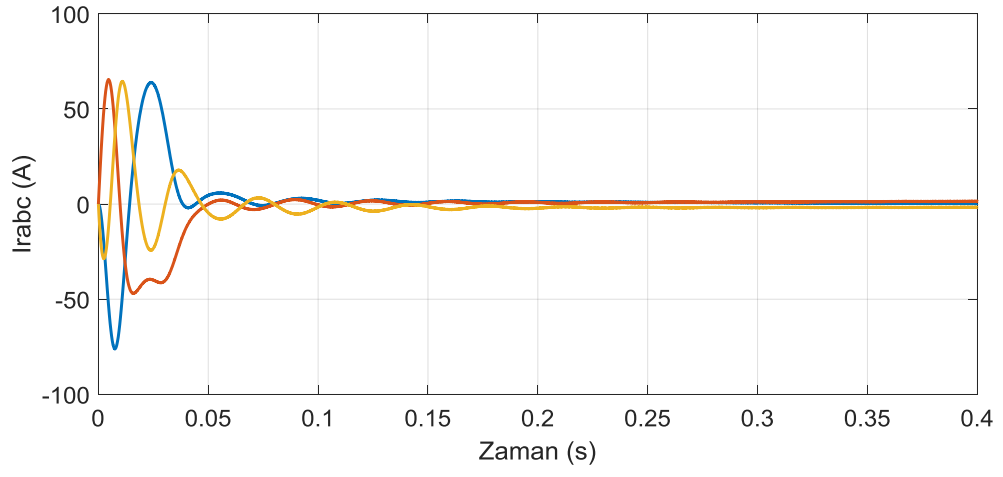
c)



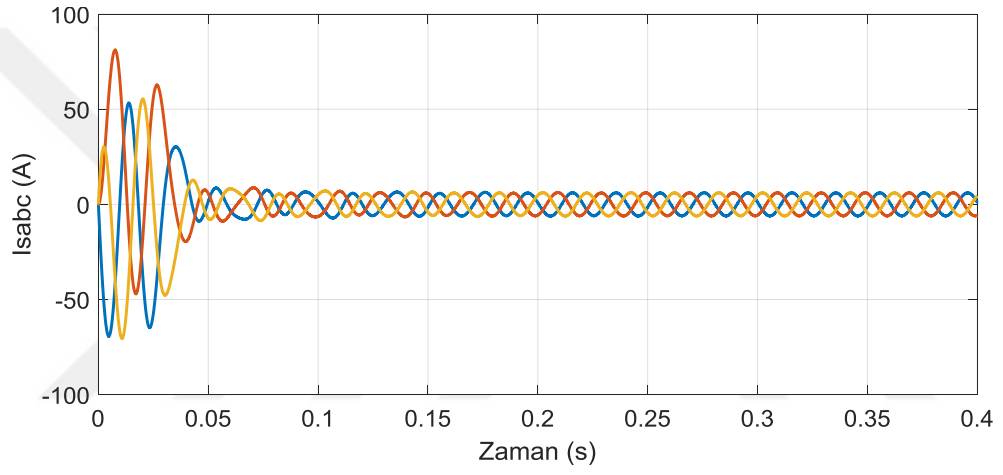
d)

Şekil 5.19. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

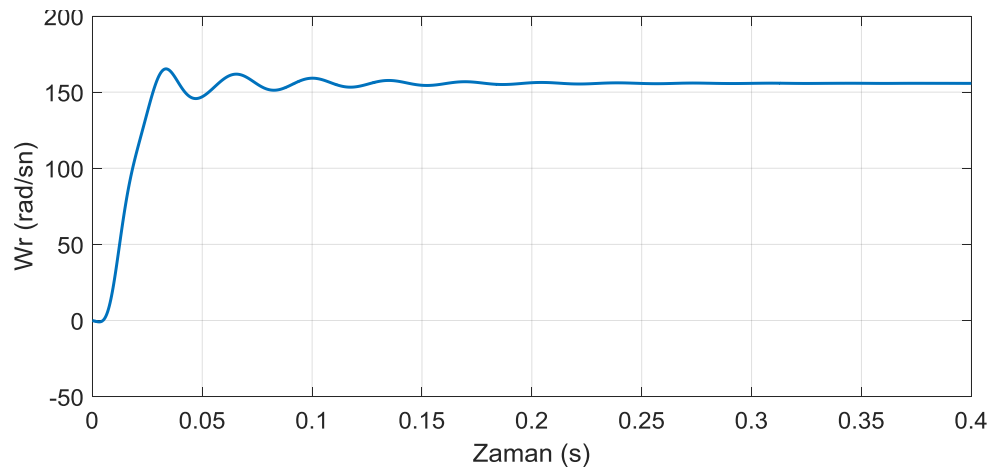
Şekil 5.18 a)'da beş seviyeli KKE' nin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.18 b)'de beş seviyeli KKE' nin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.18 c), d)'de ise beş seviyeli filtreli KKE'nin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.19 a)'da beş seviyeli filtreli KKE kullanılan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.19 b)'de beş seviyeli filtreli KKE kullanılan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.19 c), d)'de ise sırasıyla beş seviyeli filtreli KKE kullanılan asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir. Şekil 5.20 a)'da beş seviyeli filtresiz KKE kullanılan asenkron motor için rotor akımları verilmiştir.



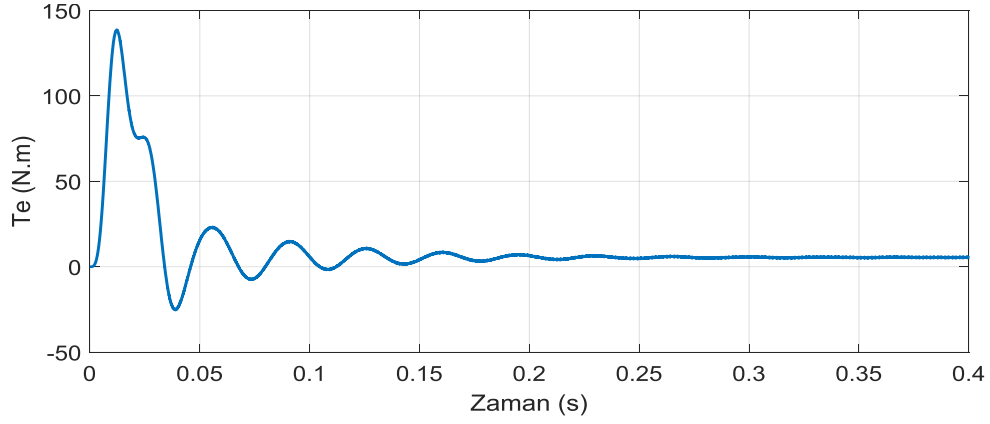
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.20. SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz kapasitör kenetlemeli evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.20 b)'de beş seviyeli filtresiz KKE için asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.20 c) ve d)'de sırasıyla beş seviyeli filtresiz KKE için asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.13 ve 5.14'de SPWM yöntemi ile anahtarlanan filtreli ve filtresiz üç faz beş seviyeli KKE'ye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre filtreli eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça genel olarak stator akım harmonikleri azalmaktadır. Filtresiz beş seviyeli KKE'de ise modülasyon indeksi değeri arttıkça stator akım harmonikleri artış ve azalışlar şeklinde bir dalgalanma göstermektedir.

Çizelge 5.13. Filtreli üç faz beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

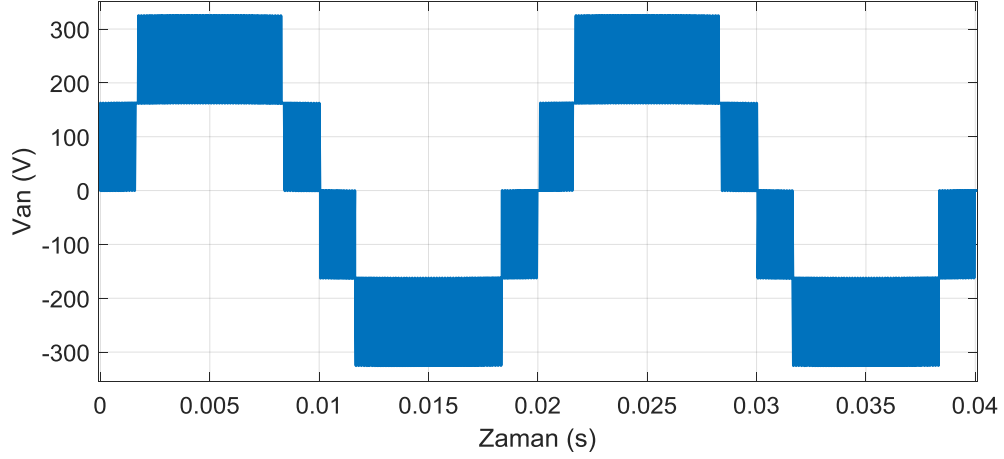
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.14	0.24	0.23	0.20	1.50
Vab	0.08	0.12	0.12	0.09	0.23
Van	0.10	0.11	0.12	0.08	0.22

Çizelge 5.14. Filtresiz üç faz beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviricinin THD değerleri.

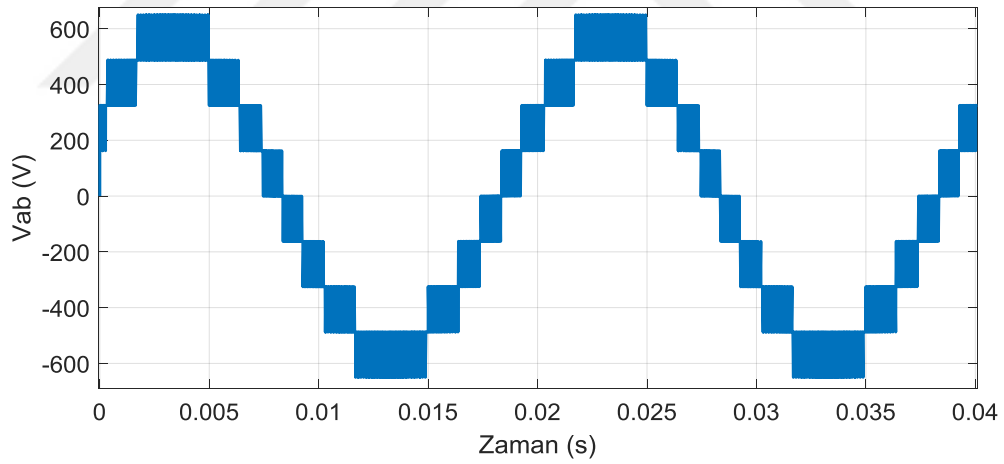
Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.96	0.87	1.17	1.17	0.89
Vab	17.07	17.37	21.69	24.25	25.54
Van	26.94	33.47	38.41	41.88	44.56

5.2.7. Beş Seviyeli Kaskat Evirici İçin Matlab/Simulink Benzetimi

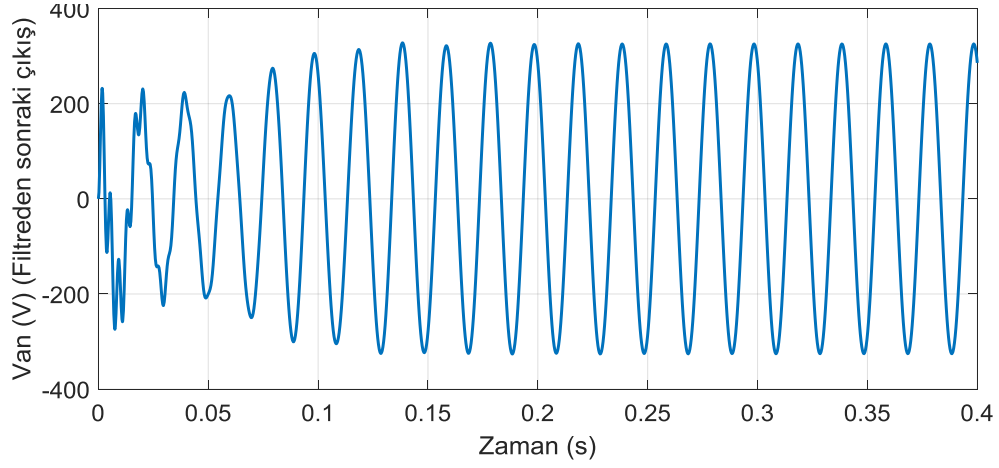
Şekil 5.21 a)'da beş seviyeli kaskat eviricinin çıkış faz gerilimi verilmiştir. Şekil 5.21 b)'de beş seviyeli kaskat eviricinin fazlar arası geriliminin dalga şekli görülmektedir. Şekil 5.21 c), d)'de ise beş seviyeli KE filtreli eviricinin çıkış faz ve fazlar arası gerilimi dalga şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi fazlar arası çıkış gerilimi beş seviyelidir.



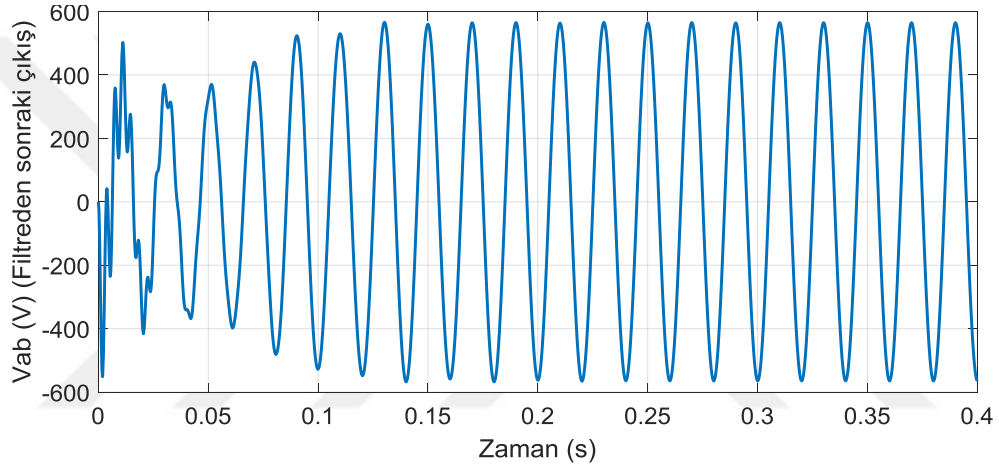
a)



b)



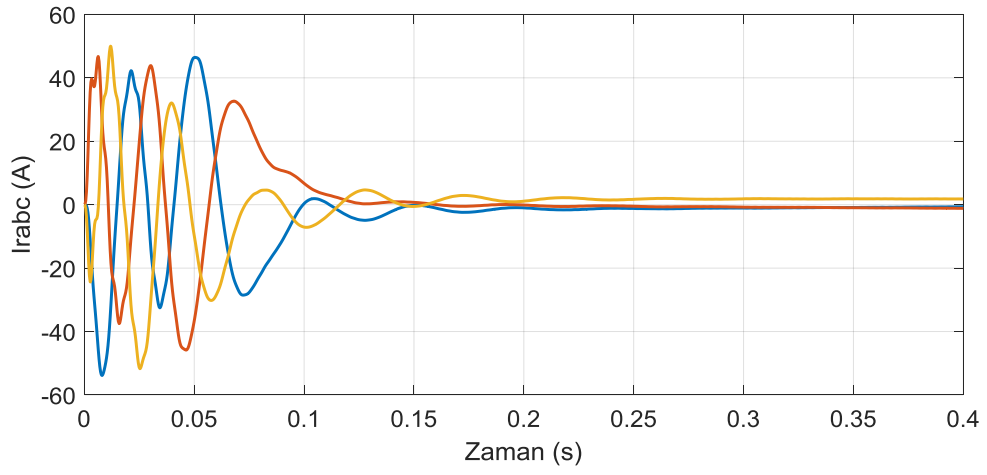
c)



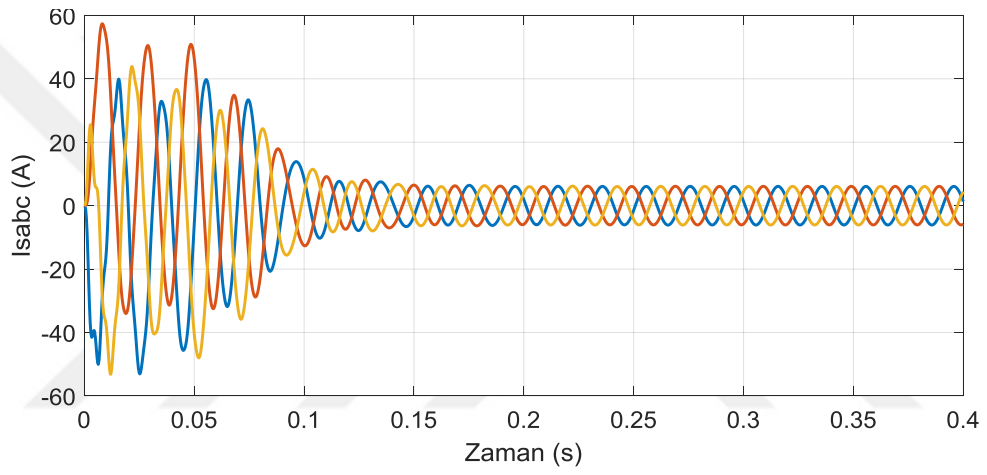
d)

Şekil 5.21. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kaskat eviriciye ilişkin $M_i=1$, $f_{sw}=4$ kHz alınması durumunda a) faz gerilimi b) fazlar arası gerilim c) filtre edilmiş faz gerilimi d) filtre edilmiş fazlar arası gerilim.

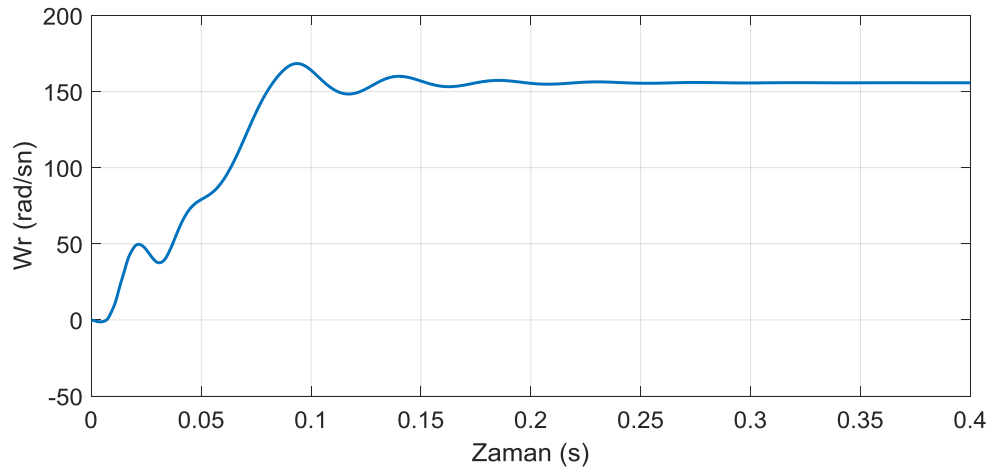
Şekil 5.22 a)'da beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin rotor akımları görülmektedir. Şekil 5.22 b)'de beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin stator akımları dalga şekli görülmektedir. Üç seviyeli eviriciye nazaran stator ve rotor akımlarının daha düzgün olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.22 c), d)'de ise sırasıyla beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motora ilişkin rad/s olarak hız grafiği ve tork grafiği verilmektedir.



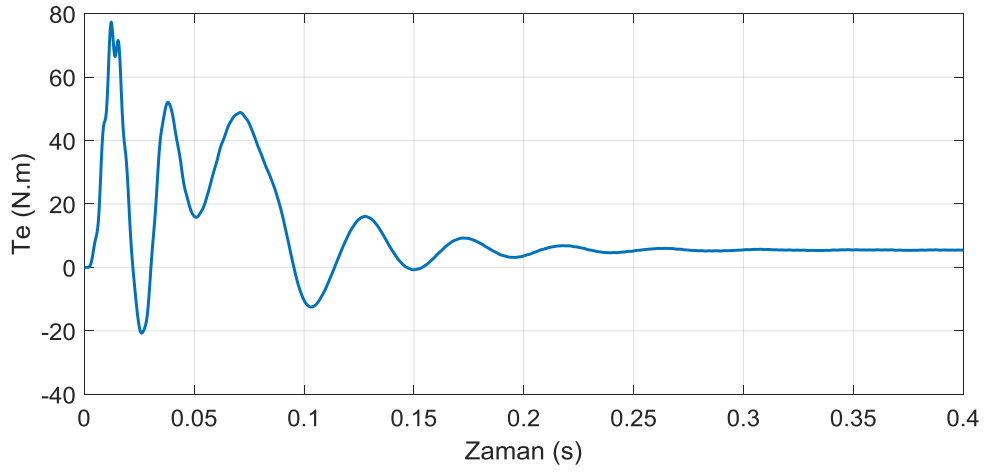
a)



b)

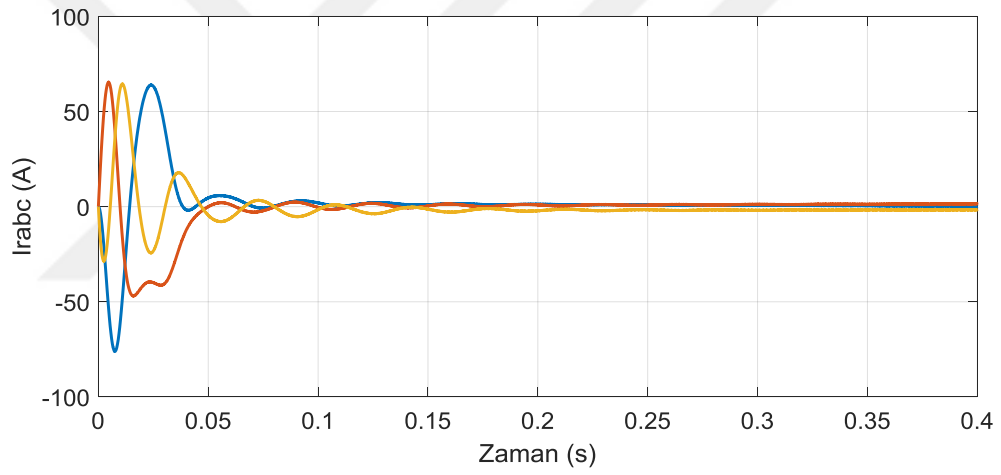


c)

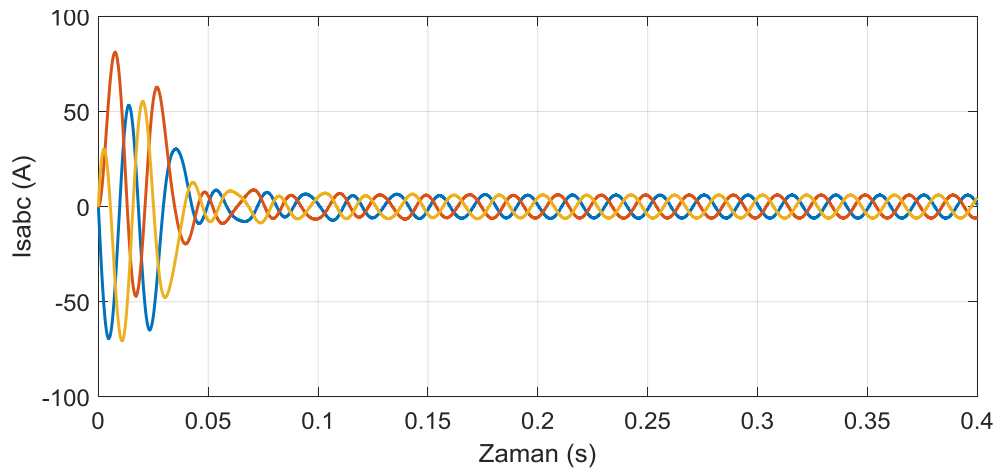


d)

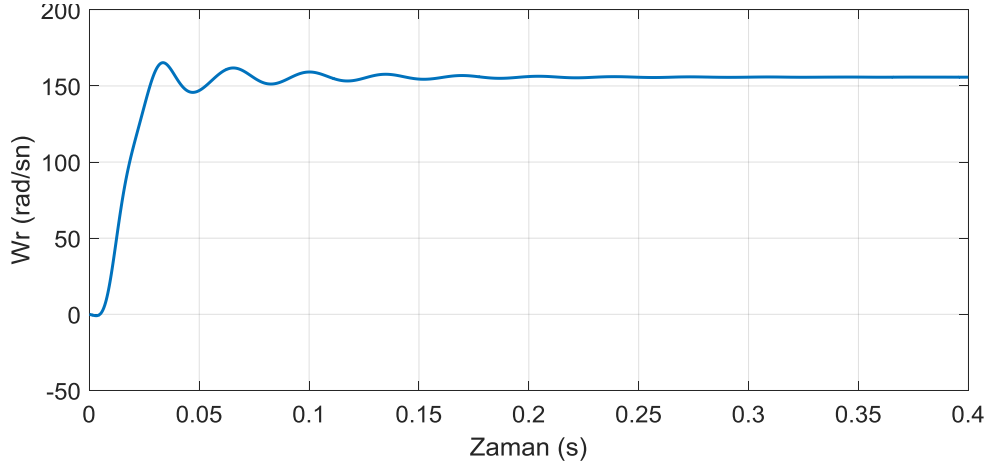
Şekil 5.22. SPWM denetimli beş seviyeli filtreli kaskat evirici kullanılan asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.



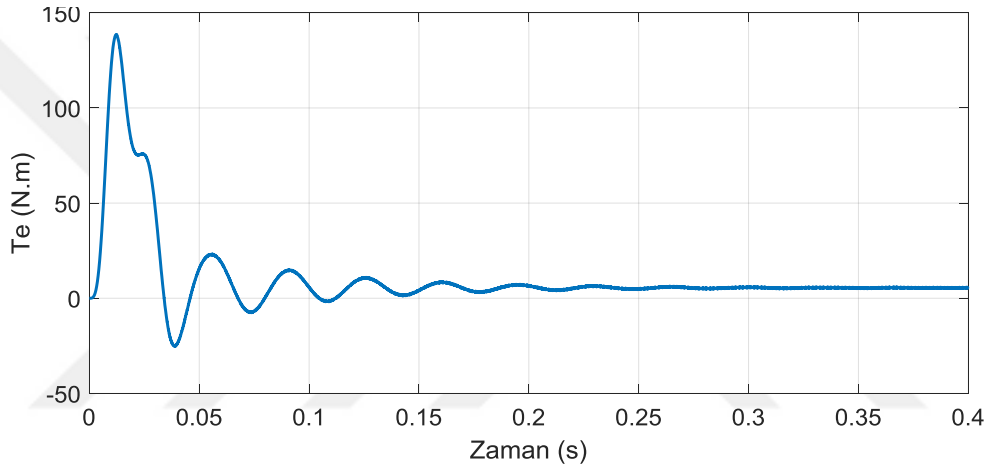
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.23. SPWM denetimli beş seviyeli filtresiz kaskat evirici asenkron motor sürücünün a) rotor akımı b) stator akımı c) açısal hız d) tork dalga şekilleri.

Şekil 5.23 b)'de beş seviyeli filtresiz kaskat evirici kullanan asenkron motor stator akımları dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.23 c) ve d)'de sırasıyla beş seviyeli filtresiz kaskat evirici kullanan asenkron motor hızı ve tork grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.15 ve 5.16'da SPWM yöntemi ile denetlenen filtreli ve filtresiz üç faz beş seviyeli kaskat eviriciye ilişkin farklı modülasyon indeksine göre elde edilen THD değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre beş seviyeli filtreli ve filtresiz kaskat eviricide modülasyon indeksi değeri arttıkça stator akım harmonikleri benzer şekilde azalmaktadır. Beş seviyeli filtresiz KE'de ise modülasyon indeksi arttıkça stator akım harmonikleri değerleri artış ve azalışlar göstermektedir. Burada stator akım harmoniklerinde bir dalgalanma gözlenmektedir.

Çizelge 5.15. Filtreli üç faz beş seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.22	0.21	0.18	0.21	1.00
Vab	0.05	0.07	0.07	0.05	0.13
Van	0.03	0.07	0.08	0.04	0.14

Çizelge 5.16. Filtresiz üç faz beş seviyeli kaskat eviricinin THD değerleri.

Değerler	THD %				
Ma	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Is	0.96	0.87	1.18	1.19	0.93
Vab1	17.07	17.39	21.75	24.35	25.65
Van1	26.95	33.50	38.50	42.04	44.75

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında FACTS ve özel güç cihazlarında kullanılan evirici yapıları araştırılmıştır. İlk olarak FACTS ve özel güç cihazlarının sistem gerilimi ile güç kalitesine olan etkisi ve bu nedenle bu cihazların kullanılma gereklilikleri tartışılmış devamında literatürdeki iki seviyeli ve çok seviyeli evirici yapıları incelenmiş ve açıklanmıştır. Daha sonra FACTS ve özel güç cihazları genel olarak incelenmiş, evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazlarının çeşitleri ile çalışma şekilleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde evirici çeşitlerinden bahsedilmiş, bu tez çalışmasında kullanılacak iki seviyeli eviriciler ile diyot kenetlemeli, kaskat ve kapasitör kenetlemeli eviricilerin anahtarlama durumları ve çalışma şekilleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde eviriciler karşılaştırılarak evirici yapılarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Dördüncü bölümde eviricilerin performansını oldukça etkileyen ve eviricilerin çıkışındaki gerilimin kontrol edebilmesi için kullanılan PWM ve SPWM tekniklerinden bahsedilmiştir. Burada SPWM anahtarlama tekniğinin tercih edilme nedeni, FACTS ve özel güç cihazı uygulamalarına kolay ve basit bir şekilde uygulanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Beşinci bölümde evirici yapılarıyla ilgili MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu evirici yapıları MATLAB/Simulink'te SPWM denetimli asenkron motor sürücüye uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Evirici tabanlı FACTS ve özel güç cihazlarının çok hızlı cevap verme yeteneği, her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilme özelliği ve bundan dolayı hassas yükleri koruyarak dengesiz yükleri kompanze etme ve mevcut sistemle uyumlu çalışabilme yeteneği açısından başarılı olduğu görülmüştür.

Benzetim çalışmalarında iki seviyeli ve çok seviyeli evirici olarak bilinen çeşitli devre yapıları kullanılarak SPWM denetimli asenkron motor kontrolü yapılmıştır. Çok seviyeli evirici olarak en çok bilinen ve tercih edilen DKE, KKE ve KE kullanılmıştır. İlk olarak üç fazlı iki seviyeli eviricinin SPWM denetimli asenkron motor kontrolü sunulmuştur. Hem filtre kullanılarak hem de filtre kullanılmadan yapılan kontrolde eviricinin fazlar arası gerilimi, faz-nötr arasındaki gerilimi, LC fitreden sonraki çıkış faz-nötr gerilimi ve LC fitreden sonraki çıkış fazlar arası gerilimi elde edilmiştir. Ayrıca

asenكرون motor sürücünün rotor akımı, stator akımı, açısal hız ve tork dalga şekilleri gösterilmiştir. Son olarak, MATLAB/FFT analizi kullanılarak, farklı modülasyon indeksine göre eviriciye ilişkin elde edilen THD değerleri çizelge halinde sunulmuştur. Yapılan benzetim sonuçlarında, elde edilen gerilim ve harmonik dalga şekillerine göre seviye sayısının düşük olmasından dolayı harmonik değerlerin yüksek, gerilim dengesizliğinin ise olmadığı görülmektedir. Eviricide seviye sayısı arttıkça ortaya çıkan gerilim dengesizliği eviricinin çıkış dalga şekillerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Ayrıca modülasyon indeksi değeri arttığında akım ve gerilim THD değerlerinde azalma olduğu ve daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Kullanılan evirici çeşitleri içerisinde asenkron motor yükü dikkate alındığında gerek THD değerleri ve gerekse sistemin dengeye ulaşması açısından en iyi sonuçları kaskat evirici sağlamıştır. Ayrıca bu eviricide kullanılan seviye sayısı itibariyle benzetimlerde gerilim dengesizliği problemi görülmemiştir. Her ne kadar çok seviyeli eviricilerde THD değeri azalsa da, seviye sayısının artması kullanılan anahtar ve eleman sayısında artırmaktadır. Bu durum sistem maliyetini artırmakla beraber kullanılan anahtarlara ilişkin anahtarlama ve iletim kayıplarında artmasına yol açmaktadır. Ayrıca çok seviyeli eviricilerin kullanılması eviriciler için kullanılan sürme devrelerinde karmaşılaşmasını gündeme getirmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Anonim, (2015, 24 Mayıs). [Online]. Erişim:
<http://www.schneider-electric.com.tr/documents/solutions/EV-cozum-ECAT201101TR.pdf>.
- [2] M. M. Ertay ve Z. Aydoğmuş, “Güç sistemlerinde FACTS uygulamaları,” *SDU International Technologic Science*, c. 4, sayı 2, ss. 40-58, 2012.
- [3] N. G. Hingorani ve L. Gyugyi, “*Understanding FACTS: concept and technology of flexible AC transmission systems*,” 1. baskı, New York, USA: Wiley-IEEE Press, 1999.
- [4] M. H. Rashid, *Power Electronics, Devices, Circuits and Applications*, 4. baskı, Türkçe çeviri: Nobel Yayınevi, 2016.
- [5] Ö. Salor, D. Küçük, M. Güder, T. Demirci, Y. Akkaya, İ. Çadircı ve M. Ermiş, “Türkiye elektrik iletim sisteminde harmonik bozulma ve kırpışma parametrelerinin oluşturulan güç kalitesi veritabanı yapısıyla değerlendirilmesi,” 3. *EMO Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 2009.
- [6] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, ve S. Yusuf, “Design of a prototype D-STATCOM for voltage sag mitigation,” *National Power and Energy Conference*, 2004, ss. 61-66.
- [7] E. Deniz, R. Çötel, S. Tuncer ve B. Dandil, “Üç seviyeli kaskat evirici kullanan DSTATCOM ile gerilim regülasyonu,” *E-Journal of New World Sciences Academy*, c. 4, sayı 1, ss. 88-105, 2009.
- [8] N. G. Hingorani, “FACTS: flexible AC transmission systems,” *IEEE 5th International Conference on AC and DC Power Transmission*, London, 1991, ss.1-7.
- [9] N. G. Hingorani, “Introducing custom power,” *IEEE Spectrum*, c. 32, sayı 1, ss. 41-48, 1995.
- [10] Anonim, (2019, 16 Haziran). [Online]. Erişim:
<http://www.nap.edu/read/12091/chapter/13>
- [11] K. K. Sen, “STATCOM-Static Compensator: theory modeling and applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 2, sayı 1, ss. 1177-1183, 1999.
- [12] P. Kumar, “Simulation of custom power electronic device DSTATCOM,” *International Conference on Power Electronics, IICPE 2010*, India, 2011.
- [13] S. Vinnakoti ve V. R. Kota, “Implementation of artificial neural network based controller for a five-level converter based UPQC,” *Alexandria Engineering Journal*, c. 57, ss. 1475-1488, 2018.
- [14] C. Fubo, J. Ping, D. Yaoqiang, ve Z. Fan, “The mechanism and suppression strategies of oscillating current between the shunt and series converters of 35kV MMC-UPQC,” *China International Conference on Electricity Distribution, CIGED*, 2016.

- [15] V. Khadkikar ve A. Chandra, "A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC) ," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 45, sayı 5, ss. 1897-1902, 2009.
- [16] J. Hu, D. Zhu, J. Xiong, H. Zhu, B. Bo, X. Liu, ve X. Wei, "Highly reliable operation control for MMC-UPFC under unbalanced power grid conditions," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, ss. 736-741, 2018.
- [17] Z. Pu, S. Zha, L. Zong, Y. Wang, S. Liu, J. Su, ve M. Liu, "Fault characteristics analysis and protection design for MMC-UPFC with high reliability," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2018, ss. 1226-1231.
- [18] B. Arun ve B. V. Manikandan, "transient stability enhancement using multilevel inverter based UPFC," *Applied Mechanics & Materials* , sayı 573, ss. 722-727, 2014.
- [19] A. K. Panda ve S. S. Patnaik, "Analysis of cascaded multilevel inverters for active harmonic filtering in distribution Networks," *Electrical Power and Energy Sysytem*, ss. 216-226, 2015.
- [20] K. Karaarslan, B. Arifoğlu, E. Beşer ve S. Çamur, "Seri bağlı güç filtresi için geliştirilen kaskat bağlı çok seviyeli evirici ve kontrol algoritması," 6. *Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, Kocaeli, 2015.
- [21] C. Junling, L. Yaohua, W. Ping, Y. Zhizhu, ve D. Zuyi, "A closed-loop selective harmonic compensation with capacitor voltage balancing control of cascaded multilevel inverter for high power active power filters," *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, ss. 569-573, 2008.
- [22] M. Rokhafrooz ve A. Mosallanejad, "The reduction of semiconductor devices in a flying capacitor-based multilevel converter for use as an SSSC," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, c. 25, sayı 5, ss. 3752-3763, 2017.
- [23] B. Geethalakshmi ve P. Dananjayan, "A combined multipulse-multilevel inverter based SSSC," *Third International Conference on Power Systems*, 2009.
- [24] A. Griffo and D. Lauria, "two-leg three-phase inverter control for STATCOM and SSSC applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 23, sayı1, ss.361-370, 2008.
- [25] B. Geethalakshmi, T. Hajmunnisa ve, P. Dananjayan, "Dynamic characteristic analysis of SSSC based on 48-pulse inverter," *8th International Power Engineering Conference, IPEC 2007*, 2007, ss. 550-554.
- [26] B. Han, S. Baek, H. Kim, ve G. Karady, "Dynamic characteristic analysis of SSSC based on multibridge inverter," *IEEE Transactions On Power Delivery*, c. 17, sayı 2, ss.623-629, 2002.
- [27] M. İnci, M. Tömay, ve K. Ç. Bayındır, "A novel method improvement for detection of voltage problems in dynamic voltage restorers," *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, c. 31, sayı 4, ss.997-1006, 2016.
- [28] K. Bhumkittipich, W. Chankhamrian, ve N. Mithulananthan, "Application of three-level diode-clamped converter on 10 kw distribution voltage restorer," *In 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium*, Energy Procedia, 2013, ss. 116-129.

- [29] P. Roncero-Sánchez, ve E. Acha, “Dynamic voltage restorer based on flying capacitor multilevel converters operated by repetitive control,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 24, sayı 2, ss. 951-960, 2009.
- [30] H. K. Al-Hadidi, A. M. Gole, ve D. A. Jacobson, “A novel configuration for a cascade inverter-based dynamic voltage restorer with reduced energy storage requirements,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 23, sayı 2, ss. 881-888, 2008.
- [31] H. K. Al-Hadidi, A. M. Gole, ve D. A. Jacobson, “Minimum power operation of cascade inverter-based dynamic voltage restorer,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 23, sayı 2, ss. 889 -898, 2008.
- [32] A. Ghosh, A. K. Jindal, ve A. Joshi, “Design of a capacitor-supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 19, sayı1, ss. 405-413, 2004.
- [33] B. Wei, A. Marzabal, R. Ruiz, J. M. Guerrero Ge, ve J. Vasquez, “DAVIC: A new distributed adaptive virtual impedance control for parallel-connected voltage source inverters in modular UPS system,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 34, sayı 6, ss. 5953-5968, 2019.
- [34] J. M. Kim, B. J. Kim, J. H. Cho, C. Y. Won, ve J. H. Lee, “Multinomial model of droop control method for parallel-connected UPS inverters,” *20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017*, 2017.
- [35] K. Singh ve S. G. Choudhur, “A conflict in control strategy of voltage and current controllers in multi-modular single- phase UPS inverters system santosh,” *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, ss. 631-636.
- [36] M. V. Reedy, B. P. Muni, ve A. Sarma, “Enhancement of transient stability in fourteen bus system using interline power flow controller,” *International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2017, ss. 1145-1150.
- [37] R. Bharathi ve C. C. A. Rajan, “An advanced FACTS controller for power flow management in transmission system using IPFC,” *International Conference on Process Automation, Control and Computing Process Automation, Control and Computing (PACC)*, 2011.
- [38] S. Salem ve V. K. Sood, “Simulation and controller design of an interline power flow controller in EMTP RV, ” *International Conference on Power systems Transients (IPST'07)*, Lyon, 2007.
- [39] S. P. Gawande, M. R. Ramteke, H. M. Suryawanshi, ve V. B. Borghat, “Carrier-based hysteresis controlled constant switching frequency strategy for three-level inverterbased DSTATCOM,” *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) Power Electronics*, 2018.
- [40] E. Deniz, R. Çötel, B. Dandil, ve S. Tuncer, “Neuro-fuzzy current controller for three-level cascade inverter based DSTATCOM,” *45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2010.
- [41] A. Çetin ve M. Ermiş, “GKE Based DSTATCOM with selective harmonic elimination,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 45, sayı 3, ss. 1000-1015, 2009.
- [42] H. Masdi, N. Mariun, S. M. Bashi, A. Mohamed, ve S. Yusuf, “Construction of a prototype dstatcom for voltage sag mitigation,” *European Journal of Scientific*

Research, c. 30, sayı 1, ss. 112-127, 2009.

[43] H. F. Bilgin ve M. Ermiş, "Reactive power compensation of coal mining excavators by using a new generation STATCOM," *IEEE Transaction on Industrial Applications*, c. 43, sayı 1, ss. 97-110, 2007.

[44] A. Shukla, A. Ghosh, ve A. Joshi, "A hysteresis current controlled flying capacitor multilevel inverter based DSTATCOM," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, c. 1, 2005, ss. 857-864.

[45] F. Benzerafa, N. Henini, ve A. Tlemçani, "A fuzzy controller using three level-inverter based DSTATCOM," *International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, 2018.

[46] A. A. Elserougi, A. M. Massoud, ve Ş. Ahmed, "A transformerless STATCOM based on a hybrid Boost modular multilevel converter with reduce number of switches," *Electric Power Systems Research*, c. 146, ss. 341-348, 2017.

[47] Z. Shu, N. Ding, J. Chen, H. Zhu, ve X. He, "Multilevel SVPWM with DC-link capacitor voltage balancing control for diode-clamped multilevel converter based STATCOM," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, c. 60, sayı 5, ss. 1884-1896, 2013.

[48] S. Filizadeh ve A. M. Gole, "Harmonic performance analysis of an PWM controlled STATCOM in network applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 20, sayı 2, ss. 1001-1008, 2005.

[49] S. M. Mueen, H. M. Hasanien, R. Takahashi, T. Murata, ve J. Tamura, "Integration of space vector pulse width modulation controlled STATCOM with wind farm connected to multi machine power system," *Journal of Renewable Sustainable Energy* 1, 2009.

[50] M. Saeedifard, H. Nikkhajoei, ve R. Iravani, "A space vector modulated STATCOM based on a three-level neutral point clamped converter," *IEEE Transactions On Power Delivery*, c. 22, sayı 2, ss. 1029-1039, 2007.

[51] L. Ran, L. Holdsworth, ve G. A. Putrus, "Dynamic selective harmonic elimination of a three-level converter used for static var compensation," *IEEE Proc.-Generation, Transaction Distr.*, c. 149, sayı 1, ss. 83-89, 2002.

[52] Y. Liang ve C. O. Nwankpa, "A new type Of STATCOM based on cascading voltage source inverters with phase-shifted unipolar SPWM," *Industry Application Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting IEEE*, c. 2, 1998, ss. 1447-1453.

[53] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. W. Mckeever, ve J. Vancovering, "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation," *IEEE Transaction On Industry Application*, c. 32, sayı 5, ss. 1130-1138, 1996.

[54] S. Guo ve D. Liu, "Voltage oriented based control strategy for cascaded PWM STATCOM," *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 2010, ss. 1-4.

[55] Z. Li, J. Wang, F. Zhang, B. Li, L. Qi, P. Xu, ve X. Xia, "Study of harmonic elimination in switching devices in STATCOM," *1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology*, Xi'an, China, 2011.

[56] S. Honglai, Z. Guang, ve Z. Jinggang, "Research on optimization carrier phase-shifted SPWM of cascaded STATCOM," *Artificial Intelligence, Management*

Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2nd International Conference, 2011, ss. 4252-4255.

[57] T. S. Yeh, H. F. Jhu, ve H. W. Sung, "Modeling and Control of three - phase multilevel inverter - based STATCOM," *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, ss. 406-411, 2010.

[58] D. Patel, R. Saravanakumar, K. K. Ray ve R. Ramesh, "Design and implementation of three level chb inverter with phase shifted SPWM using TMS320F24PQ," *Power Electronics (IICPE)*, India, 2010, ss. 1-6.

[59] X. Xu, Y. Zou, K. Ding, ve F. Liu, "A STATCOM based on cascade multilevel inverter with phase-shift SPWM" *International Conference on Power System Technology-POWERCON*, Singapore, 2004, ss. 145-149.

[60] X. Xu, Y. Zou, K. Ding, ve F. Liu, "Cascade multilevel inverter with phase-shift SPWM and its application in STATCOM," *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan-Korea, 2004, ss. 1139-1143.

[61] K. H. Law, S. A. Mohamed, D. Georgios, S. Konstantinou, ve V. G. Agelidis, "SHE-PWM cascaded multilevel converter with adjustable DC sources control for STATCOM applications," *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 7th International*, 2012, ss. 330-334.

[62] L. Gong, Y. Kang, J. Chen, ve S. He, "Phase-shifted space vector PWM and on-time correction DC voltage balancing scheme for cascaded H-bridge STATCOM," *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), IEEE 8th International Conference on*, 2011, ss. 2741-2748.

[63] C. Townsend, T. J. Summers, ve R. E. Betz, "Estimation of loss components in a cascaded H-bridge STATCOM," *20th Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Australasian, 2010, ss. 1-6.

[64] R. Sternberger ve D. Jovcic, "Theoretical framework for minimizing converter losses and harmonics in a multilevel STATCOM," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 23, sayı 4, ss. 2376-2384, 2008.

[65] C. Townsend, T. J. Summers, ve R. E. Betz, "Comparison of modulation strategies for a cascaded H-bridge STATCOM - Part 1: Theoretical Background," *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, ss. 2019-2024.

[66] G. Vazquez, L. Rodriguez-Larios, J. M. Sosa, P. R. Martinez-Rodriguez, ve A. A. V. Fernandez, "Single carrier PWM strategy for grid connected PV transformerless cascade multilevel inverters," *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2018)*, Ixtapa, Mexico, 2018.

[67] C. Zang, Z. Pei, J. He, G. Ting, J. Zhu, ve W. Sun, "Comparison and analysis on common modulation strategies for the cascaded multilevel STATCOM," *Power Electronics and Drive Systems PEDS, International Conference*, 2009, ss. 1439-1442.

[68] C. D. Townsend, T. J. Summers, ve R. E. Betz, "Optimisation of switching losses and harmonic performance using Model Predictive Control of a cascaded H-bridge multi-level STATCOM," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, ss. 3159-3166, 2011.

[69] M. Hagiwara ve H. Akagi, "PWM control and experiment of modular multilevel converters," *Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008*, 2008, ss. 154-161.

- [70] X. Chen, D. Ke, K. Yong, ve L. Cong, "Characteristic analysis and experimental verification of a novel capacitor voltage control strategy for three-phase MMC-DSTATCOM," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, ss. 1528-1533.
- [71] H. P. Mohammadi ve M. T. Bina, "A transformerless medium-voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters," *Power Electronics, IEEE Transactions*, c. 26, sayı 5, ss. 1534-1545, 2011.
- [72] M. Pereira, D. Retzmann, J. Lottes, M. Wiesinger, ve G. Wong, "SVC PLUS: an MMC STATCOM for network and grid access application," *IEEE Trondheim Power Techology*, ss. 1-5, 2011.
- [73] C. Wang ve B.T. Ooi, "Elimination of low frequency harmonics of modular multilevel converters (MMC): Implications to MMC HVDC and STATCOM," *Industrial Electronic Society, IECON 2013 - 39th Annual Conf. of the IEEE*, 2013, ss. 730-735.
- [74] M. Nieves, J. M. Maza, J. M. Mauricio, R. Teodorescu, M. Bongiorno, ve P. Rodriguez, "Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation," *Power Electronic Application (EPE'14-ECCE Europe), 16th European Conference*, 2014, ss. 1-10.
- [75] P. Sotoodeh ve R. D. Miller, "A New Multi-level Inverter with FACTS Capabilities for Wind Application," *Green Technology Conference*, 2013, ss. 271-276.
- [76] X. Yang, J. Li, W. Fan, X. Wang, ve T. Q. Zheng, "Research on modular multilevel converter based STATCOM," *Industrial Electronic Application (ICIEA), 6th IEEE Conference*, 2011, ss. 2569-2574.
- [77] J. Zhu, L. Li, ve M. Pan, "Study of a novel STATCOM based on modular multilevel inverter," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronic Society*, 2012, ss. 1428-1432.
- [78] H. M. Pirouz ve M. T. Bina, "Extended modular multilevel converters suitable for medium-voltage and large-current STATCOM application," *IPEC 2010 Conference*, 2010, ss. 487-492.
- [79] İ. Çolak, E. Kabalci, ve R. B. Bayindir, "Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes," *Energy Conversion and Management*, ss. 1114-1128, 2011.
- [80] Anonim, (2019, 7 Şubat). [Online]. Erişim: http://www.emo.org.tr/ekler/ff6145a68189545_ek.pdf
- [81] A. Kumar ve G. Priya, "Power system stability enhancement using FACTS controllers," *International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, 2012, ss. 84-87.
- [82] G. Shaoyun ve T. S. Chung, "Coupled active power is patch with FACTS devices and specified power flow control constraints," *IET*, c. 2, ss. 678-683, 1997.
- [83] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, ve T. J. E. Miller, "8-transients studies of FACTS and custom power requirement," *Power Electronic Control in Electrical Systems*, ss. 290-372, 2002.
- [84] Q. Lu, W. Wang, C. Shen, S. Mei, M. Goto, ve A. Yokoyama, "Intelligent optimal seiving method FACTS device control in multi-machine system," *Electric*

Power Systems Research, c. 62, ss. 209-214, 2002.

[85] A. R. Messina, H. Hernandez, E. Barocio, M. Ochoa, ve J. Arroyo, "Coordinated application of FACTS controller to damp out inter-area oscillations," *Electric Power System Research*, c. 62, ss. 43-53, 2002.

[86] S. Behrens, S. O. R. Moheimani, ve A. J. Fleming, "Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller," *Journal of Sound and Vibration*, c. 266, ss. 929-942, 2003.

[87] R. Çöteli ve Z. Aydoğmuş, "DGM-STATCOM ile reaktif güç kompanzasyonu," *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic*, c. 10, sayı 2, ss. 123-128, 2007.

[88] H. Song, J. U. Lim, ve S. I. Moon, "Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security," *Electric Power Systems Research*, c. 70, ss. 7-15, 2004.

[89] N. P. Padhy ve M. A. A. Moamen, "Power flow control and solutions with multiple and multi-types FACTS devices," *Power Systems Research*, c. 74, ss. 341-351, 2005.

[90] N. G. Hingorani, "FACTS technology - State of the art, current challenges and the future prospects," *IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*, 2007.

[91] A. K. Pradhan, A. Routray, ve B. Mohanty, "Maximum efficiency of flexible AC transmission systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 28, ss. 581-588, 2006.

[92] S. Jiang, U. D. Annakkage, ve A. M. Gole, "A platform for validation of FACTS Models," *IEEE Transactions On Power Delivery*, c. 21, sayı 1, ss. 484-491, 2006.

[93] J. A. Dominguez-Navarro, J. L. Bernal-Agustin, A. Diaz, D. Requena, ve E.P. Vargas, "Optimal parameters of FACTS devices in electrical power systems applying evolutionary strategies," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 29, ss. 83-90, 2007.

[94] A. L. Abbate, G. Fulli, ve E. Handschin, "Economics of FACTS integration into the liberalised European power system," *IEEE Transactions On Power Systems*, ss. 885-890, 2007.

[95] J. Cardell, "A Real Time Price Signal for FACTS devices to reduce transmission congestion," *IEEE Transaction on Power System*, ss. 122, 2007.

[96] A. M. Simoes, D. C. Savelli, P. C. Pellanda, N. Martins, ve P. Apkarian, "Robust design of a TCSC oscillation damping controller in a weak 500 kv interconnection considering multiple power flow scenarios and external disturbances," *IEEE Transaction on Power System*, c. 24, sayı 1, ss. 226-236, 2009.

[97] H. M. Ayres, I. Kopcak, M. S. Castro, F. Milano, ve V. F. Da Costa, "A didactive procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices," *Simulation Modelling Practice and Theory*, c. 18, ss. 896-909, 2010.

[98] H. Mori ve H. Fujita, "Development of hybrid coded ESPO for optimal allocation of FACTS devices in certain smart grids," *Procedia Computer Science*, c. 6, ss. 429-434, 2011.

[99] M. Baysal, "Harmonik içeren güç sistemlerinin gerilim kararlılığının yük modelleri ve FACTS elemanları bakımından incelenmesi," Doktora tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.

- [100] A. M. Noman, A. A. Al-Shamma'A, K. E. Addoweesh, A. I. Alolah, ve A. A. Alabduljabbar, "A survey on two level and cascaded multilevel inverter topologies for grid connected PV system," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, China, 2017.
- [101] K. N. Nusair ve M. I. Alomoush, "Optimal reactive power dispatch using teaching learning based optimization algorithm with consideration of FACTS device STATCOM," *10th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEEEC)*, 2017.
- [102] Y. Yang, M. Kazerani, ve V. H. Quintana, "Current-source converter based STATCOM: modeling and control," *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 20, sayı 2, ss. 795-800, 2005.
- [103] D. Shen ve P. W. Lehn, "Modeling analysis and control of a current source inverter-based STATCOM," *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 17, sayı 1, ss. 248-253, No, 2001.
- [104] N. N. V. Surendra Babu ve B. G. Fernandes, "Cascaded two-level inverter-based multilevel STATCOM for high-power applications," *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 29, sayı 3, ss. 993-1001, 2014.
- [105] G. Burhan ve E. Muammer, "Cascaded multilevel converter-based transmission STATCOM: system design methodology and development of a 12 kV $\pm$ 12 MVar power stage," *IEEE Transaction on Power Electronics*, c. 28, sayı 11, ss. 4930-4950, 2013.
- [106] C. A. Sepulveda, J. A. Munoz, J. R. Espinoza, M. E. Figueroa, ve C. R. Baier, "FPGA v/s DSP performance comparison for a GKE based STATCOM control application," *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, c. 9, sayı 3, ss. 1351-1360, 2013.
- [107] S. Anand, B. G. Fernandes, ve K. Chatterjee, "DC voltage controller for asymmetric win converter topology based high power STATCOM," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, c. 60, sayı 1, ss. 11-19, 2013.
- [108] D. D. Sixing, L. Jinjun, L. Jiliang, ve H. Yingjie, "A novel dc voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter", *IEEE Transaction on Power Electronics*, c. 28, sayı 1, ss. 101-111, 2013.
- [109] T. Atalik, M. Deniz, E. Koç, C. O. Gerçek, B. Gültekin, M. Ermiş, ve İ. Çadırcı, "Multi DSP and FPGA based fully digital control system for cascaded multilevel converters used in FACTS applications," *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, c. 8, sayı 3, ss. 511-527, 2012.
- [110] X. Hailian, A. Lennart, ve N. Hans-Peter, "Design study of a converter interface interconnecting energy storage with the DC link of a STATCOM" *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 26, sayı 4, ss. 2676-2686, 2011.
- [111] W. Keyou ve L. C. Mariesa, "Power system voltage regulation via STATCOM internal nonlinear control," *IEEE Transaction on Power Systems*, c. 26, sayı 3, ss. 1252-1262, 2011.
- [112] G. Antonio ve L. Davide, "Two-leg three-phase inverter control for STATCOM and SSSC applications," *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 23, sayı 1, ss. 361-370, january, 2008.
- [113] Z. Liu, B. Liu, S. Duan, ve Y. Kang, "A novel DC capacitor voltage balance

control method for cascade multilevel STATCOM,” *IEEE Transaction on Power Electronics*, c. 27, sayı 1, ss. 14-27, 2012.

[114] S. Ronny ve J. Dragan, “Theoretical framework for minimizing converter losses and harmonics in a multilevel STATCOM,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 23, sayı 4, ss. 2376-2384, 2008.

[115] M. Youjie, C. Luwen, Z. Xuesong, ve G. Zhiqiang, “The discussion on static synchronous compensator technology,” *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, ss. 106-111.

[116] Q. Yu, P. Li, W. Liu, ve X. Xie, “Overview of STATCOM technology,” *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technology (DRPT2004)*, c.2, 2004, ss. 647-652.

[117] O. Ojo, “The Generalized Discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, c. 51, sayı 6, 2004.

[118] R. Çöteli ve Z. Aydoğmuş, “DGM STATCOM ile reaktif güç kompanzasyonu,” *Politeknik Dergisi*, c. 10, sayı 2, ss.123-128, 2007.

[119] M. Güteryüz, “FACTS cihazları ve rüzgar enerji santrallerinin gerilim kararlılığına etkilerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.

[120] W. Aslam, Y. Xu, A. Siddique, ve F. M. Albatsh, “Implementation of series facts devices SSSC and TCSC to improve power system stability,” *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2018.

[121] M. C. Tariq, N. Al-Emadi, S. A. Qureshi, Y. Y. Almula, A. J. Khan, ve S. K. Shah, “FACTS control devices (STATCOM, SSSC and UPFC) re-configuration techniques by PSIM/MATLAB,” *International Conference on Electrical Engineering Electrical Engineering, ICEE'07*, 2007.

[122] Z. Huang, Y. Ni, C. Shen, F.F. Wu, S. Chen, ve B. Zhang, “Application of unified power flow controller in interconnected power systems-modeling interfacing control strategy and case study,” *IEEE Transaction on Power System*, c. 15, ss. 817-824, 2000.

[123] A. M. Vural, K. Ç. Bayındır ve M. Tümay, “12 darbeli bir STATCOM için denetleyici ve filtre parametrelerinin simplex yöntemi ile optimizasyonu”, *Elektrik Elektronik Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği, 13. Ulusal Kongresi ve Fuarı*, 2009.

[124] G. S. Babu, R. Reddy, R. Nittala, ve K. S. Reddy, “Comparative analysis of control techniques for interline power flow controller,” *3rd International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2018*, 2018.

[125] L. Gyugyi, K. K. Sen, ve C. D. Schauder, “The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 14, sayı 3, ss. 1115-1123, 1999.

[126] A. Singh ve L. Mathew, “A review on real time simulation of UPFC,” *International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES)*, 2018, ss. 241-245.

[127] S. K. Gupta, M. Singh, ve H. D. Sharma, “Installation of UPFC for enhancing overall performance of electrical power system,” *Russian Electrical. Engineering*, c. 88,

sayı 5, ss. 314-320, 2017.

[128] S. M. Woo, D. W. Kang, W. C. Lee, ve D. S. Hyun, "The distribution STATCOM for reducing the effect of voltage sag and swell," *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver Industrial Electronics Society*, c. 2, 2001, ss. 1132-1137.

[129] H. F. Bilgin ve M. Ermiş, "Design and Implementation of a current-source converter for use in industry application of DSTATCOM," *IEEE Transaction on Power Electronic*, c. 25, sayı 8, ss. 1943-1957, 2010.

[130] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, ve T. J. E. Miller, *Power electronic control in electrical systems*, 1. Baskı, U.K: Newnes, 2001.

[131] A. K. Sahoo ve T. Thyagarajan, "Modeling of FACTS and custom power devices in distribution network to improve power quality," *Third International Conference on Power Systems*, Kharagpur, India, 2009, ss. 229.

[132] M. B. Latran ve A. Teke, "Güç kalitesi problemlerini düzelten dağıtım sistemine paralel bağlı evirici tabanlı kompanzatörlerin incelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi. Dergisi*, c. 29, sayı 4, ss. 793-805, 2014.

[133] N. Gupta, S. P. Dubey, ve S. P. Singh, "Neural network based active power filter for power quality improvement," *IEEE PES General Meeting Power and Energy Society General Meeting*, 2010.

[134] A. Tan, "Akım Kaynaklı Çevirgece Dayalı Endüksiyon Fırını için Güç Kalitesi Kompanzasyon Sistemlerinin Modellenmesi ve Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2011.

[135] İ. Atacak, F. Duran ve Ö. F. Bay, "Bulanık-PI denetimli üç fazlı paralel aktif güç filtresinin tasarımı," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2009.

[136] Y. Pal, A. Swarup, ve B. Singh, "A novel control strategy of three-phase, four-wire UPQC for power quality improvement," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, c. 7, sayı 1, , ss.1-8, 2012.

[137] S. Özçira, "Aktif güç filtre tipinin kompanze edilmesi gereken büyüklüğe göre belirlenmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 6, sayı 3, ss. 691-704, 2018.

[138] D. I. Narvaez ve M. G. Villalva, "Modeling and control strategy of a single-phase Uninterruptible Power Supply (UPS)," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM) Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, ss. 355-360, 2015.

[139] S. M. Sharkh, M. A. Abusara, G. I. Orfanoudakis, ve B. Hussain, "Power electronic converters for microgrids," *Master of Science in Electric Power Engineering*, 2014.

[140] A. Çetin ve M. Ermiş, "Reactive power compensation of coal conveyor belt drivesby using DSTATCOMs," *Industry Application Conference, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE*, 2007, ss. 1731-1740.

[141] N. Chang ve K. D. Yeh, "Design of DSTATCOM for fast load compensation of unbalanced distribution systems," *IEEE, PEDS*, 2008, ss. 801-806.

[142] S. Gürav ve H. T. Jadhav, "Application of DSTATCOM for load compensation with non-stiff sources," *International Conference for Convergence of Technology*, ss.1-

5, 2014.

- [143] G. Escobar, A. M. Stankovic, ve P. Mattavelli, "An Adaptive controller in stationary reference frame for DSTATCOM in unbalanced operation," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, c. 51, sayı 2, ss.401-409, April, 2004.
- [144] S. Chen ve Y. Y. Hsu, "A minimal harmonic controller for a STATCOM," *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, c. 55, sayı 2, ss. 655-664, 2008.
- [145] B. Singh, S. S. Murthy, ve S. Gupta, "STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generator feeding nonlinear loads," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, c. 53, sayı 5, ss. 1437-1452, 2006.
- [146] A. Rahmati, A. Abrishamifar, ve E. Abiri, "Sensorless direct power control for a DSTATCOM" *Universities Power Engineering Conference, 2006, UPEC '06, Proceedings of the 41st International*, 2006, ss.1001-1005.
- [147] G. Vincent, M. K. Mishra, ve K. Rao, "An improved switching strategy for a three-phase three-leg DSTATCOM," *Industrial Electronics Application, ICIEA 2008, 3rd IEEE Conference*, 2008, ss. 1169-1173.
- [148] R. K. Varma, S. S. Rangarajan, I. Axente, ve V. Sharma, "Novel application of a PV solar plant as STATCOM during," *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, ABD, 2011.
- [149] V. Purushothaman ve B. K. Mathew, "Voltage sag correction in distribution system using DSTATCOM with PI and hysteresis controllers," *International Conference on Magnetism, Machines&Drives (AICERA-2014 ICMMD)*, 2014.
- [150] M. M. Ertay, M. Dijle ve İ. Yücedağ, "Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM Topolojileri," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.20, sayı 2, ss. 265-279, 2016.
- [151] E. Deniz, "Beş seviyeli inverterlerin SDGM ile kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2005.
- [152] H. F. Bilgin ve M. Ermiş, "Design and implementation of a current-source converter for use in industry application of DSTATCOM," *IEEE Transaction on Power Electronic*, c. 25, sayı 8, ss. 1943-1957, 2010.
- [153] H. F. Bilgin, M. Ermiş, K. N. Köse, A. Cetin, İ. Çadircı, A. Açık, T. Demirci, A. Terciyani, C. Koçak, ve M. Yörükoğlu, "Reactive-power compensation of coal mining excavators by using a new generation STATCOM," *IEEE Transaction on Industry*, c. 43, sayı 1, 2007, ss. 97-110.
- [154] S. Tuncer, "Çok seviyeli inverterler ve DGM Teknikleri," *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, ss.18-24, 2004.
- [155] M. D. Siddique ve A. Sarwar, "Performance analysis of carrier based PWM technique for three level diode clamped multilevel inverter with different reference signals," *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, Bikaner, India, 2016.
- [156] Y. Chen, B. Mwinyiwiwa, Z. Wolanski, ve Z. B. T. Ooi, "Regulating and equalizing DC capacitance voltages in multilevel STATCOM," *IEEE Transaction on Power Delivery*, c. 12, sayı 2, ss. 901-907, 1997.
- [157] Y. Cheng ve M. L. Crow, "Diode clamped multilevel inverter for the STATCOM/BESS," *Power Engineering Society Winter Meeting*, c.1, 2002, ss. 470-475.

- [158] K. K. Mahajmra, A. Ghosh, ve S. R. Doradla, "Simplified model for control design of STATCOM using three level inverter," *TENCON '98, 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control*, c. 2, 1998, ss. 536-539.
- [159] Q. Qi, C. Yu, C. K. Wai, ve Y. Ni, "Modeling and simulation of a STATCOM system based on 3-level NPC inverter using dynamic phasors," *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, c.2, 2004, ss. 1559-1564.
- [160] C. Sharmeela, G. Uma, M. R. Mohan, ve K. Karthikeyan, "Multi-level distribution STATCOM forreducing the effect of voltage sag and swell," *2004 Intemational Conference on Power System Technology*, 2004, ss. 310.
- [161] H. K. Chiang, B. R. Lin, K. T. Yang, ve C. C. Yang, "Analysis and implementation of a NPC based DSTATCOM under the abnormal voltage conditions," *Industrial Technology 2005, ICIT 2005*, 2005, ss. 665- 670.
- [162] F. A. Okou, D. Dupuis, O. Akhrif, ve M. Tarbouchi, "A robust nonlinear controller for a STATCOM based on a 3-phase neutral point clamped converter," *Industrial Electronic, IECON '09, 35th Annual Conference of IEEE*, 2009, ss. 3623-3630.
- [163] M. Kedareswari, "Reduction of THD in diode clamped multilevel inverter employing SPWM technique," *International Journal of Scientific and Research Publications*, c. 3, sayı 6, ss. 1-4.
- [164] T. A. Meynard ve H. Foch, "Multi level conversion: high voltage choppers and voltage source inverters," *IEEE Power Electronic Specialists Conference*, 1992, ss. 397-403.
- [165] A. Nabae, I. Takahashi, ve H. Akagi, "A new neutral point clamped PWM inverter," *IEEE Transaction on Industry Application*, 1981, ss. 518-523.
- [166] A. Nordvall, "Multilevel inverter topology survey," Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Swedish, 2011.
- [167] S. P. Gawande, S. M. Pardeshi, S. G. Kadwane, M. R. Ramteke, M. B. Daigavane, P. D. Debre, ve B. Y. Bagde, "Capacitor voltage balancing techniques for three level capacitor clamped multilevel inverter under load compensation," *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) Power Electronics*, Nagpur, India, 2016.
- [168] A. Kazdaloğlu, B. Çakır, M. Demir, A. Güneroğlu, E. Özdemir ve M. Uçar, "Fotovoltaik elektrik üretim sistemlerinde kullanılan çok seviyeli eviricilerin incelenmesi," *4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 2011, ss. 48-53.
- [169] A. Shukla ve A. Joshi, "Static shunt and series compensations of an SMIB system using flying capacitor multilevel inverter," *IEEE Transactions Power Delivery*, c. 20, sayı 4, ss. 2613-2622, 2005.
- [170] A. Shukla, A. Ghosh, ve A. Joshi, "Hysteresis current control operation of flying capacitor multilevel inverter and its application in shunt compensation of distribution systems," *IEEE Transaction Power Delivery*, c. 22, sayı 1, ss. 396-405, 2007.
- [171] V. K. Rai, M. Gaharwar, R. Kumar, ve S. Saraswat, "Synchronous voltage source inverter using FCMLI," *Global Journals*, c. 11, sayı 2, ss. 11, 2011.

- [172] I. Khan, K. S. Verma, B. Balgopal, ve F. Faheemullah, "Static synchronous compensator (STATCOM) using FCMLI," *A devices for power system security and efficiency Enhancement, International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology*, 2011, ss. 444-449.
- [173] K. Viswanathan ve K. Madumathi, "A study of five level FCMLI based STATCOM," *International Journal of Research in Advent Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 367-374, 2014.
- [174] C. S. Lakshmi ve M. E. B. Gandhimath, "Multi level invertors for renewable energy," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, c. 3, sayı 1, ss. 1273-1279, 2014.
- [175] P. Duraisamy ve R. Gandhi, "Five level FCMLI based statcom for single machine infinite bus system," *International Journal of Intellectual Advancements and Research in Engineering Computations*, c. 3, sayı 3, ss. 144-150, 2015.
- [176] A. K. Panda ve Y. Suresh,, "Research on cascade multilevel inverter with single DC source by using three-phase transformers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 40, sayı 1, 2012.
- [177] E. Deniz, R. Çöteli, B. Dandıl, ve S. Tuncer, "Üç seviyeli H köprü tabanlı DSTATCOM'un tasarımı ve gerçekleştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 26, sayı 2, ss. 289-298, 2011.
- [178] A. Chen ve X. He, "Research on hybrid clamped multilevel inverter topologies," *IEEE Transaction on Industry Electronics*, c. 53, sayı 6, ss. 1898-1907, 2006.
- [170] M. A. Anadol, "Laboratuar ölçekli bir karma iletim hattında STATCOM kullanılarak sistem dinamik ve sürekli hal davranışlarının incelenmesi," Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2012.
- [180] T. An, M. T. Powell, H. L. Thanawala, ve N. Jenkins, "Assesment of two different statcom configurations for FACTS application in power systems," *IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON'98*, Beijing, China, c. 1, 1998, ss. 307-312.
- [181] M. Deniz, B. Gültekin, C. O. Gerçek, T. Atalik, İ. Çadırcı, ve M. Ermiş, "A new DC voltage balancing method for cascaded multilevel inverter based STATCOM", *ACEMP'07 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, Bodrum, 2007, ss. 532-535.
- [182] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. W. McKeever, ve J. A. V. Coevering, "Multilevel voltage source inverter with separate DC sources for static var generation," *IAS '95 Thirtieth IAS Annual Meeting*, Orlando, 1995, ss. 2541-2548.
- [183] L. K. Haw, M. S. A. Dahidah, ve H. A. F. Almurib, "SHE-PWM cascaded multilevel inverter with adjustable DC voltage levels control for STATCOM applications," *IEEE Transactions On Power Electronics*, c. 29, sayı 12, ss. 6433-6444, 2014.
- [184] L. K. Haw, M. S. A. Dahidah, ve H. A. F. Almurib, "A new reactive current reference algorithm for the statcom system based on cascaded multilevel inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 30, sayı 7, ss. 3577-3588, 2015.
- [185] [185] Anonim, (2019, 14 Haziran). [Online]. Erişim: <https://tr.electronics-council.com/essential-basics-total-harmonic-distortion-82341>

- [186] G. Subař, “Universal motorun PWM’li inverter ile denetimi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2000.
- [187] Anonim, (2019, 10 Mayıs). [Online]. Erişim:
<https://aktif.net/tr/Aktif-Blog/Teknik-Makaleler/Dc-Ac-Eviriciler-de-PWM>
- [188] B. İncekara, “PWM İnverterlerin İncelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2000.
- [189] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, ve M. A. Pérez, “A Survey on cascaded multilevel inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 57, sayı 7, July, 2010.
- [190] J. Kumar, P. Agarwal, ve B. Das, “Implementation of cascade multilevel inverter based STATCOM,” *IETE Journal Of Research*, c. 56, sayı 2, 2010.
- [191] J. Rodriguez, J. S. Lai, ve F. Z. Peng "Multilevel inverter: a survey of topologies, controls and applications", *IEEE Transaction Industriyel Electronics*, c. 49, sayı 4, 2002.
- [192] Y. Bhujangarao ve T. Bhavani, “Implementation of cascaded H bridge multilevel inverter for sinusoidal PWM controller fed induction motor drive,” *International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*, c. 8, sayı 9, ss.1870-1876, 2016.
- [193] N. O. Çetin ve A. M. Hava, “Çok seviyeli eviricilerde seviye kaydırmalı PWM anahtarlama yöntemleri,” *ELECO '2012 Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2012.
- [194] E. Deniz, “Beş seviyeli izole DC kaynaklı kaskat inverterin SPWM tekniği ile kontrolü,” *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 1-9, 2007.
- [195] P. Mishra ve K. Maheshwari, “LC filter design method for pulse width modulated inverter fed induction motor drive,” *2017 IEEE Transportation Electrification conference (ITEC-India)*, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Melek DİCLE
Doğum Tarihi ve Yeri :08.09.1976
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :melek_yildir@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Gazi Üniversitesi	2004
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Elektronik Öğretmenliği	Sakarya Üniversitesi	1999
Lise	Fen Bilimleri	Düzce Lisesi	1993

YAYINLAR

M. M. Ertay, M. Dicle ve İ. Yücedağ, “Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM Topolojileri,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.20, sayı 2, ss. 265-279, 2016.

M. Burunkaya, M.Dicle, “Yerleşik ve Gömülü Uygulamalarda Kontrol İşlemleri ve PC’de Yazı Yazmak İçin Kullanabilen Düşük Maliyetli Genel Amaçlı Bir Konuşma Tanılama Sistemi,” *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, c. 21, sayı 2, ss. 477-488, 2018.