

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR STATCOM
TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Yük. Müh. Kenan YANMAZ

**OCAK 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR STATCOM
TASARIMI VE UYGULAMASI**

Kenan YANMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 12 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 01 / 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Trabzon 2018

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Kenan YANMAZ Tarafından Hazırlanan

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR STATCOM
TASARIMI VE UYGULAMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 /01 /2018 gün ve 1735 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM

Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Üye : Prof. Dr. Murat EKİNCİ

Üye : Doç. Dr. Ahmet Faruk BAKAN

Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

30
E. Yanmaz
M. Ekinci
A. Bakan
H. Okumuş

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Elektrik enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin iyileştirilmesi veya geliştirilmesi önemli bir konudur. Rüzgar enerji sistemlerinde de bu güç kalitesinin iyileştirilmesi için kompanzasyon yapılmaktadır. Reaktif gücün elimine edilmesi, gerilimin istenilen seviyelerde tutulması ve frekans kontrolü gibi güç kalitesi problemlerinin ortadan kaldırılması veya belirtilen standartların altına düşürülmesi için STATCOM cihazı tasarlanmıştır ve başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu tez boyunca her türlü desteğini esirgemeyen danışman Hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım. Laboratuvar çalışmalarında ve diğer çalışmalarda her zaman yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte manevi olarak her zaman yanımda olan anneme, babama, kardeşlerime, eşim Ebru YANMAZ'a ve kızım Yaren YANMAZ'a minnettarım.

Bu tezde yapılan çalışmalar TÜBİTAK-114E474 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu tezin gerçekleştirilmesinde finansal katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Kenan YANMAZ
Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Küçük Ölçekli Rüzgar Enerji Sistemleri İçin Yeni Bir STATCOM Tasarımı ve Uygulaması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/01/2018

Kenan YANMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti	4
1.3. Rüzgar Türbini	10
1.4. STATCOM.....	13
1.4.1. STATCOM'un Matematiksel Modeli	16
1.4.2. STATCOM'un Kondansatör Değerlerinin Belirlenmesi	18
1.4.3. STATCOM'un Bağlantı Endüktansı Değerlerinin Belirlenmesi	18
1.5. Çok Seviyeli Eviriciler	20
1.5.1. Diyot Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler	24
1.5.2. Kondansatör Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler	26
1.5.3. Kaskad Çok Seviyeli Eviriciler	28
1.6. Evirici için Modülasyon Teknikleri	34
1.6.1. Düz Dizme (PD, Phase Disposition)	37
1.6.2. Ters Dizme (POD, Phase Opposition Disposition).....	38
1.6.3. Düz-Ters Dizme (APOD, Alternative Phase Opposition Disposition).....	38
1.7. Çok Seviyeli STATCOM İçin Denetim Yöntemleri.....	41
1.7.1. Doğrusal Denetim Yöntemleri	42
1.7.1.1. $p - q$ Teorili Denetim	42
1.7.1.2. dq Teorili Denetim.....	44
1.7.2. Doğrusal Olmayan Denetim Yöntemleri.....	46

1.7.2.1. Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma Tekniği	46
1.7.2.2. Histerezis Denetim	48
1.7.2.3. Öngörülü Denetim	50
1.8. Modifiye Edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici (MBMD).....	51
1.9. Model Öngörülü Denetleyici	56
1.10. Beş Seviyeli H-köprü Temelli STATCOM İçin Denetim Yöntemi Tasarımı.....	66
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	73
2.1. Benzetim Çalışmaları	73
2.2. Deneysel Çalışmalar	85
2.2.1. Deneysel Çalışma 1	97
2.2.2. Deneysel Çalışma 2	99
2.2.3. Deneysel Çalışma 3	104
2.2.4. Deneysel Çalışma 4	107
2.2.5. Deneysel Çalışma 5	108
3. SONUÇLAR	118
4. ÖNERİLER	119
5. KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR STATCOM
TASARIMI VE UYGULAMASI

Kenan YANMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2018, 126 Sayfa

Rüzgar enerji sistemlerinde güç kalitesinin geliştirilmesi önemli bir yer tutar. Güç kalitesini artırmak için geleneksel olarak kullanılan mekanik anahtarlamalı kondansatör gruplarının ve statik VAR kompanzatorlarının yerine günümüzde giderek yaygınlaşan Statik Senkron Kompanzator (Static Synchronous Compensator – STATCOM) kullanılmaya başlanmıştır. STATCOM iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesini iyileştirmek için kullanılan evirici temelli bir cihazdır. STATCOM cihazının denetimi için genellikle sabit parametrelili klasik PI denetleyiciler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, rüzgar enerji sistemlerinde kullanılacak olan STATCOM cihazı beş seviyeli H-köprü temelli gerilim kontrollü evirici yapısına sahiptir. Bu eviricinin ihtiyacı olan kapı darbelerini üretmek için senkron referans yapı teorili dolaylı akım denetim sistemi kullanılmaktadır. Bu akımların denetimi için de Modifiye edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici (MBMD) ile parametreleri anlık olarak belirlenen PI denetleyici tasarlanmıştır. Bu MBMD tabanlı PI denetleyici MBMD-PI olarak isimlendirilir. Bunun dışında MBMD ile Model Öngörülü Denetleyici (MÖD) karma yapısı da kullanılmıştır. Deneysel kurulumu tamamlanan ve çalıştırılan sistemden elde edilen sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerji sistemi, STATCOM, Bulanık mantık denetleyici, Model öngörülü denetleyici, 5 seviyeli H-köprü evirici

PhD. Thesis

SUMMARY

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SMART STATCOM IN SMALL SCALE
WIND ENERGY SYSTEMS

Kenan YANMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2018, 126 Pages

Power quality is an important issue in wind energy systems. Nowadays, Static Synchronous Compensator (STATCOM) has been used increasingly instead of traditionally used Static VAR Compensator and mechanically switched capacitor groups to improve the power quality. STATCOM is an inverter based device used to improve the power quality in transmission and distribution systems. Fixed parameter conventional PI controllers are usually used to control STATCOM devices. In this study, the STATCOM used in the wind energy system has a voltage-controlled inverter structure based on a five-level H-bridge. Indirect current control system with synchronous reference frame theory is used to produce gate pulses that is needed for the inverter. PI controller with parameters updated by a modified fuzzy logic controller is designed to control these currents. A model predictive controller is also used for comparison and validation purposes. The simulation results are compared with those of experimental results in order to test the modelling accuracy.

Key Words: Wind energy systems, STATCOM, Fuzzy logic controller, Model predictive control, 5 level H-bridge inverter

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Ana sistem tek hat diyagramı	3
Şekil 2. Rüzgar türbini emülatörü	13
Şekil 3. STATCOM yapısı ve gerilim/akım karakteristiği	15
Şekil 4. Basit yapı olarak STATCOM	16
Şekil 5. Üç-fazlı evirici	21
Şekil 6. Çok seviyeli eviricilerin sınıflandırılması	22
Şekil 7. Bir eviricinin bir faz bacağı: (a) İki seviyeli (b) üç seviyeli (c) n seviyeli	23
Şekil 8. Diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici	24
Şekil 9. Kondansatör kenetlemeli çok seviyeli evirici	26
Şekil 10. Kaskad H-köprü çok seviyeli evirici	29
Şekil 11. H-köprü bağlantısına dayalı çok seviyeli eviriciler	31
Şekil 12. Kaskad çok seviyeli eviricinin dalga şekli	32
Şekil 13. Beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısı	33
Şekil 14. Beş seviyeli evirici için dalga şekli	33
Şekil 15. SPWM dalga şekli	35
Şekil 16. Modülasyon tekniklerinin sınıflandırılması	37
Şekil 17. Düz dizme yöntemi grafiksel gösterimi	37
Şekil 18. Ters dizme yöntemi grafiksel gösterimi	38
Şekil 19. Düz-ters dizme yöntemi grafiksel gösterimi	39
Şekil 20. Beş seviyeli eviricinin tek faz çıkış gerilimi	39
Şekil 21. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için H-köprü çıkış gerilimleri	40
Şekil 22. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için birinci H-köprü anahtarlama durumları ...	40
Şekil 23. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için ikinci H-köprü anahtarlama durumları	41
Şekil 24. $p - q$ teorili denetim yöntemi genel blok diyagramı	43
Şekil 25. $p - q$ teorili denetim yöntemi akım denetim bloğu	44
Şekil 26. dq teorili denetim yöntemi genel blok diyagramı	45
Şekil 27. dq teorili denetim yöntemi akım denetim bloğu	46
Şekil 28. Giriş/çıkış doğrusallaştırma tekniği	47
Şekil 29. Histerezis denetimi (a) iki seviyeli (b) çok seviyeli	49

Şekil 30.	MBMD'nin temel yapısı (Altaş, 2017).....	52
Şekil 31.	Üçgen üyelik fonksiyonu.....	54
Şekil 32.	Durulaştırma işlemi	55
Şekil 33.	MBMD blok diyagramı	56
Şekil 34.	MÖD'nin temel yapısı	57
Şekil 35.	MÖD'nin öngörülen çıkış yörüngesi	57
Şekil 36.	Önerilen model öngörülü akım kontrol blok diyagramı	62
Şekil 37.	Gerilim vektörleri	65
Şekil 38.	MÖD akış diyagramı	65
Şekil 39.	STATCOM'lu sistem yapısı	67
Şekil 40.	d-p referans yapı teorili dolaylı akım denetim yöntemi.....	71
Şekil 41.	MBMD-PI Denetleyici	72
Şekil 42.	Benzetimi yapılan sistemin Matlab / Simulink Modeli	73
Şekil 43.	5 seviyeli STATCOM'un iç yapısı	74
Şekil 44.	5 seviyeli STATCOM'un anahtarlama sinyalleri üretim bloğu	74
Şekil 45.	MBMD-PI ile PI'lı dolaylı akım denetim yönteminin blok diyagramı	75
Şekil 46.	MBMD-PI denetim bloğunun içyapısı	76
Şekil 47.	Yük üzerindeki reaktif akım ile STATCOM reaktif akımı değişimleri	76
Şekil 48.	Kaynak akımının d ve q bileşenleri	77
Şekil 49.	Kaynak geriliminin ve akımının dalga şekilleri.....	77
Şekil 50.	STATCOM çıkış geriliminin ve akımının dalga şekilleri	78
Şekil 51.	STATCOM'un bir fazının gerilim değişimi	78
Şekil 52.	STATCOM'un DA-hat gerilim değişimi.....	79
Şekil 53.	MÖD-MBMD'li dolaylı akım denetim yönteminin blok diyagramı.....	80
Şekil 54.	STATCOM'un DA-hat gerilim değişimi.....	80
Şekil 55.	Yük üzerindeki reaktif akım ile STATCOM reaktif akımı değişimleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD	81
Şekil 56.	Kaynak akımının d ve q bileşenleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD	82
Şekil 57.	Kaynak akımının ve geriliminin dalga şekilleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD	83
Şekil 58.	STATCOM çıkış akımının ve geriliminin dalga şekilleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD	84
Şekil 59.	STATCOM'un bir fazının gerilim değişimleri.....	85
Şekil 60.	Rüzgar türbini emülatörü.....	86
Şekil 61.	(a) Gerilim sensör devresinin baskı devre hali (b) Gerilim sensör devresi	87

Şekil 62.	(a) Akım sensör devresinin baskı devre hali (b) Akım sensör devresi.....	88
Şekil 63.	dSPACE DS1104 kontrol kartı bağlantı paneli	89
Şekil 64.	(a) Ölü zaman devresinin baskı devre hali (b) Ölü zaman devresi.....	90
Şekil 65.	Anahtarlama sinyallerinin Simulink modeli	91
Şekil 66.	Anahtarlama sinyallerindeki ölü zaman gecikmesi (tek sinyal).....	91
Şekil 67.	Anahtarlama sinyallerindeki ölü zaman gecikmesi (terslenmiş iki sinyal)	92
Şekil 68.	Fazlar arası çıkış gerilimi değişimi.....	92
Şekil 69.	STATCOM gerilim kaynaklı evirici yapısı	93
Şekil 70.	STATCOM çıkışının bir fazının bir H-köprü gerilim değişimi.....	94
Şekil 71.	STATCOM'un çıkışının gerilim değişimi (faz-nötr)	94
Şekil 72.	STATCOM'lu sistemin genel görünümü	95
Şekil 73.	DeneySEL çalışma için hazırlanan sistemin Simulink modeli	95
Şekil 74.	STATCOM kontrol sistemi	96
Şekil 75.	DA-hat geriliminin değişimi.....	97
Şekil 76.	Yük üzerindeki gerilimin değişimi	97
Şekil 77.	Anahtarlama sinyalleri.....	98
Şekil 78.	STATCOM çıkış akımının bir fazının değişimi	98
Şekil 79.	STATCOM çıkış faz-faz geriliminin değişimi	98
Şekil 80.	STATCOM'un akımının q bileşeni ile yük akımının q bileşeni	99
Şekil 81.	DA-hat gerilimi değişimi.....	100
Şekil 82.	Ortak bağlantı noktasındaki gerilim değişimi.....	100
Şekil 83.	STATCOM çıkış akımının değişimi.....	100
Şekil 84.	Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin bir fazının dalga şekli (a) benzetim çalışması (b) dENEYSel çalışma.....	101
Şekil 85.	DA-hat gerilimi değişimi (a) benzetim çalışması (b) dENEYSel çalışma.....	102
Şekil 86.	STATCOM'un akımının q bileşeni ile yük akımının q bileşeni (a) benzetim çalışması (b) dENEYSel çalışma	103
Şekil 87.	STATCOM çıkış akımının değişimi (a) benzetim (b) dENEYSel.....	104
Şekil 88.	DA-hat gerilimi değişiminin dENEYSel dalga şekli.....	105
Şekil 89.	STATCOM çıkış akımının değişimi.....	105
Şekil 90.	Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin bir fazının dalga şekli	106
Şekil 91.	Modülasyon indeksinin dalga şekli	106
Şekil 92.	Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin ve akımın dalga şekli (STATCOM'suz).....	107

Şekil 93.	Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin ve akımın dalga şekli (STATCOM'lu)	107
Şekil 94.	Ortak bağlantı noktasındaki aktif ve reaktif güç değişimi (STATCOM'lu)...	108
Şekil 95.	MBMD-MÖD denetimli sistem yapısı	109
Şekil 96.	Kaynak akımının bir fazının değişimi	110
Şekil 97.	Yük akımının değişimi	110
Şekil 98.	Yükün aktif reaktif güç değişimleri	111
Şekil 99.	Reaktif güç değişimleri	111
Şekil 100.	STATCOM DA-hat gerilimi değişimi	112
Şekil 101.	MBMD-PI denetimli yük gerilimi ve akımı grafikleri	113
Şekil 102.	MBMD-PI denetimli kaynak gerilimi ve akımı grafikleri	114
Şekil 103.	MBMD-MÖD denetimli yük gerilimi ve akımı grafikleri	115
Şekil 104.	MBMD-MÖD denetimli kaynak gerilimi ve akımı grafikleri	116
Şekil 105.	MBMD-PI denetimli sistemde kaynak akımının FFT analizi	117
Şekil 106.	MBMD-MÖD denetimli sistemde kaynak akımının FFT analizi	117

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	3 seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları	25
Tablo 2.	5 seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları	25
Tablo 3.	3 seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin anahtar durumları.....	27
Tablo 4.	5 seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin anahtar durumları.....	27
Tablo 5.	3 seviyeli kaskad eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları	29
Tablo 6.	Beş seviyeli evirici için anahtarlama durumları	34
Tablo 7.	Kural tablosu.....	53
Tablo 8.	Anahtarlama durumları	64
Tablo 9.	Birinci benzetim çalışması için sistem parametreleri	75
Tablo 10.	İkinci benzetim çalışması için sistem parametreleri	79

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Rotor süpürme alanı (m^2)
AA	: Alternatif akım
ADC	: Analog-dijital dönüştürücü
APOD	: Faz düz-ters dizme (Alternative Phase Opposite Disposition)
A_c	: Taşıyıcı genliği
A_m	: Referans işaretin tepeden tepeye genliği
A_r	: Evirici çıkış geriliminin tepe genliği (V)
C	: Kapasite (F)
C_{DA}	: DA-hat kondansatörü (F)
DA	: Doğru akım
DAC	: Dijital-analog dönüştürücü
de	: Hata sinyalinin değişimi
du	: Kontrol sinyalinin değişimi
DSP	: Sayısal işaret işlemci (Digital Signal Processor)
DSTATCOM	: Dağıtım statik senkron kompanzatör (Distribution Static Synchronous Compensator)
e	: Hata sinyali
$e_i(t)$: Akım hatası
f_c	: Referans işaret frekansı (Hz)
f_r	: Evirici çıkış frekansı (Hz)
f_s	: PWM frekansı (Hz)
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems)
g	: Maliyet fonksiyonu
h	: Histeresiz bandı
H	: Eviricinin bir faz bacağı için seri bağlı hücre sayısı
I_c	: Evirici çıkış akımı (A)
I_{DA}	: Eviriciye doğru akan akım (A)
IEEE	: Uluslararası elektrik elektronik mühendisleri birliği (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
i_a	: Üç faz sistem akımı (A fazı) (A)

i_{abc}	: Üç faz sistem akımı
i_b	: Üç faz sistem akımı (B fazı) (A)
i_c	: Üç faz sistem akımı (C fazı) (A)
i_d	: Üç faz sistem akımının d bileşeni
i_{dq0}	: Üç faz akımının dq0 bileşeni
i_{lq}	: Yük akımının q bileşeni
i_q	: Üç faz sistem akımının q bileşeni
i_α	: Akımın α bileşeni
i_β	: Akımın β bileşeni
$i_{\alpha\beta}$: Yük akım vektörü
I_{rms}	: Üç faz sistem akımının etkin değeri (A)
i_{std}	: DA-hat kondansatörünün şarj/deşarj durumları için kullanılan aktif akım
i_{stq}	: Bağlantı endüktansına doğru akan reaktif akım
$i_{st}^{q,ref}$: STATCOM akımının q bileşeninin referans değeri
$i_{yük}^\alpha$: Yük akımının α bileşeni
$i_{yük}^\beta$: Yük akımının β bileşeni
$i_{yük}^q$: Yük akımının q bileşeni
i_{st}^{abc}	: Üç faz STATCOM akımı
K_D	: Türev katsayısı
K_i	: İntegral katsayısı
K_m	: Evirici geriliminin seviye kombinasyonlarının sayısı
K_p	: Oransal katsayı
K_{p_vd}	: Denetleyicinin gerilim katsayısı
K_s	: Evirici anahtarlama kombinasyonlarının sayısı
L	: Endüktans (H)
L_{st}	: Bağlantı endüktansının endüktans değeri (H)
m	: Evirici seviye sayısı
M	: Modülasyon indeksi
MBMD	: Modifiye edilmiş bulanık mantık denetleyici
MBMD-PI	: Modifiye edilmiş bulanık mantık denetleyici tabanlı PI
MÖD	: Model öngörülü denetleyici
M_a	: Evirici modülasyon indeksi

M_f	: Evirici frekans oranı
M_{max}	: Modülasyon indeksinin tepe değeri
M_0	: Modülasyon indeksinin kullanılan değeri
NK	: Negatif küçük
NB	: Negatif büyük
n_c	: Bir fazdaki hücre sayısı
p	: Aktif güç (W)
P	: Oransal
PB	: Pozitif büyük
PD	: Faz düz dizme (Phase Disposition)
PI	: Oransal-integral
PID	: Oransal-integral-türevsel
PK	: Pozitif küçük
POD	: Faz ters dizme (Phase Opposite Disposition)
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation)
P_{st}	: STATCOM çıkış aktif gücü (W)
P_R	: Rüzgardan elde edilen güç (W)
q	: Reaktif güç (VAr)
$q_{yük}$: Yükün reaktif gücü (VAr)
Q_{st}	: STATCOM çıkış reaktif gücü (VAr)
r	: Yük akımının en önemli harmonik bileşeni
R	: Direnç (Ω)
R_{st}	: Bağlantı endüktansının direnç değeri (Ω)
s	: Anlık güç (VA)
S	: Sıfır
S_a	: Anahtarlama fonksiyonu (A fazı)
S_b	: Anahtarlama fonksiyonu (B fazı)
S_c	: Anahtarlama fonksiyonu (C fazı)
S_d	: Anahtarlama fonksiyonu (d bileşeni)
S_q	: Anahtarlama fonksiyonu (q bileşeni)
SPWM	: Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation)
STATCOM	: Statik senkron kompanzatör (Static Synchronous Compensator)

X_{ac_pu}	: Bağlantı endüktansının reaktansı (per unit)
X_s	: STATCOM ile sistem arasındaki eşdeğer reaktans (Ω)
T	: Park dönüşüm matrisi
THD	: Toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion)
T_s	: Örnekleme zamanı (sn)
T_{vdad}	: Tercih edilen örnekleme zamanı
u	: Rüzgar hızı (m/sn)
$u(t)$: Evirici çıkışı
V_{DA}	: STATCOM evirici DA gerilimi (V)
V_{sa}	: Üç faz şebeke gerilimi (A fazı) (V)
V_{sb}	: Üç faz şebeke gerilimi (B fazı) (V)
V_{sc}	: Üç faz şebeke gerilimi (C fazı) (V)
V_{sd}	: Üç faz şebeke gerilimi (d bileşeni)
V_{sq}	: Üç faz şebeke gerilimi (q bileşeni)
V	: Gerilim vektörü
V_{pcc}	: Ortak bağlantı noktası gerilimi (V)
VSC	: Gerilim Kaynaklı Evirici (Voltage Source Converter)
V_{an}	: Evirici faz gerilimi (V)
V_{inv}	: Evirici gerilim değeri (V)
V_α	: Gerilimin α bileşeni
V_β	: Gerilimin β bileşeni
$V_{\alpha\beta}$: Evirici gerilim vektörü
V_{cr}	: Çift yönlü taşıyıcı işaret
V_r	: Sinüzoidal işaret
V_s	: Sistem gerilimi (V)
v_s^α	: Sistem geriliminin α bileşeni
v_s^β	: Sistem geriliminin β bileşeni
V_{st}	: STATCOM çıkış gerilimi (V)
V_{seb}	: Kaynak gerilimi (V)
V_s^{abc}	: Üç faz şebeke gerilimi (V)
Z_{COA}	: Alanların merkezi yönteminin çıkış değeri
Z_{st}	: Bağlantı endüktansının empedansı

ω	: Açısal hız (rad/sn)
ΔV_{pp}	: Üç faz sistem geriliminin tepeden tepeye değişimi (V)
Δp_{st}^{ref}	: STATCOM referans aktif güç değişimi
Δq_{st}^{ref}	: STATCOM referans reaktif güç değişimi
ΔI_r	: Maksimum akım dalgalanması (A)
ρ	: Rüzgar (hava) yoğunluğu (kg/m^3)
δ	: STATCOM çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz açısı
$\mu_A(x)$: Üyelik fonksiyonu



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

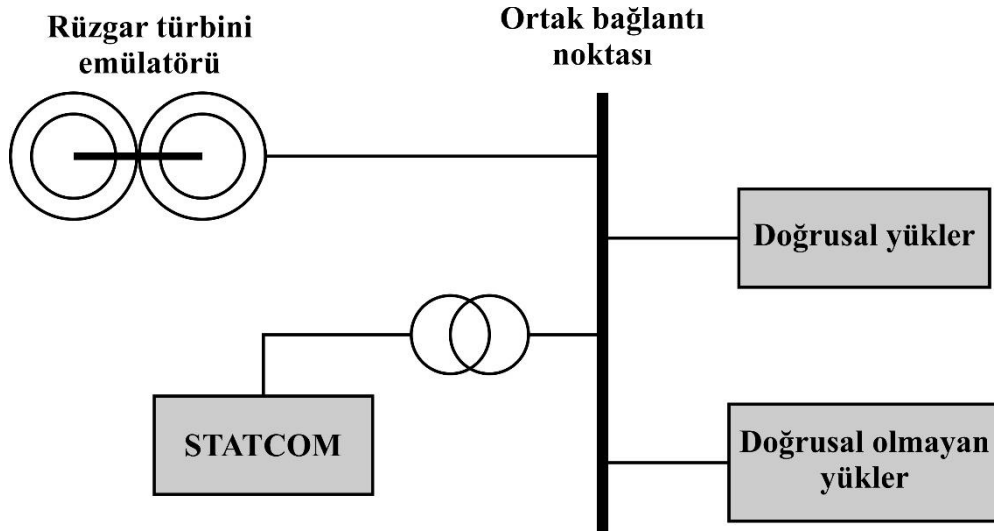
Reaktif güç kompanzasyonu tüm alternatif akım enerji sistemlerinde bir ihtiyaçtır. Reaktif güç, farklı güç kalitesi problemlerine sebep olduğu gibi kayıpların artmasına da neden olur. Yıllardır kullanılan statik var kompanzatorler ve sabit mekanik anahtarlamalı kondansatör grupları çok geniş bir kullanıma sahiptirler. Bu tip kompanzasyonlar boyutlarının büyük olması, kayıpların fazla olması ve cevap süresinin yavaş olması gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Günümüzde STATCOM gibi evirici tabanlı güç kalitesi iyileştirici cihazlar, hızlı cevap süresine, küçük boyutlara ve düşük kayıplara sahip olmalarından dolayı enerji iletim ve dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini iyileştirmek için önerilmektedir. STATCOM genel olarak alternatif akım sistemlerinde güç kalitesi iyileştirici bir Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems FACTS) cihazıdır. STATCOM yüklere paralel bağlı evirici tabanlı bir cihazdır. Bu cihaz, enerji sistemlerinde güç faktörü iyileştirme, yük dengeleme, gerilim regülasyonu ve harmonik eliminasyonu gibi görevleri yerine getirmek için kullanılmaktadır (Çetin ve Ermiş, 2009).

STATCOM'un denetiminde pek çok yöntem kullanılmaktadır (Kazmierkowski ve Malesani, 1998). Bu yapıda temel olarak bir adet gerilim kaynaklı evirici bulunmaktadır. Fakat bu evirici yapısı çok seviyeli yapılabildiği gibi farklı güç elektroniği bağlantı şekilleri ile değişik türlerde de yapılabilmektedir. Burada STATCOM'un denetimi için senkron referans yapı teorisine dayalı dolaylı akım denetim yöntemi kullanılmıştır. Bu denetimde, d ve q eksen akımları için istenilen değer genellikle doğrusal denetim yöntemi ile dizayn edilen PI denetleyiciden elde etmektedir. PI denetleyicilerin tasarımında kontrol edilen sistemin doğrusal matematiksel modeli gereklidir. Bu denetleyicilerin parametreleri işlemin kısmi bir bölgesi için en iyi performansı elde edebilmek için tasarlanır. Fakat değişken parametreler, yük bozucular ve sistemin doğrusal olmayan dinamikleri altında memnun edici bir performans elde etmek zordur. Doğrusal denetim yöntemlerinin dezavantajlarıyla başa çıkmak için bazı araştırmacılar doğrusal olmayan denetim yöntemleri önermişlerdir. Bazı denetim yöntemlerinin açık matematiksel modele ve denetim sisteminin parametrelerine ihtiyacı vardır. Bunun yanında bu yöntemlerle denetleyici tasarımı çok karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır ve doğrusal denetleyicilere göre anlaşılması daha zordur. Yakın zamanda

bulanık mantık denetleyici ve yapay sinir ağı gibi akıllı denetleyiciler, STATCOM'un denetiminde kullanılmak üzere, doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol tekniklerine alternatif olmaktadır. Kontrol edilmek istenen sistemin matematiksel modeli bazı denetleyiciler için gereklidir. Üstelik onlar sistemin çalışma şartlarının geniş bir aralığında klasik doğrusal denetleyicilerden üstün olarak daha etkin bir denetim sağlar.

Bu tezde elektrik güç sistemlerindeki reaktif güç kompanzasyonu, güç faktörünü iyileştirme, gerilim regülasyonu ve harmonik eliminasyonu gibi önemli güç kalitesi sorunlarının çözülmesi için kullanılan FACTS cihazlarından biri olan STATCOM cihazının denetimi için yeni bir MBMD-PI denetleyici tasarlanmıştır. STATCOM cihazı 24 adet yüksek güçlü IGBT elemanlarından oluşan beş seviyeli H-köprü temelli eviriciye sahiptir. Beş seviyeli H-köprü evirici, MBMD-PI kontrollü dolaylı akım denetim yöntemi yardımıyla kontrol edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinde kullanılacak olan STATCOM cihazının deneysel kurulumu yapılmış, STATCOM cihazının denetimi için de tasarlanan MBMD-PI denetleyici ile güç kalitesi problemlerinin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Yapılan bu yeni MBMD-PI denetleyici ile sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation-PWM) anahtarlama tekniği kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Bu sayede STATCOM'un sisteme reaktif güç alıp verebilme kapasitesi arttırılmış, Doğru Akım (DA) kondansatörünün boyutları küçültülmüş ve gerilim sabitlemiştir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi olan rüzgar enerjisinde FACTS cihazlarından STATCOM kullanımı konusu üzerine yoğunlaşmıştır. Kaynak olarak kullanılan rüzgar türbininden elde edilen gerilimin genliğinin ve frekansının ayarlanmasının yanında farklı denetim teknikleri kullanarak reaktif güç kompanzasyonu ile hattaki bu gücün denetimi üzerine çalışılmıştır. Sistem tamamen şebekeden bağımsız olarak çalışmaktadır. Sistemin ana yapısı Şekil 1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Ana sistem tek hat diyagramı

Sistemde rüzgar türbin emülatörü, çeşitli yükler, yüklerle paralel bağlı STATCOM ve STATCOM ünitesinin denetimini yapan bilgisayar destekli sürücü sistem bulunmaktadır. Sistem ile ilgili akım ve gerilim bilgileri veri aktarım kartı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayar sürücü devreye bu verilerden yola çıkarak sürme işaretlerini göndermektedir. Sürücü devre Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) tekniği ile sürülmektedir.

Bilgisayar ortamında tasarlanan denetleyici ile sistemin denetlenmesini sağlamak için bu bağlantıyı yapan veri aktarım kartına ihtiyaç vardır. Veri aktarım kartı olarak dSPACE firmasının dSPACE DS1104 ürünü kullanılmıştır. Sayısal işaret işlemci (Digital Signal Processor-DSP) tabanlı olan bu kartın MATLAB/Simulink desteği bulunmaktadır. Bu kart gerçek zamanlı çalışmaya da müsaittir. Kartta 8 adet ADC ve 8 kanal DAC bulunmaktadır. Bunun dışında 20 bit dijital giriş/çıkış ünitesi de mevcuttur.

Bu tip enerji üretim sistemlerinin tamamında genlik ve frekansın istenen değere ayarlanmasının yanında reaktif güç denetimi yapılmalı ve harmoniklerin azaltılması için gerekli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Bu maddelerin her biri ayrı bir konudur. Tasarlanan denetim sistemi ile tüm bu problemler aşılmaya çalışılmış ve yükler üzerindeki gerilim ve frekansın istenen değerde olması sağlanmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Elektrik enerjisi tüketimindeki sürekli büyüme bugünlerde karşı konulamaz bir gerçektir. Bu süreci devam ettirebilmek için yenilenebilir enerji kaynakları daha geniş alanda kullanılmalıdır. Bu akımın bir sonucu olan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin üretimi ve dağıtımı, her iki yöndeki akım iletiminin var olduğu güç şebekeleri için farklı problemlere yol açmaktadır. Artan ve çok sayıdaki yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtımı ile güç kalitesi problemleri artmaktadır. Bu makalenin ana amacı akıllı şebekelerde, esneklik, ölçeklenebilirlik, taşınabilirlik ve donanımsal olarak bağımsız olan, kontrol edilebilir, test edilebilir ve sistemler arası iletişimin kurulabileceği uygun bir sistem tanımlamaktır (Landsteiner vd., 2011).

Yüksek gerilim DA iletim ve FACTS cihazları ile birlikte yenilikçi çözümler, sistem planlamasındaki zorlukların üstesinden gelen ve iklim değişiklikleri ile mücadele için yeni imkanlar sunmaktadır. Bu makale temel sistem planlaması, modellemesi ve uzun iletim sistemlerine büyük rüzgar çiftlikleri bağlantısı ve bunun yanında yeni güç elektroniği teknolojisi için pratik uygulamalar sunmuştur (Felted vd., 2011).

Bu makale akıllı şebekelerde kararlılık ve etkinlik için bir modüle edilmiş güç filtresi kompanzatorü şemasını sunmaktadır. Modüle edilmiş güç filtresi kompanzatorü üç çevrimli dinamik hata sürücülü PID denetleyici ile denetlenebilir. Önerilen bu modüle edilmiş güç filtresi kompanzatorü bloğunun MATLAB ortamında yapılan benzetim modeli, etkin güç kalitesi gelişimini, gerilim kararlılığını ve iletim hattı kayıplarının azaltılmasını sağlamaktadır. Önerilen FACTS tabanlı şema yenilenebilir enerji kaynakları ile genişletilebilir ve diğer özel kararlılık ve kompanzasyon ihtiyaçlarına, gerilim regülasyonlarına kolayca modifiye edilebilir olduğu gösterilmiştir (Sharaf ve Abdelsalam, 2011).

Venayagamoorthy (2011), akıllı şebekeler konusunda yaptığı bu çalışmada dinamik, stokastik, sayısal ve ölçeklendirilebilir akıllı şebeke yapılarından bahsetmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun yanında FACTS cihazlarının eklenmesi ve sistemin değişik akıllı denetimlerinin nasıl yapıldığı ve tipleri hakkında genel bilgiler vermektedir. Makalede sonuç olarak akıllı şebekelerin klasik şebekelere göre zamanla değişen enerji kaynakları ve yeni dinamik yüklerin sisteme eklenmesi gibi nedenlerle çok daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu kanısına varılmıştır. Bu makalede iki tipik alan

sayısal zeka ve uyarlanabilir kritik tasarımlar akıllı şebekelerdeki karmaşık optimizasyon ve denetim problemlerinin çözümü için tartışılmıştır.

Sundareswaran vd. (2011) yaptıkları bu çalışmada, bir FACTS cihazı olan statik VAR kompanzatörü elemanını Uluslararası elektrik elektronik mühendisleri birliği (The Institute of Electrical and Electronics Engineers-IEEE) tarafından önerilen 30 baralı sistem için kullanmışlardır. Burada denetim tekniği olarak parçacık sürüsü optimizasyonunun geliştirilmiş şekli olan olasılıksal parçacık sürüsü optimizasyonu tekniği önerilmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucunda standart parçacık sürüsü optimizasyonu ile önerilen olasılıksal parçacık sürüsü optimizasyonu sonuçlarının aynı çıktığı gözlemlenmiştir.

Zhang (2008) bu makalede, FACTS ve dağıtık üretim teknolojilerinin şu anki durumunu gözden geçirmiştir. Dağıtık üretim ile akıllı şebekelerin denetiminde sürekli durum gerilim denetimi ve kararlılık denetimi bakımından kıyaslaması yapılmıştır.

Sharaf ve Aktaibi (2012) yaptıkları bu çalışmada dinamik FACTS tabanlı akıllı bir kararlı denetim stratejisi ve modüleli filtre kompanzatörü geliştirilmiştir. Kullanılan kaynaklar güneş enerjisi sistemi, yakıt pili ve rüzgar türbini gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Önerilen mikro şebeke tamamıyla bir DA barasında birleştirilmiştir. FACTS tabanlı bir filtre kompanzasyon şeması kullanılmıştır. Ortak DA baranın akıllı çok çevrimli hata sürücülü değişken yapılı sürme mod denetleyici ile etkin bir şekilde kararlılığı sağladığı gözlemlenmiştir.

Abdelsalam ve Sharaf (2012) bu makalede yeni bir FACTS tabanlı statik anahtarlama filtre kompanzatörü sunulmaktadır. Önerilen bu yapı akıllı dağıtım şebekeli rüzgar enerjisi için etkin güç kalitesi, gerilim kararlılığı, güç kaybının azalmasını ve güç faktörünün artmasını sağladığı Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim sonucunda görülmektedir. Bu FACTS cihazı üç çevrimli dinamik hata sürücülü Gerilim Kaynaklı Evirici (Voltage Source Converter, VSC) denetleyici tarafından denetlenmektedir.

Kara ve Yalçınöz (2005) yaptıkları bu çalışmada FACTS cihazlarından olan tristör anahtarlama kapasitörün ve tristör anahtarlama reaktör'ün davranışını uzun bir iletim hattının sonunda bulunan bir RL yükü üzerindeki gerilimin denetimi ve reaktif güç kompanzasyonu için Matlab/Simulink kullanılarak ve bir deney düzeneği vasıtasıyla incelemişlerdir. Aç-kapa denetimli olarak çalışan FACTS cihazlarından olan bu tristör anahtarlama reaktör ve tristör anahtarlama kapasitör ile gerilimin denetimi ve yük kompanzasyonu gerçekleştirildiği ve yük tarafına bakıldığında güç kalitesinin sağlandığı görülmektedir.

Üniversite araştırma laboratuvarları için Dong ve arkadaşları bir FACTS sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu FACTS sistemi STATCOM, statik senkron seri kompanzator ve birleşik güç akış denetleyicisi uygulamalarını içermektedir. Bu FACTS cihazlarının denetimi için DSP tabanlı yeni bir denetim sistemi metodu önerilmiştir. Deneysel ve benzetim çalışmalarının sonuçları önerilen denetim sistemini doğrulamaktadır (Dong vd., 2004).

Munoz vd. (2007) yaptıkları bu çalışmada, küçük ölçekli sistemler için bir FACTS cihazı uygulaması gerçekleştirmiştir. Laboratuvar ortamındaki prototipi üç küçük birimden oluşmaktadır. Bunlar statik Var kompanzatorü, iletim hattı modeli ve koruma cihazlarını olduğu bir sistemden oluşmaktadır. Kararlı durum ve dinamik analizler yapılarak teorik ve pratik olarak karşılaştırılmıştır.

Gyugyi (1994) yaptığı çalışmada, senkron gerilim kaynaklarının iletim sistemlerinde güç akışının gerçek zamanlı kontrolü ve dinamik kompanzasyon gerçekleştirilmiştir. Seri kompanzasyon, paralel kompanzasyon ve faz açısı denetimi için senkron gerilim kaynakları vasıtasıyla güç akış denetimi anlatılmıştır.

Wang vd. (2006) şönt kompanzasyonlu pi yapıdaki iletim hattının güç transfer yeteneği incelemiştir. Kullanılan pi modeline hat kayıpları ve kapasitesi ile kaynak empedansı da dahil edilmiştir. Şönt kompanzasyonun uzun iletim hattının orta noktasındaki etkisi incelenmiştir. Bunlara ilaveten şönt kompanzatorün iletim hattına bağlanması gereken en uygun yerin belirlenmesi de incelenmiştir.

Whaley vd. (2006) bu makalede sabit akım çıkış modlu sürekli mıknatıslı yüksek endüktanslı bir generatör tabanlı küçük ölçekli rüzgar türbinleri için yeni bir düşük maliyetli şebeke bağlantılı evirici önermektedirler. Generatör anahtarlamalı mod doğrultucu ile bağlıdır. Hat frekans komütasyonlu H-köprü evirici kullanılmıştır. Filtre kapasite değişiminin etkisini ve evirici akımının toplam harmonik bozulmasındaki çıkış gücü hesaplamaları için deneysel ve benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Bu makalede rüzgar enerji çevrim sistemleri üç ana başlık halinde incelenmiştir. Bu başlıklar rüzgar türbin generatörleri, güç elektroniği çeviricileri ve şebeke bağlantısı durumlarıdır. Rüzgar enerji çevrim sistemlerinin şebeke bağlantıları, hata kapasite durumları, harmonik emisyonları ve titreşimleri, güç kalitesi durumları gibi birçok durum tartışılmıştır (Kim ve Lu, 2010).

Bu makalede aktif güç filtresi için yedi seviyeli kaskad tipli evirici kullanılmıştır. İki seviyeli evirici için harmonik akımı çıkarım metodu olarak kapasitör gerilim denetim tekniği

kullanılması yedi seviyeli paralel aktif güç filtresi için genişletilmiştir. Çok seviyeli eviriciler için PWM tekniği olarak faz kaydırmalı uzay vektör modülasyonu kullanılmıştır. Önerilen yedi seviyeli paralel aktif güç filtresi yapılan benzetim ile doğrulanmıştır. Yeni öngörülü akım denetim tekniği ile yedi seviyeli bir paralel aktif güç filtresi sunulmuştur (Massoud vd., 2004).

Yük akımındaki harmonik bileşenlerin doğru tahmini uygun aktif güç filtresi için önemlidir. Bu makale güç şebekelerinde harmonik akım sinyalinin hızlı ve doğru tahmini için bulanık basamaklı uyarlanabilir en küçük ortalama kareler algoritmasını sunmaktadır (Qu, 2007).

STATCOM için iki yeni değişken yapıda bulanık denetim algoritmasının sunulduğu bu makalede amaç bir güç sisteminde STATCOM akımının reaktif bileşenlerini denetlemektir. Denetim sinyali generatör hız sapmasının bir kombinasyonundan elde edilmektedir ve STATCOM barası gerilim sapması da değişken yapıda bulanık denetleyiciyi beslemektedir. STATCOM bulanık reaktif akım denetleyicinin parametreleri bir kayan yüzey denetimi kullanılarak hata ve onun türevi yerine uyarlanmıştır. Bu kayan yüzey parametreleri ise kutup değiştirme tekniği kullanarak değiştirilebilmektedir. STATCOM için tasarlanan bu yeni bulanık denetleyiciler elektromekanik osilasyonların denetimi için geniş aralıklı kazanç değişimi sağlar. Bu yeni denetleyicilerin elektromekanik osilasyonların sönümlenmesinde önemli gelişmeler sağladığı görülmüştür (Morris vd., 2003).

Bu makalede gerilim beslemeli evirici kullanan bir STATCOM cihazının denetimini yapmak için doğrusal denetim teknikleri geliştirilmiştir. STATCOM için hızlı ve etkili bir reaktif akım denetimi yapmak amacıyla vektör denetim tabanlı iki yeni denetim yöntemi geliştirilmiştir. Evirici çıkış geriliminin genliği ve faz açısı denetimi ile sadece faz açısı denetimi olarak iki farklı evirici tipi önerilmiştir. Bu önerilen denetim yöntemlerinin cevap hızlarını artırmak amacıyla da sinüzoidal PWM tekniği kullanılmıştır. Yapılan analiz, iletim hatlarında harmonik gerilim bileşenleri için STATCOM cevabının hesaplanmasını sağlamıştır (Schauder ve Mehta, 1993).

Güç sistemi için STATCOM denklemleri doğrusallaştırılmış ve matematiksel bir model elde edilmiştir. Performans analizi ve denetim parametrelerinin hesaplanması açısından sistematik bir kural sağlayan yeni bir model geliştirilmiştir (Shen vd., 2000).

STATCOM için klasik PI denetim metodu değişken geribeslemeli denetim stratejileriyle karşılaştırılmıştır. Doğrusal denetim tabanlı kutup yerleştirme yöntemi bir güç sistemi örneği üzerinde uygulanmıştır. Geliştirilen geribeslemeli denetim tipleri

karşılaştırılmış ve bu yaklaşımın en önemli avantajı hemen hemen doğrusal davranış gösteren STATCOM cevabının etkin bir şekilde varlık gösteren doğrusal denetim metotlarıyla mümkün olduğudur (Rao vd., 2000).

Gerilim dalgalanmalarını azaltmak amacıyla Dağıtım STATCOM (DSTATCOM) denetimi için PI denetleyici kullanmışlardır. Akım denetimli PWM tabanlı DSTATCOM sisteminde gerilim dalgalanmalarını önlemek için çalışma yapılmış ve tartışılmıştır. Matlab güç sistemleri ara yüzü kullanılarak benzetim yapılmıştır. Benzetim sonucunda, dağıtım sistemlerinde hızlı cevaplı ve esnek denetimli DSTATCOM etkin bir gerilim dalgalanma önleyici olarak davranmıştır (Sun vd., 2004).

Moran vd. (1989) bu çalışmalarında güç faktörü kompanzasyonu için STATCOM uygulamalarında en çok tercih edilen sinüzoidal PWM anahtarlama tekniğini kullanan iki seviyeli evirici tabanlı 1kVA STATCOM prototipini geliştirmişlerdir. Sinüzoidal PWM tekniği ile elde edilen yüksek anahtarlama frekansı denetleyicinin cevap hızının artmasını sağlamıştır. Aynı zamanda sistemdeki filtre elemanlarının boyutlarının ve değerlerinin küçülmesini sağlamıştır.

Peng vd. (1996) bu çalışmalarında yüksek gerilim iletim sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu yapabilmek için çok darbeli gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM cihazına örnek olarak sinüzoidal PWM anahtarlama 11 seviyeli kaskat evirici tabanlı ve $\pm 1\text{kVAr}$ gücüne sahip bir STATCOM prototipini laboratuvar ortamında gerçekleştirmişlerdir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalardan biri olarak nitelendirilen bu makale aynı zamanda bundan sonraki çalışmalar için de büyük faydalar sağlamıştır.

Bu çalışmada FACTS denetleyicileri için sadece 3 darbeli bir anahtarlama oranında çoklu çeviriciler için faz kaydırmalı üçgen taşıyıcılı sinüzoidal PWM tekniği incelenmiştir. İletim sistemlerinde gerilim regülasyonu amacı ile gerilim kaynaklı çevirici tabanlı 5kVA bir STATCOM laboratuvar modeli geliştirilmiştir. Kullanılan 5kVA 4 modül 3 faz IGBT yarı iletken anahtarlarını sürmek için faz kaydırmalı sinüzoidal PWM tekniği önerilmiştir. Böylece evirici çıkışından klasik sinüzoidal PWM tekniğine göre daha düşük harmonik bozulmalı dalga şekilleri elde edilmiştir (Mwinyiwiwa vd., 1999).

Güç dağıtım sistemlerinde reaktif güç yönetimi, dağıtım geriliminin sabitlenmesi ve dağıtım kayıplarının azaltılması açısından önemli rol oynar. Yük kompanzasyonu ve güç faktörünün geliştirilmesi için iki-seviyeli evirici tabanlı $\pm 500\text{kVAr}$ bir DSTATCOM bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen DSTATCOM'da IGBT yarı iletken anahtarlar için PWM anahtarlama tekniği kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalar

sonucunda önerilen DSTATCOM reaktif güç alış verişini yapabilmenin yanı sıra güç faktörünü koruma yeteneğine de sahip olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir (Muni vd., 2003).

Evirici çıkışında daha düşük Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion-THD)'li ve daha yüksek gerilim elde edilmesini sağlayan uzay vektör PWM tekniği ise STATCOM/DSTATCOM uygulamalarında özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada STATCOM için uzay vektör PWM anahtarlama tekniği kullanılan bulanık denetleyici tabanlı yeni bir denetim şeması önerilmiştir. Bu denetim şemasında kullanılan histerezis akım denetimi tabanlı uzay vektör PWM tekniği ile hem evirici için anahtarlama sayısı hem de yüksek gerilim uygulamaları için anahtarlama frekansı düşürülerek bütün sistemin veriminin artırılması hedeflenmiştir (Marei vd., 2004).

Voraphonpiput ve Chatratana (2005) çalışmalarında uzay vektör teorisi tabanlı STATCOM'un matematiksel modelini vererek, STATCOM'un açık çevrim kararlılık ve dinamik modelini elde etmişlerdir. Bununla birlikte devredeki pasif elamanların kompanzatörün geçici ve sürekli durum performansı üzerine etkisini göstermek amacı ile uzay vektör PWM anahtarlama STATCOM'un ATP-EMTP kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Gerçekleştirilen kararlı durum analizi kullanılan DA kapasitenin büyüklüğü ile reaktif akım büyüklüğü arasında herhangi bir ilişki olmadığını göstermektedir.

Şebeke bağlantılı gerilim kontrollü eviriciler için akım ve gerilim kombinasyonlu geliştirilmiş DSP tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. İç döngüde öngörülü akım kontrol stratejisi ve dış döngüde bulanık gerilim kontrol stratejisi detaylı olarak tartışılmıştır. Evirici gerilimini hesaplayan yeni bir öngörülü akım kontrol ifadesi elde edilmiştir. Bu algoritma, çıkış akımı ile referans akım arasındaki kararlı durum faz hatasını yok edebilir ve sabit anahtarlama frekansı, örnek gecikme ve ayırık hesaplama nedenleriyle oluşan hataları kompanze edebilir (Yang vd., 2008).

Sundararajan vd. (2014) yaptıkları bu çalışmada, son yıllarda çok seviyeli kaskad H-köprü temelli evirici yapılarında kullanılmaya başlanan model öngörülü akım kontrol tekniğinin Matlab/Simulink ortamında benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Beş seviyeli kaskad bağlı H-köprü yapısına dayalı bir evirici yapısı kullanılmıştır. Farklı örnekleme zamanları kullanılarak model öngörülü akım kontrol tekniği bu evirici yapısına uygulanmıştır. Akım kontrolünün amacı yük akımını referans akım ile aynı seviyeye getirmek ve tutmaktır. Farklı örnekleme zamanları için yapılan denemeler sonucunda model

öngörülü akım kontrol tekniği ile yapılan kontrol sonucu yük akımının THD değerleri incelenmiştir ve yük akımını etkin bir şekilde kontrol ettiği grafiklerle gösterilmiştir.

1.3. Rüzgar Türbini

Dünyamızın enerji ihtiyacı için kullanılan fosil yakıtlar giderek tükenmektedir. Ayrıca bu fosil yakıtlardan enerji elde edilmesi sonucunda ortaya çıkan çevre kirliliği tartışılması gereken ve tartışılan en önemli konuların başında gelmektedir. Bu çevre kirliliğini dikkate aldığımızda yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ortaya çıkmaktadır. Dünyada ve dolayısıyla Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen yıl daha da artmaktadır. Rüzgar enerjisi bu yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir.

Rüzgar enerjisi, rüzgar vasıtasıyla dönen bir pervanenin bağlı bulunduğu generatör milinin döndürülmesi ile elektrik enerjisi elde etmek prensibine dayanır. Rüzgardan elde edilen güç Denklem (1)’de görüldüğü gibidir.

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (1)$$

Denklem (1)’de verilen ρ rüzgar (hava) yoğunluğu (kg/m^3), A rotor süpürme alanı (m^2) ve u ise rüzgar hızı (m/sn)’yi göstermektedir.

Rüzgar enerjisi yardımıyla mekaniksel dönüşüm elde edilir ve daha sonra bu mekaniksel dönüşümden yararlanılarak elektriksel dönüşüm elde edilir. Bu dönüştürme tekniğinden dolayı rüzgar enerji sistemlerinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre üstünlüğü işletme kolaylığının yanı sıra bakımının da kolay olmasıdır.

Rüzgar enerji sistemleri şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olarak iki farklı elektriksel uygulamaya sahiptir. Şebeke bağlantılı uygulamalarda rüzgar enerji sisteminden elde edilen gücün tamamı ya da bir kısmı şebekeye aktarılır. Bu aktarım sırasında rüzgar enerji sisteminden elde edilen elektriğin faz ve frekans bilgisi şebeke ile uyum sağlaması şarttır. Bunun için kullanılan generatörün hızının ve frekansının kontrol edilmesi gerekir. Şebeke bağlantısı olmayan uygulamalarında ise şebekeye hiç enerji verilmeden sisteme bağlı yükler beslenir.

Rüzgar türbinleri güçlerine göre sınıflandırıldığı gibi mekanik gövde yapısına göre de sınıflandırılabilir. Güçleri bakımından sınıflandırılırsa; küçük güçlü sistemler (Genellikle 0-

10kW gücündeki sistemler), orta güçlü sistemler (Genellikle 10-100kW gücündeki sistemler), büyük güçlü sistemler (100kW değerinden daha büyük olan sistemler) ve megawatt türbinler olarak ayrılabilirler. Mekanik gövde yapısına göre sınıflandırıldığında ise yatay eksenli rüzgar türbinleri ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olarak adlandırılırlar.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgarın yönüne paralel bir dönme eksenine sahiptir. Türbinin kanatları rüzgarın yönüne dik açı yapacak şekilde yapılandırılırlar. Rüzgarı ön taraftan alacak şekilde tasarlanırlar. Düşey eksenli rüzgar türbinlerine göre daha fazla tercih edilir. Yüksek hızlı rüzgar durumlarında kontrolü daha kolaydır ve böylece rüzgar türbininin zarar görmesi engellenebilir. Buna karşın dezavantaj olarak söylenebilecek şey türbinin devamlı rüzgara bakması gerektiği için bunu sağlayacak bir dümen sisteminin oluşturulması gerekmesidir.

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinde rüzgar her yerden gelebilir. Bu türbinlerde türbin kanatlarının güç üretebilmesi için rüzgardan daha hızlı dönmeleri gerekmektedir. Bu nedenden dolayı da ilk harekete geçişleri biraz sıkıntılıdır. Bu türbinlerde ayrıca türbinin makine parçaları ve generatör gibi bileşenler uygulandığı yerdeki toprak zemin üzerine kurulabilmesi bir avantaj olarak sayılabilir. Bu türbinlerin kanatları düşey konumdadır ve rüzgarın yönüne dik bir dönme eksenine sahiptir.

Rüzgar türbinleri kurulduğu bölgeye birden fazla sayıda yerleştirilerek daha fazla enerji elde edilebilir ve böylece şebekeye daha fazla enerji verilmesi sağlanmış olur. Bu tip uygulamalar literatürde rüzgar çiftliği olarak bilinir.

Türbinlerde genellikle 3 tip generatör kullanılmaktadır:

1. Senkron generatör
2. Asenkron generatör
3. Doğru akım generatör

Genellikle rüzgarın sürekli olduğu büyük güçlü uygulamalarda senkron generatörler, değişken rüzgar hızlarında ise doğru akım motorları ve asenkron generatörler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan generatör tipi asenkron generatördür. Bakım maliyetlerinin az oluşu ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Sincap kafesli ve rotoru sargılı olmak üzere iki çeşittirler. Bunların dışında değişik güç aralıklarında ve araştırma amaçlı diğer makine çeşitleri de kullanılmaktadır.

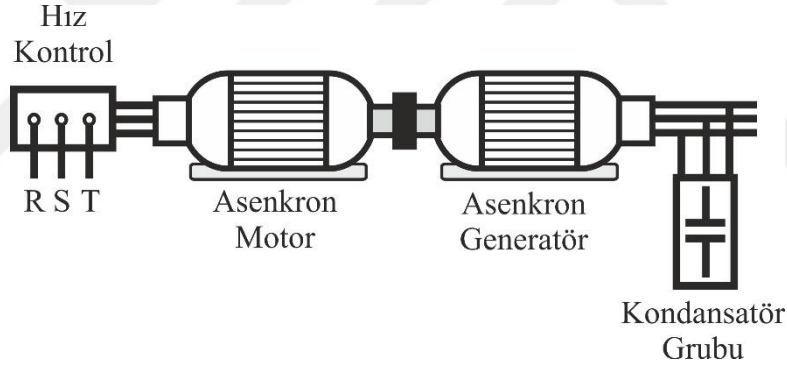
Rüzgar türbinlerini genel olarak sabit hızlı ve değişken hızlı olarak iki ana kategoride incelemek de mümkündür.

Sabit hızlı rüzgar türbinleri, genellikle şebekenin frekansıyla eşleşen sabit bir hız elde etmek için direk şebeke bağlantılı sincap kafes asenkron generatörlerini kullanırlar. Bu türbinlerin kullanım nedenleri olarak basitliği, yüksek verimliliği ve düşük bakım gereksinimleri sayılabilir. Asenkron generatör doğrudan şebekeye bağlandığında, rüzgar türbini, şebekeden uyarma akımının elde edilmesi gerekliliği nedeniyle şebeke üzerinde çok yüksek bir etkiye sahip olacaktır. Ayrıca, bir asenkron generatörünün tork-hız karakteristiği nedeniyle, rüzgar enerjisindeki dalgalanmalar bir ölçüde doğrudan şebekeye aktarılır. Bu dalgalanmalar, rüzgar türbininin şebekeye bağlantısı sırasında özellikle kritik hale gelir. Bu iki sorunun üstesinden gelmek için, sincap kafes asenkron generatörlü rüzgar türbinleri genellikle bir yumuşak anahtarlama mekanizması ve bir reaktif güç kompanzasyon ünitesi ile donatılmıştır. Sabit hızlı rüzgar türbinleri, özellikle alçak gerilim şebekelerinde ve rüzgar enerjisinin yoğun olduğu alanlarda kullanılır. Düşük ve yüksek rüzgar hızlarında sabit hızlı rüzgar türbin sistemlerini verimli bir şekilde çalıştırabilmek için genellikle kutup değiştirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu da generatörün frekansını etkilemeden farklı bir mekanik hızda çalışmasını sağlar. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinin bazı dezavantajları da vardır. Sabit hızda çalışması nedeniyle mevcut rüzgar enerjisi en uygun şekilde kullanılamaz. Bu konfigürasyonda doğal bir reaktif güç kontrol yöntemi olmadığından, reaktif gücün şebekeden çekilmemesi için yardımcı ekipmanlar kullanılmalıdır. Rüzgar hızındaki dalgalanmalara rağmen, generatör sabit bir hızda çalıştığı için üretilen gerilimin yanı sıra çıkış gücünde de dalgalanmalar olacaktır.

Değişken hızlı rüzgar türbinleri, sabit hızlı rüzgar türbinlerine göre daha yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Modern rüzgar çiftlikleri, çoğunlukla maksimum aerodinamik verimlilik koşulunu korumak için çalıştırılan değişken hızlı rüzgar türbinleri ile donatılmıştır ve bu nedenle maksimum güç her zaman gerçek rüzgardan alınabilir ve güç sistemine gönderilebilir. Bu çalışma stratejisi genellikle maksimum güç izleme olarak adlandırılmaktadır. Bu tip türbinlerde aktif ve reaktif gücün hızlı kontrolü sağlanabilir. Değişken hızlı rüzgar türbinleri sabit hızlı rüzgar türbinlerinden daha fazla enerji üretir ve güç dalgalanmalarını azaltmada ve reaktif güç kompanzasyonunda daha çok fayda sağlar. Ayrıca sabit hızlı rüzgar türbinlerine kıyasla titreşim değerleriyle ilgili değişken hızlı rüzgar türbinlerinin daha iyi performans sağladığı belirlenmiştir (Larsson, 2002). Değişken hızlı sistemlerde türbin rotoru, hızını değiştirerek mekanik güç dalgalanmalarını emmektedir. Böylece çıkıştaki güç eğrisi daha pürüzsüz olmaktadır ve bu da güç kalitesini büyük ölçüde

arttırmaktadır. Değişken hızlı türbinlerde değişken frekansta gerilim üretildiği için sabit frekanslı şebekeye bağlanmak için güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmalıdır.

Bu çalışma için laboratuvar ortamında bir rüzgar türbin emülatörü oluşturulmuştur. Rüzgar türbini, bir adet sürücü, bu sürücü ile sürülen bir adet asenkron motor ve bu asenkron motorun miline bağlı diğer bir asenkron generatör kullanılarak modellenmiştir. Böylece istenilen rüzgar hızına göre sistem ayarlanabilmektedir. Elde edilen güç yüklere aktarılmaktadır. Labaratuvar ortamında oluşturulan rüzgar türbin emülatöründe sincap kafesli asenkron motor ve generatörleri kullanılmıştır. Asenkron motor 22kW ve asenkron generatör ise 15kW gücündedir. Bu iki makine millerinden birbirine akuple edilmiştir. Şebekeden alınan 380V/50Hz gerilim ile sürülen bir asenkron motor sürücüsü 22kW'lık asenkron motora bağlanmıştır. Bu motorun miline bağlı olan 15kW'lık asenkron makine ise generatör olarak çalışmaktadır. Oluşturulan rüzgar türbini emülatörü Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Rüzgar türbini emülatörü

1.4. STATCOM

Alternatif akım iletim ve dağıtım sistemleri, güç akışındaki denetim sistemlerinin yeterli olmamasından dolayı esnek olmayan bir yapıdadırlar. Son birkaç on yılda güç elektroniği elemanlarının geliştirilmesiyle güç sistemlerinde FACTS kavramı sayesinde iletim sistemleri esnek yapıya dönüştürülmüştür. Güç elektroniği elemanları ve denetleyicilerle donatılmış alternatif akım iletim hatlarında, denetlenebilir olma özelliğini geliştirmek ve güç aktarım kapasitelerini arttırmak için kullanılan cihazlar FACTS olarak tanımlanabilir. Senkron kompanzatörlerde kondansatör ya da endüktans yerine gelişmiş yarı

iletken elemanlarının kullanıldığı çeşitli reaktif güç kompanzatorleri geliştirilmiştir. Tristör denetimli reaktörler ve tristör anahtarlamalı kondansatörler kullanılarak oluşturulan statik VAR kompanzatorü geliştirilmiştir. Bu cihazlarla donatılmış sistemdeki reaktif güç alış veriş, sistem gerilimindeki değişikliklerle değişim göstermektedir. Bu istenmeyen durum karşısında bu metotların yerine günümüzde STATCOM denilen statik kompanzatorler kullanılmaktadır. STATCOM, sistem geriliminden bağımsız olarak denetimi yapılabilen sisteme paralel olarak bağlanan bir statik senkron kompanzatorüdür. STATCOM'un hızlı cevap zamanına sahip olması, daha az yer gereksiniminin olması, yüksek işletme esnekliğine ve değişik çalışma şartlarında çok iyi bir dinamik karakteristiğe sahip olması gibi önemli özellikleri vardır.

Statik Senkron Kompanzator, şebeke frekansında bağlı olduğu sisteme sürekli olarak hem endüktif hem de kapasitif reaktif güç veren ya da sistemden reaktif güç çeken bir FACTS cihazıdır. STATCOM ile bağlı bulunduğu sistem arasındaki aktif ve reaktif güç alış veriş Denklem (2) ve Denklem (3) ile verilmiştir.

$$P_{st} = \frac{V_{st}V_s}{X_s} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q_{st} = \frac{V_s}{X_s} (V_s - V_{st} \cos \delta) \quad (3)$$

Burada V_s STATCOM'un bağlı bulunduğu sistem gerilimi, V_{st} STATCOM çıkış gerilimi ve δ ise STATCOM eviricisi çıkış geriliminin temel bileşeni ile sistem geriliminin temel bileşeni arasındaki faz açısıdır. X_s ise STATCOM ile sistem arasındaki eşdeğer reaktans değeridir. STATCOM ile sistem arasındaki aktif güç alışverişi sadece DA kondansatörü şarj veya deşarj etmek için yapılmaktadır. DA kondansatör gerilimini sabit tutmak için sistem ile aktif güç alışverişi yapılır. Eğer sistem gerilimi STATCOM geriliminden geride ise DA kaynaktaki aktif güç sisteme aktarılır.

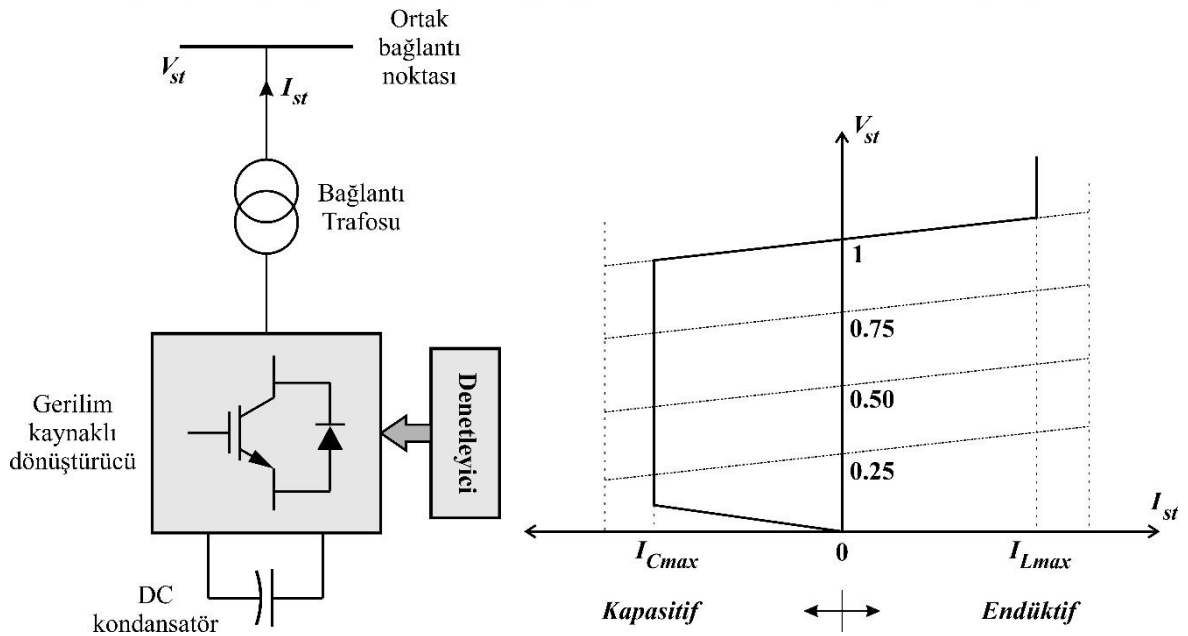
STATCOM çıkış geriliminin bağlı bulunduğu sistem gerilimine eşit olduğu durumda herhangi bir reaktif güç alışverişi yoktur. STATCOM çıkış geriliminin bağlı bulunduğu sistem geriliminden büyük olduğu durumda STATCOM'dan sisteme doğru bir bağlantı endüktansı aracılığıyla gecikmeli akım akışı oluşur. Bu durum kapasitif mod olarak tanımlanabilir. Bu durumun tam tersi durumunda ise yani STATCOM gerilimi sistem

geriliminden daha küçük olduğu durumda sistemden STATCOM'a doğru bir akım akışı oluşur. Bu durum ise endüktif mod olarak tanımlanabilir.

STATCOM, şebeke frekansında sinüzoidal gerilim üreten ve faz açısı ve genliği denetlenebilen paralel bağlı bir senkron gerilim kaynağı olarak tanımlanabilir. STATCOM'un, bağlı olduğu sistemin empedansını önemli ölçüde değiştirmemesi statik VAR kompanzatorlerinden ayıran en önemli özelliğidir. STATCOM'un temel yapısı Şekil 3'te görüldüğü gibidir.

STATCOM aşağıdaki elemanlardan oluşur:

- Güç yarıiletken anahtarlama elemanları ile oluşturulmuş bir üç fazlı gerilim kaynaklı evirici,
- Anahtarlama için bir denetleyici,
- Evirici yapısında bulunan anahtarlama elemanlarının neden olduğu değişen DA gerilimi sabit tutmak için enerji depolama elemanı olarak kullanılan DA kondansatörü,
- Evirici çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki bağlantıyı sağlayan bir bağlantı transformatorü (ya da endüktansı)



Şekil 3. STATCOM yapısı ve gerilim/akım karakteristiği

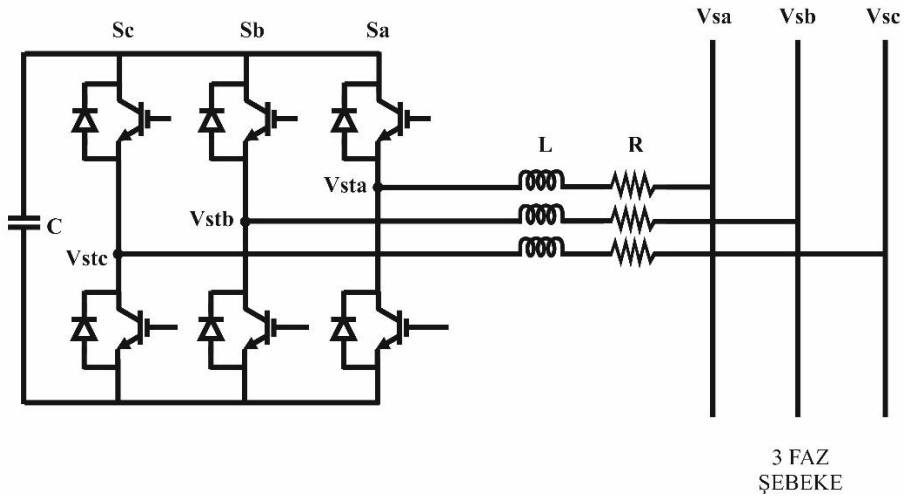
Daha hızlı çalışan güç elektroniği anahtarları, güç çevirici sistemlerinin performansını artırmak için kullanılmaktadır. VSC güç sistemlerinde güç kalitesini artırmak ve güç akışı

denetimini kolaylaştırmak için geniş bir kullanım alanına sahiptir. VSC'nin iki önemli güç kalitesi uygulaması vardır: Güç faktörü kompanzasyonunu yerine getiren STATCOM ve sistem harmoniklerini azaltan aktif güç filtresi. STATCOM'un en önemli elemanı gerilim kaynaklı eviricidir. VSC, DA kondansatör gerilimini Alternatif Akım (AA) sistem frekansı ile aynı frekansta, faz açısı ve genliği denetlenebilir üç fazlı AA gerilimine dönüştüren temel elemandır. VSC'nin, sistemin hızlı cevap zamanı, düşük harmonik bozulma, düşük çalışma kayıpları ve işletme güvenilirliği gibi istenilen ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla, farklı yapıda ve çok seviyeli türleri geliştirilmiştir.

STATCOM, iletim sistemlerinde sistemin kararlılığını geliştirmek ve gerilim düzenlemesini sağlamak için kullanılır. Dağıtım sistemlerinde ise gerilim düzenlemesinin yanında güç faktörü iyileştirme, yük dengeleme ve yükün harmonik eliminasyonu için kullanılabilir.

1.4.1. STATCOM'un Matematiksel Modeli

Şekil 4'te görülen STATCOM yapısında: C, DA tarafın kapasitesini; R, direnci; L, endüktansı; V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} , üç faz şebeke gerilimini temsil etmektedir. IGBT anahtarlama elemanları ideal ve üç faz şebeke gerilimi dengeli olarak kabul edilmiştir. Yüksek harmonikler de göz ardı edilmiştir.



Şekil 4. Basit yapı olarak STATCOM

ABC koordinat eksen şartları altında STATCOM matematiksel modeli Denklem (4)'te görülmektedir.

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = V_{sta} - Ri_a - V_{sa} \\ L \frac{di_b}{dt} = V_{stb} - Ri_b - V_{sb} \\ L \frac{di_c}{dt} = V_{stc} - Ri_c - V_{sc} \\ C \frac{dV_{DA}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \end{cases} \quad (4)$$

S_a, S_b, S_c anahtarlama fonksiyonlarıdır ve üstteki anahtarlar kapalı olduğunda 1, alttaki anahtarlar kapalı olduğunda 0 değerini alır.

ABC koordinat eksenindeki denklem denetim sistemi tasarımı açısından çok karmaşık bir denklemdir. Çünkü matematiksel modelin AA tarafındaki değişkenler zamana bağlıdır. Bu nedenle ABC koordinat eksenini PARK dönüşümü ile iki faz koordinat sistemine dönüştürülür. ABC koordinat ekseninin matrisi iki faz eş zamanlı olarak dönen koordinat eksenine Denklem (5)'teki PARK dönüşüm matrisi yardımıyla dönüştürülür.

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$i_{dq0} = T * i_{abc}$ olarak dönüşüm yapılır. Bu iki denklem kullanılarak (6) numaralı denklem elde edilir.

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = S_d V_{DA} - Ri_d - V_{sd} + L\omega i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = S_q V_{DA} - Ri_q - V_{sq} - L\omega i_d \\ C \frac{dV_{DA}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) \end{cases} \quad (6)$$

i_d ile i_q iki faz dönen koordinat ekseninin direk akım bileşenini, S_d ile S_q ise anahtarlama fonksiyonlarını temsil etmektedir. Böylece sistem eşitliği büyük oranda

basitleştirilmiştir. Anlık reaktif güç teoremine göre, güç sistemine gönderilen aktif güç $P = V_d i_d$ ve reaktif güç $Q = V_q i_q$ şeklinde elde edilebilir. Bu şekilde i_d ve i_q bileşenlerinin kontrol edilmesiyle güç şebekesine aktif ve reaktif güç gönderen sistemin dinamik kontrolü gerçekleştirilebilir.

1.4.2. STATCOM'un Kondansatör Değerlerinin Belirlenmesi

Temelde STATCOM'un pasif elemanları bağlantı endüktansı ve DA-hat kondansatörüdür. STATCOM'un performansı bu pasif devre elemanları tarafından etkilenmektedir. Eğer DA-hat geriliminde meydana gelen dalgalanmalar fazla ise STATCOM'un ürettiği ya da tükettiği reaktif güç miktarı sürekli değişecek ve eviricinin çıkış geriliminde bozulmalar oluşacaktır. Oluşturulan STATCOM'un deney düzeneğinde kullanılacak DA-hat kondansatörünün minimum değeri, Denklem (7) yardımı ile hesaplanabilir (Chong, 2006).

$$C_{DA} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{RMS}}{\omega \cdot \Delta V_{pp}} \left[1 - \sin\left(\arccos\left(\frac{M_{max}\pi}{4}\right)\right) \right] \quad (7)$$

Burada; I_{rms} üç faz sistem akımının etkin değerini, ΔV_{pp} üç faz sistem geriliminin tepeden tepeye değişimini, M_{max} ise modülasyon indeksinin tepe değerini ifade etmektedir. Denklem (7) kullanılarak DA-hat kondansatörünün minimum değeri yaklaşık 3,9mF olarak hesaplanmıştır ve hem benzetim çalışmalarında hem de deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 4,7mF değeri seçilmiştir. Referans DA gerilim değeri, $M = 0,88$ değerinde STATCOM'un şebeke ile herhangi bir reaktif güç alışverişi yapılmadığı durumda hesaplanmıştır. Şebekenin faz-faz gerilimi 380V ve $M = 0,88$ alındığında referans DA gerilim değeri $V_{DA} = 400V$ olarak elde edilir.

1.4.3. STATCOM'un Bağlantı Endüktansı Değerlerinin Belirlenmesi

STATCOM cihazlarının yapısında bulunan bağlantı transformatörünün ya da endüktansının gerekliliği aşağıdaki birkaç maddede belirtilmiştir.

- Dünya genelinde mevcut STATCOM sistem gerilimi 40kV değerinden düşüktür.
- STATCOM yüksek gerilim şebekelerine doğrudan bağlanamaz.
- Bağlantı endüktansı ya da transformatörü, STATCOM ile şebekeyi birbirine bağlayan iki yönlü güç akışı sağlayan ara cihazdır.
- Aynı zamanda filtre görevi görür.
- Gerilim, STATCOM sistemi tarafından denetlendiği için transformatör kademe değiştiricisine ihtiyaç yoktur.
- STATCOM uygulamasında bağlantı transformatörü hız açısından çok ağır kalmaktadır ve bu gereksinimleri karşılamak için özel olarak tasarlanmalıdır.
- Bağlantı endüktansı sistemin dinamik cevabını etkiler.
- Büyük değerli bir bağlantı endüktansı sistemin dinamik cevabını yavaşlatır.
- Küçük değerli bir bağlantı endüktansı ise evirici çıkış akımının harmoniğini kötüleştirir.
- Bağlantı endüktansının en uygun değeri sistemin dinamik cevabına ve evirici çıkışının harmonik içeriğine bağlı olarak belirlenmelidir.
- Bağlantı endüktansı bağlantı transformatörüne göre daha ucuzdur ve daha küçüktür.

Oluşturulan STATCOM deneysel kurulumunda evirici bir bağlantı endüktansı üzerinden rüzgar türbini emülatörüne bağlanmıştır. STATCOM'da her bir fazda iki adet H-köprü, her bir köprü 4 IGBT'den oluşan toplam 24 IGBT'li güç devresi kullanılmıştır. H-köprüdeki kondansatörlerin DA-hat gerilimi 200V'tur. Her bir faza ait gerilim değeri böylece 400V olmaktadır. Kullanılan IGBT modüller 1200V/75A'lik değere sahiptir. Her bir köprünün 400V değerine sahip olması nedeniyle IGBT'ler son derece rahat ve güvenli bir şekilde çalışmaktadır. Bunun sonucu olarak sistemde maliyetli, ağır ve büyük olan bağlantı transformatörü yerine daha ucuz, daha hafif ve daha küçük boyutlara sahip olan bağlantı endüktansı kullanılmıştır. Böylece aynı görev daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantı endüktansı rüzgar türbini ile STATCOM arasındaki reaktif güç alışverişini sağlayacaktır ve aynı zamanda da filtre görevini yerine getirecektir. STATCOM'da bağlantı endüktansı sistemin dinamik cevabını etkiler. Daha büyük değerli bir bağlantı endüktansı sistemin dinamik cevabını yavaşlatır, daha küçük değerli bir bağlantı endüktansı ise eviricinin çıkış akımının harmonik içeriğini kötüleştirir. Bağlantı

endüktansının en uygun değeri sistemin dinamik cevabına ve evirici çıkışının harmonik içeriğine bağlı olarak belirlenmelidir. Chong (2006) çalışmasında bağlantı endüktansının değerinin 0.1-0.2 pu arasındaki bir değeri alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Modülasyon indeksini kullanarak endüktansın reaktans değerini,

$$X_{ac_pu} = \frac{M_{max} - M_0}{M_0} \quad (8)$$

şeklinde hesaplamaktadır. (8) numaralı denklemde M_{max} , modülasyon indeksinin maksimum değeri; M_0 , modülasyon indeksinin kullanılan değeri ve X_{ac_pu} ise bağlantı endüktansının pu cinsinden reaktans değeridir.

$$\frac{V_{DA}}{8f_s(Seviye - 1)\Delta I_r} \leq L \leq \frac{V_{st} - V_s}{r\omega I_{st}} \quad (9)$$

Bağlantı endüktansının hesaplanması için kullanılabilecek bir başka formül ise Denklem (9)'da verilmektedir. Burada,

V_{DA} : Evirici DA gerilim değeri,

f_s : PWM frekansı,

ΔI_r : Maksimum akım dalgalanması,

V_{st} : Evirici gerilim değeri,

V_s : Şebeke gerilimi,

r : Yük akımının en önemi harmonik bileşeni,

ω : Açısal hız,

I_{st} : Evirici çıkış akım değeri (RMS)

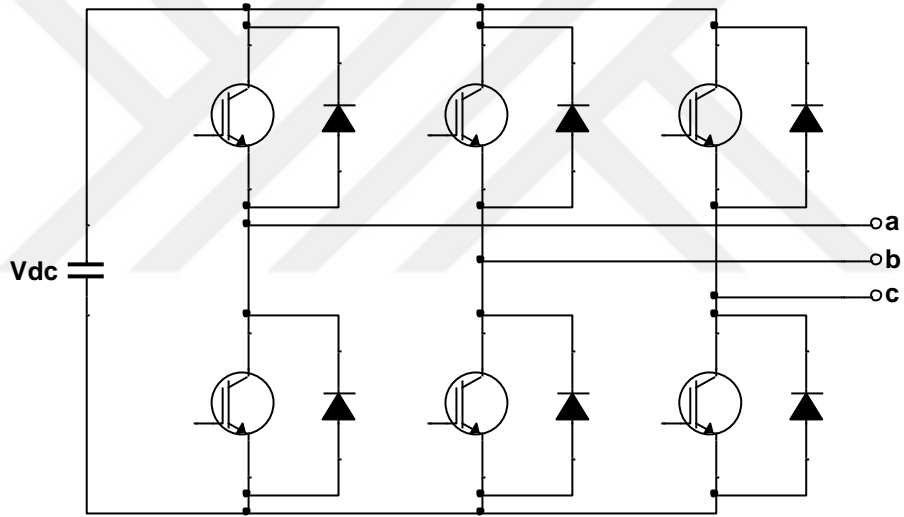
olarak tanımlanır.

1.5. Çok Seviyeli Eviriciler

Günümüz modern teknolojiye güç elektroniği çok önemli bir yere sahiptir ve ısı denetimi, ışık denetimi, motor denetimi, güç kaynakları, araç tahrik sistemleri ve FACTS gibi çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. Güç elektroniği devreleri aşağıdaki gibi 6 ayrı kategoriye ayrılabilir:

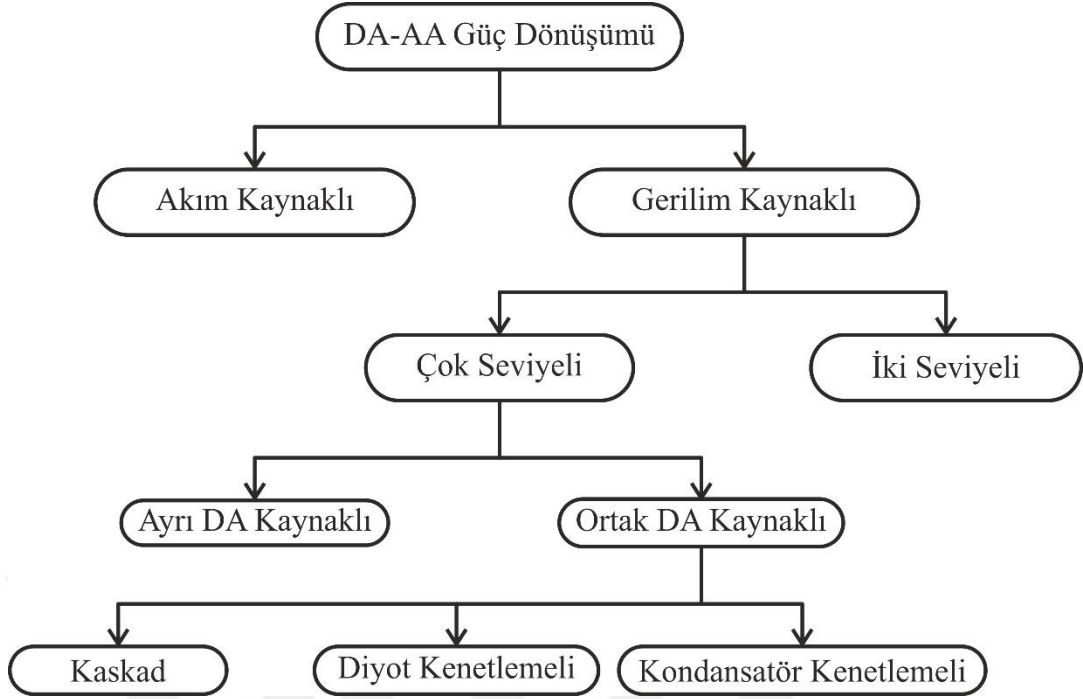
- Diyot dođrultucular
- AA-DA çeviriciler (denetimli dođrultucular)
- AA-AA çeviriciler (AA gerilim denetleyiciler)
- DA-DA çeviriciler (DA kıyıcılar)
- DA-AA çeviriciler (eviriciler)
- Statik çeviriciler

DA-AA çeviriciler, eviriciler olarak da bilinir. Bir eviricinin fonksiyonu, denetimli genlik ve frekansta bir AA gerilim ya da akım üretmektir. Tipik bir üç-fazlı evirici şeması Şekil 5'te görölmektedir.



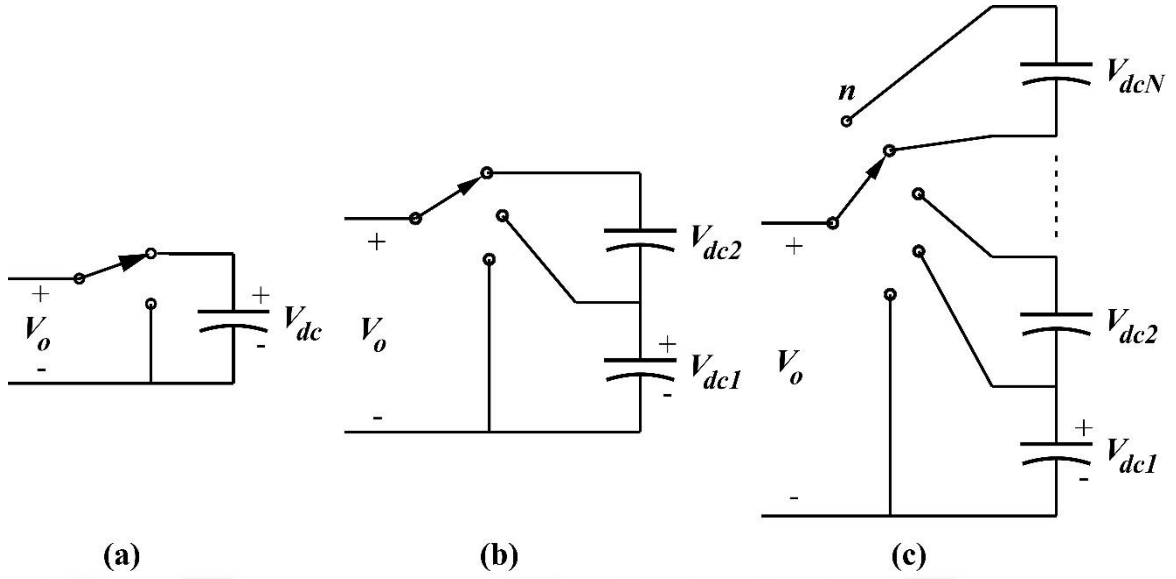
Şekil 5. Üç-fazlı evirici

DA-AA çeviricileri iki ana kategoride toplamak mümkündür. Şekil 6'da görüldüğü gibi bir sınıflandırma yapılabilir.



Şekil 6. Çok seviyeli eviricilerin sınıflandırılması

Çok seviyeli eviriciler birçok güç yarıiletkenlerinden ve kondansatör gerilim kaynaklarından oluşur. Çok seviyeli eviricilerin çıkış gerilimi anahtarlamalardan dolayı kondansatör gerilimlerinin toplamlarını içerir. Şekil 7, çok seviyeli eviricilerin bir faz bacağına diyagramını göstermektedir. Şekil 7 (a)'da görülen iki seviyeli evirici, tek kondansatör kullanarak iki seviyeli bir çıkış gerilimi üretir. Şekil 7 (b)'de görülen üç seviyeli evirici ise üç gerilim seviyesi üretir. Böylece düşük gerilimlerdeki güç yarıiletkenleri ile yüksek gerilimlere ulaşılabilir.



Şekil 7. Bir eviricinin bir faz bacağı: (a) İki seviyeli (b) üç seviyeli (c) n seviyeli

Çok seviyeli eviricilerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; diyot kenetlemeli çok seviyeli eviriciler (Nabae vd., 1981), kondansatör kenetlemeli çok seviyeli eviriciler (Lai ve Peng, 1996; Hochgraf vd., 1994), kaskad çok seviyeli eviriciler (Lai ve Peng, 1996; Hammond, 1997; Cengelci vd., 1999), hibrit çok seviyeli eviriciler (Lai ve Shyu, 2002; Liu ve Luo, 2005; Dixon ve Moran, 2002; Lee vd., 2002), geliştirilmiş çok seviyeli eviriciler (Peng, 2001), karışık seviyeli çok seviyeli eviriciler (Hill ve Harbourt, 1999), yumuşak anahtarlama çok seviyeli eviriciler (Song vd., 2001) vb. şeklindedir.

Çok seviyeli evirici ailesi yüksek güç uygulamalarına çözüm getirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, elektrikli araç tahrik sistemleri, aktif güç filtreleri, gerilim çökmeleri için kompanzatorler, fotovoltaik sistemler ve dağıtım güç sistemleri gibi orta ve düşük güç uygulamalarında da düşük maliyet ve etkin çözümler nedeniyle çok seviyeli evirici uygulamalarının kullanımları yaygınlaşmıştır.

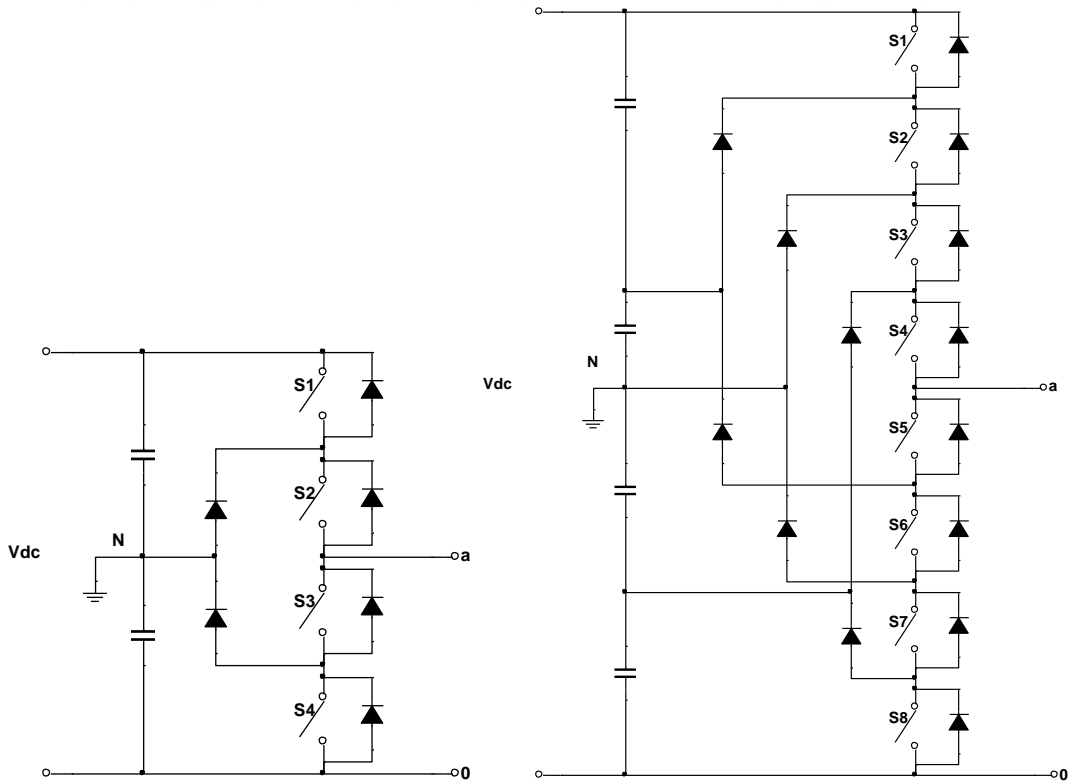
Bu çok seviyeli eviricilerin en çok kullanılanları

- Diyot kenetlemeli çok seviyeli eviriciler (diode clamped (neutral point clamped) multilevel inverter)
- Kondansatör kenetlemeli çok seviyeli eviriciler (capacitor clamped (flying capacitor) multilevel inverter)
- Kaskad çok seviyeli eviriciler (cascaded H-bridge multilevel inverter)

1.5.1. Diyot Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler

Literatürde çok seviyeli evirici yapısı ilk olarak 1981 yılında Nabae vd. tarafından tanıtılmıştır ve bu çalışmalarında üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici topolojisi kullanmışlardır. Sonraki çalışmalarda ise kullanılan bu topoloji altı seviyeli çıkış dalga şekline sahip diyot kenetlemeli evirici olarak düzenlenmiştir ve değişken frekanslı motor sürücü devreleri ve STATCOM gibi bazı endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır (Peng vd., 1996; Joos vd., 1997; Menzies ve Zhuang, 1995; Tolbert vd., 2002; Corzine ve Familant, 2002). Diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici yapısında genel olarak seri bağlı kondansatörlere ihtiyaç vardır. DA tarafta bulunan ve DA gerilimden çok seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için kullanılan bu seri bağlı kondansatörlerin sayısı ise m seviyeli bir evirici için genelde $m-1$ adet olması gerekir.

Şekil 8’de bir faz için 3 seviyeli ve 5 seviyeli diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici yapıları görülmektedir. Tablo 1’de 3 fazlı 3 seviyeli, Tablo 2’de ise 3 fazlı 5 seviyeli diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici yapılarının tek fazı için çıkış gerilim seviyeleri ile anahtarlama durumları görülmektedir.



Şekil 8. Diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici

Tablo 1. 3 seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları			
	S1	S2	S3	S4
$V_{DA}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{DA}/2$	0	0	1	1

Tablo 2. 5 seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
$V_{DA}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{DA}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{DA}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{DA}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Avantajları:

- Seviye sayıları yeterince yüksek olduğunda, harmonik içeriği filtre ihtiyacından kaçınmak için yeterince düşük olacaktır.

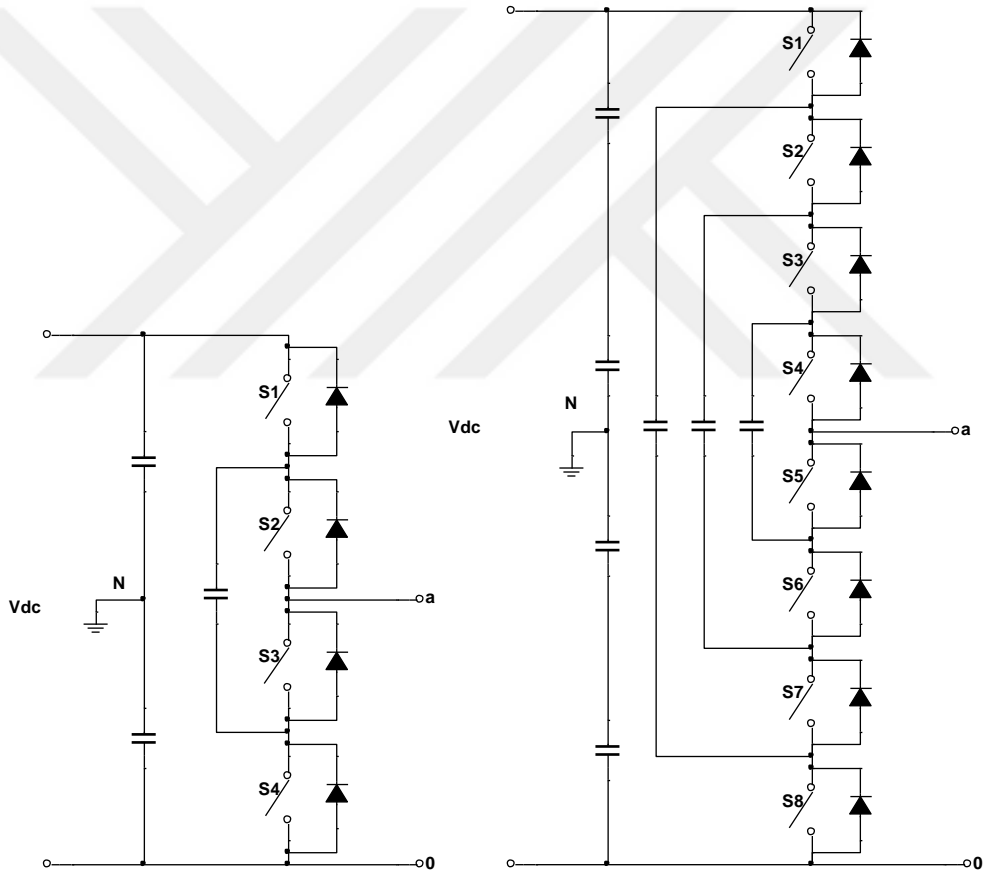
- Verimi yüksektir çünkü bütün elemanlar temel frekansta anahtarlanmaktadır.
- Reaktif güç akışı denetlenebilir.

Dezavantajları:

- Seviye sayısı arttığında lüzumsuz fazla kenetleme diyotları kullanılmaktadır.
- Aktif güç akış denetimi yapmak zordur.

1.5.2. Kondansatör Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler

Şekil 9’da bir faz için 3 seviyeli ve 5 seviyeli kondansatör kenetlemeli çok seviyeli evirici yapıları görülmektedir. Tablo 3’te 3 fazlı 3 seviyeli, Tablo 4’te ise 3 fazlı 5 seviyeli kondansatör kenetlemeli çok seviyeli evirici yapısının tek fazı için çıkış gerilim seviyeleri ile anahtarlama durumları görülmektedir. Diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici yapısı ile karşılaştırmak gerekirse m seviyeli bir evirici için genelde $(m-1)$ adet ana kondansatöre ve bunların yanında fazladan yardımcı kondansatöre de ihtiyaç vardır.



Şekil 9. Kondansatör kenetlemeli çok seviyeli evirici

Tablo 3. 3 seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin anahtar durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları			
	S1	S2	S3	S4
$V_{DA}/2$	1	1	0	0
0	1	0	1	0
	0	1	0	1
$-V_{DA}/2$	0	0	1	1

Tablo 4. 5 seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin anahtar durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
$V_{DA}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{DA}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
	0	1	1	1	0	0	0	1
	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	1	1
	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	0	0	1	0	1	1	0
	0	1	0	1	0	1	0	1
	0	1	1	0	1	0	0	1
$-V_{DA}/4$	1	0	0	0	1	1	1	0
	0	0	0	1	0	1	1	1
	0	0	1	0	1	0	1	1
$-V_{DA}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Avantajları:

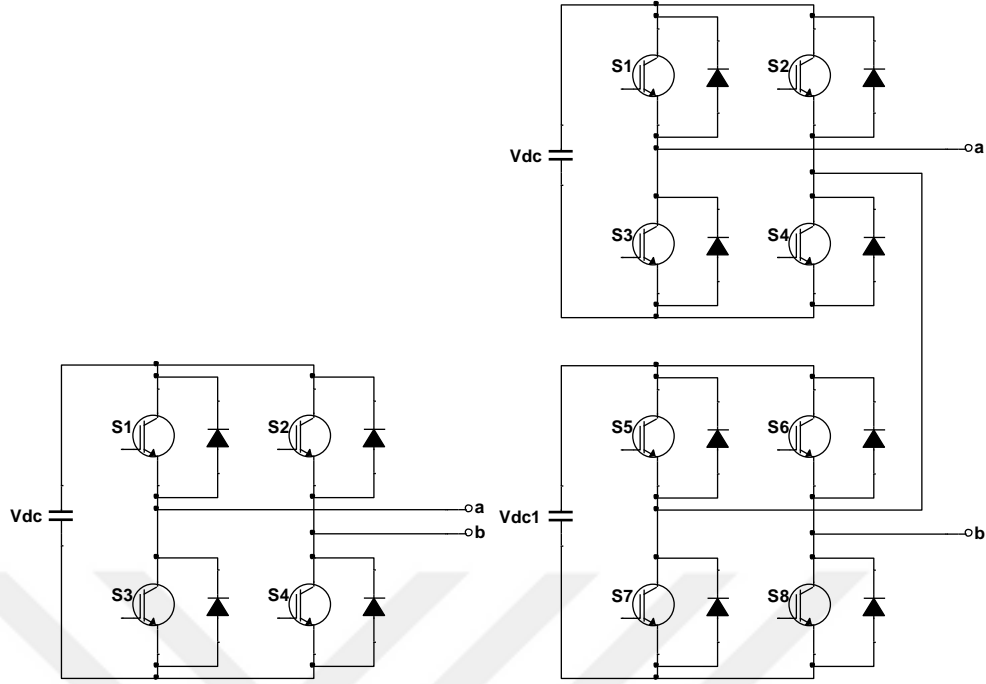
- Büyük miktardaki depolama kondansatörleri güç kesintisi sırasında ekstra kapasite sağlar.
- Farklı gerilim seviyelerini dengelemek için daha fazla anahtarlama kombinasyonu sağlar.
- Seviye sayıları yeterince yüksek olduğunda, harmonik içeriği filtre ihtiyacından kaçınmak için yeterince düşük olacaktır.
- Yüksek gerilim DA iletim için mümkün olan bir gerilim kaynaklı evirici yaparak hem aktif hem de reaktif güç akışı denetlenebilir.

Dezavantajları:

- Seviye sayısı yüksek olduğunda gereksiz fazla sayıda depolama kapasiteleri ihtiyacı vardır. Yüksek seviyeli sistemleri paketlemesi zordur ve ihtiyaç olan devasa kapasiteleri çok pahalıya mal olmaktadır.
- Evirici denetimi çok karmaşık olmaktadır ve anahtarlama frekansları ile anahtarlama kayıpları aktif güç iletimi için yüksek olacaktır.

1.5.3. Kaskad Çok Seviyeli Eviriciler

Şekil 10'da bir faz için 3 seviyeli ve 5 seviyeli kaskad H-köprü çok seviyeli evirici yapıları görülmektedir. Tablo 5'te 3 fazlı 3 seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısının tek fazı için çıkış gerilim seviyeleri ile anahtarlama durumları görülmektedir.



Şekil 10. Kaskad H-köprü çok seviyeli evirici

Tablo 5. 3 seviyeli kaskad eviricinin çıkış gerilimi ve anahtar durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları			
	S1	S2	S3	S4
$V_{DA}/2$	1	0	0	1
0	1	1	0	0
0	0	0	1	1
$-V_{DA}/2$	0	1	1	0

Avantajları:

- Aynı gerilim seviye sayısını başarmak için diğer tüm çok seviyeli eviricilere göre en az eleman sayısı kullanılmaktadır.

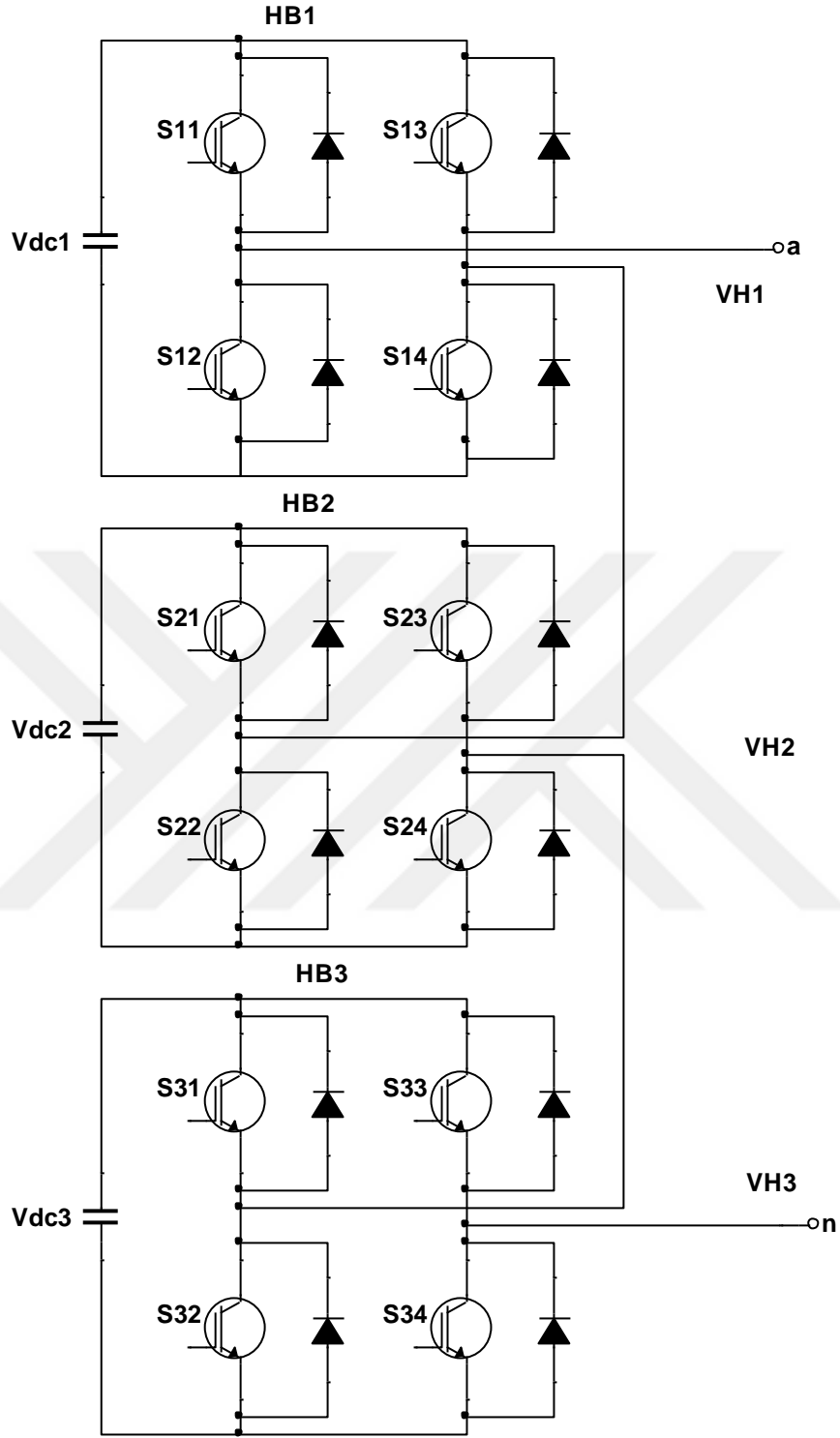
- Modüler devre modeli ve paketlenmesi mümkündür çünkü her seviye aynı elemanlara sahiptir ve ekstradan kenetleme diyotlarına veya gerilim dengeleme kondansatörlerine ihtiyaç yoktur.

- Bu yapıda kocaman ve kayıplı direnç-kondansatör-diyot söndürücülerinden kaçınmak için yumuşak anahtarlama kullanılabilir.

Dezavantajları:

- Aktif güç alışverişi için ayrı DA kaynağına ihtiyaç vardır ve böylece uygulamaları biraz daha limitlidir.

Kaskad çok seviyeli eviricilerin temel yapısı H-köprü (H-Bridge, HB) bağlantısına dayanır. Şekil 11’de her faz için 3 adet olmak üzere H-köprülü çok seviyeli bir eviricinin bir faz bacağının güç devresi görülmektedir. Her H-köprü ayrı bir DA kaynak tarafından beslenir. Faz gerilimi ise farklı H-köprüler tarafından üretilen gerilimlerin toplamıyla oluşturulur. Eğer H-köprülerin DA link gerilimleri aynı ise çok seviyeli eviriciye kaskad çok seviyeli evirici denir. H-köprü DA link gerilimlerinin birbirlerinden farklı olması durumunda ise hibrit çok seviyeli evirici olarak bilinir.

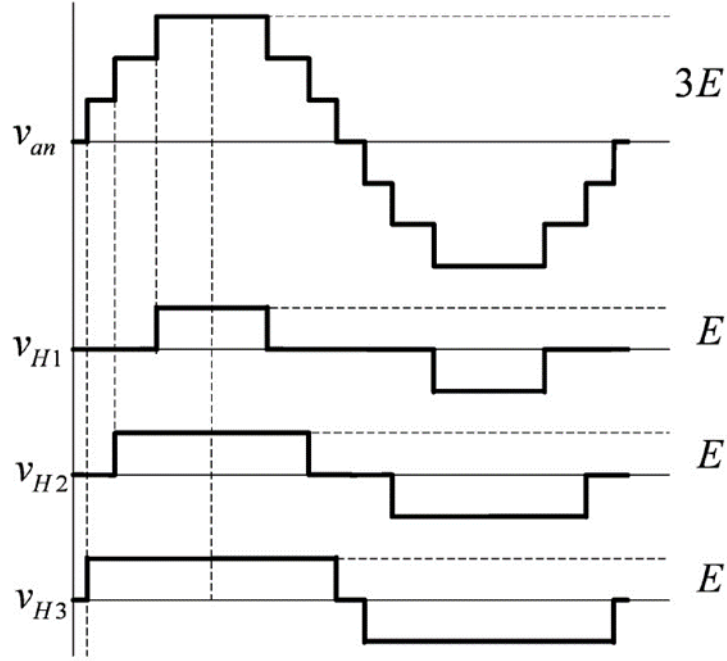


Şekil 11. H-köprü bağlantısına dayalı çok seviyeli eviriciler

Şekil 11'den hareketle kaskad çok seviyeli eviricilerde H- köprü DA-hat gerilimleri aynı ise,

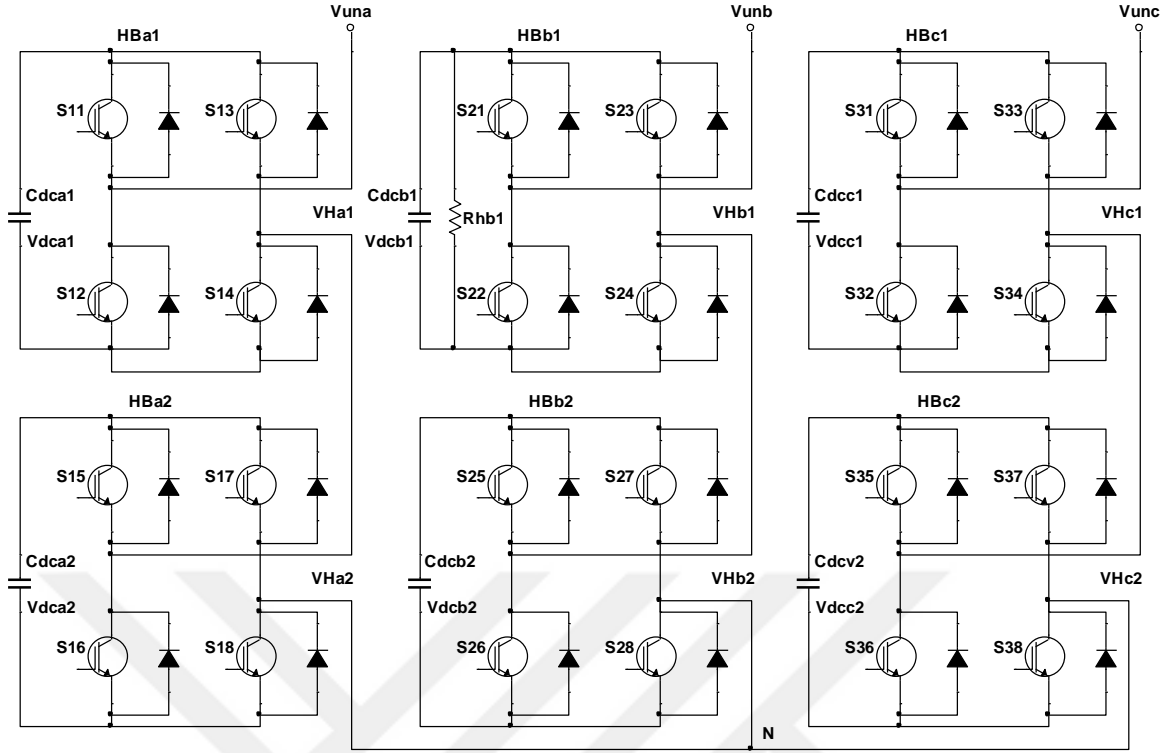
$$V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = E$$

olur. Burada E birim gerilimdir. Her H-köprü çıkışında üç gerilim üretilir: $+E$, 0 ve $-E$. Bu kondansatörlerin artarda güç anahtarları vasıtasıyla AA tarafa bağlanmasıyla mümkündür. Çıkış AA gerilimi Şekil 12’de görüldüğü gibi $-3E$ ile $+3E$ arasında yedi seviye olarak değişir.

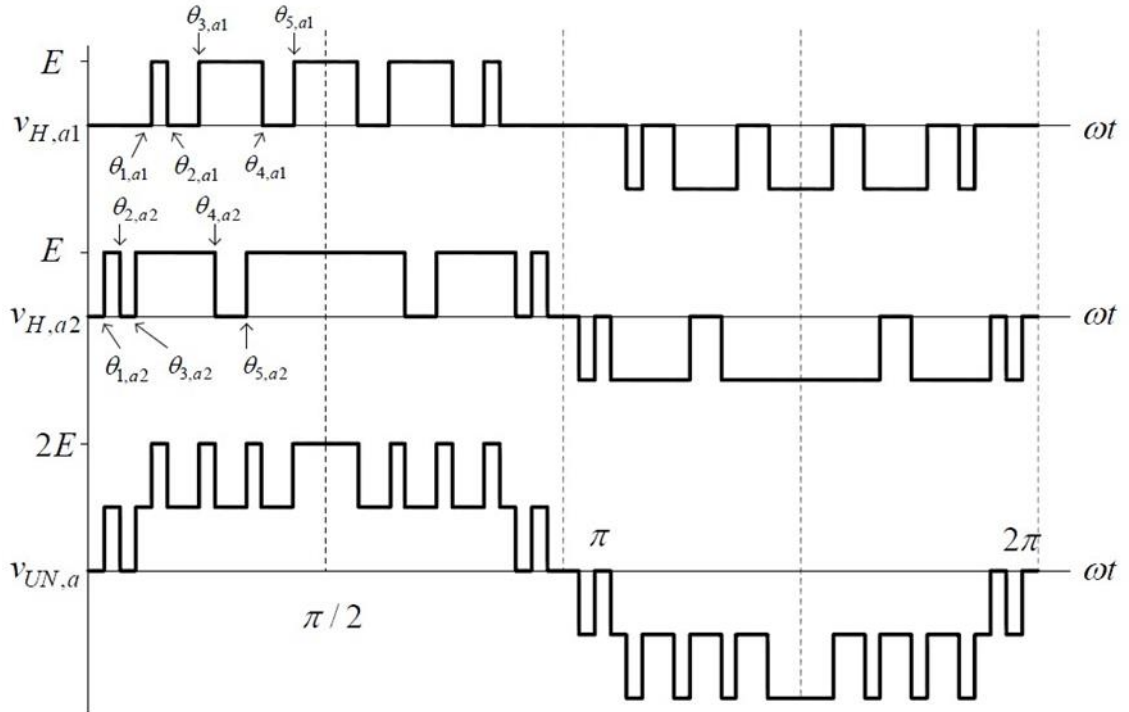


Şekil 12. Kaskad çok seviyeli eviricinin dalga şekli

Şekil 13’te üç faz beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısı görülmektedir. Şekil 14’te ise beş seviyeli evirici için dalga şekli görülmektedir.



Şekil 13. Beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısı



Şekil 14. Beş seviyeli evirici için dalga şekli

Tablo 6’da beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici için anahtarlama durumları görülmektedir.

Tablo 6. Beş seviyeli evirici için anahtarlama durumları

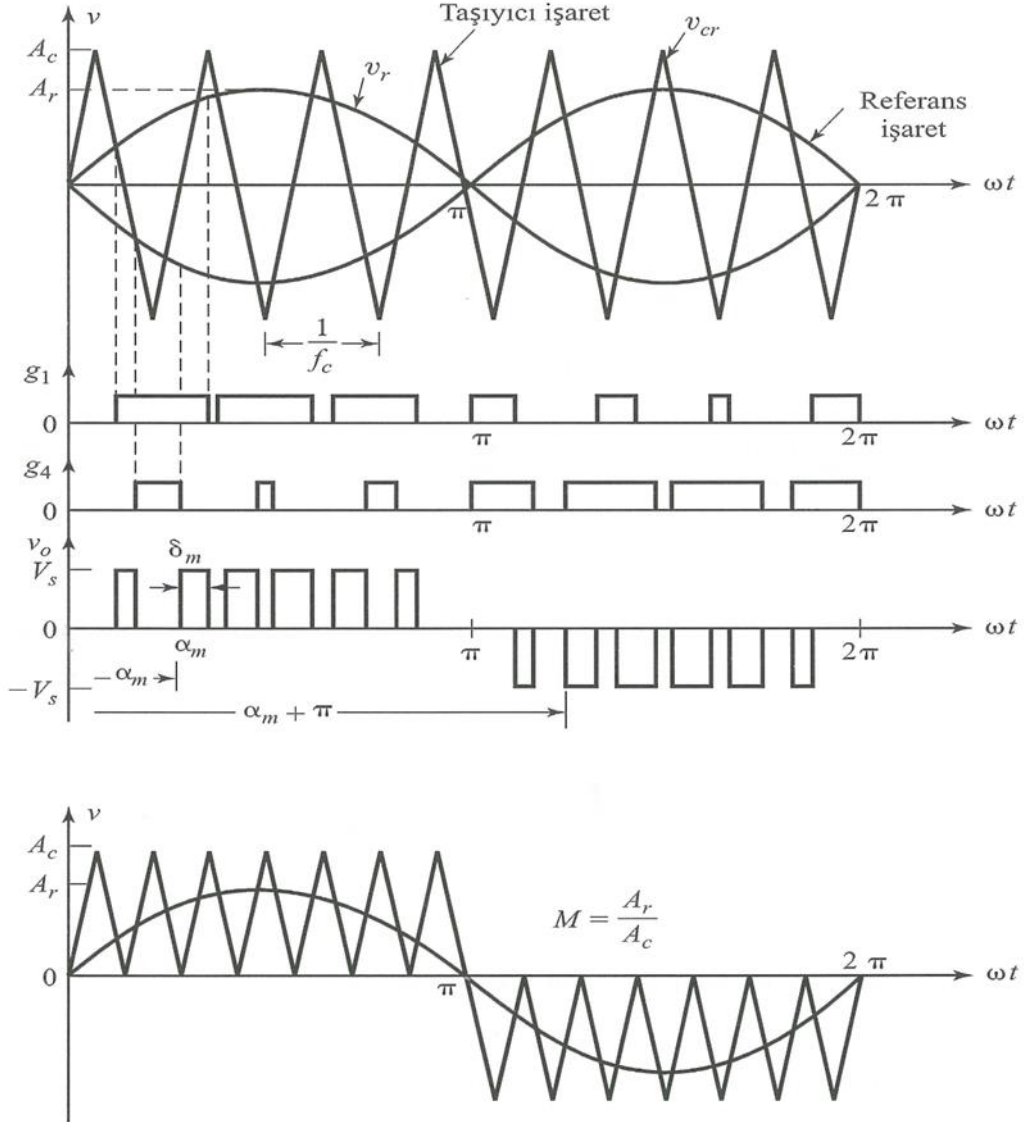
Çıkış Gerilimi	Anahtar Durumları							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
$2V_{DA}$	1	0	0	1	1	0	0	1
V_{DA}	1	0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0
$-V_{DA}$	1	0	1	0	0	1	1	0
$-2V_{DA}$	0	1	1	0	0	1	1	0

1.6. Evirici için Modülasyon Teknikleri

STATCOM yapısında bulunan eviricilerde anahtarlama elemanlarının ihtiyaç duyduğu işaretleri üretmek amacıyla PWM teknikleri kullanılır. Literatürde darbe genişlik modülasyonu ile ilgili farklı uygulamalar için çok fazla çalışma yapılmıştır. Bunlardan, güç uygulamalarında yarıiletken anahtarların tetiklenmesi için kullanılan PWM tekniklerinden en çok kullanılanları; seçmeli harmonik eliminasyon, SPWM ve uzay vektör modülasyon şeklinde sıralanabilir.

SPWM tekniğinde çıkışın sinüs biçimli bir dalga olması istenildiği için sinüzoidal bir referans işaret kullanılır. Şekil 15’te görüldüğü gibi anahtarlama işaretleri sinüzoidal bir referans işaretin f_c frekanslı bir üçgen taşıyıcı dalga ile karşılaştırılmasıyla üretilir. SPWM endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir tekniktir. Referans işaretin frekansı f_r , evirici çıkış frekansını belirlerken tepe genliği A_r , modülasyon indeksi M ’yi ve daha sonra çıkış gerilimi V_o ’nın etkin değerini kontrol eder. Şekil 15’te gösterilen çift yönlü taşıyıcı işaret V_{cr} ’nin iki sinüzoidal işaret V_r ve $-V_r$ ile karşılaştırılmasıyla sırasıyla g_1 ve g_4 anahtarlama işaretleri üretilir. Çıkış gerilimi $V_o = V_s(g_1 - g_4)$ ’tür. Burada g_1 ve g_4 aynı anda serbest bırakılamaz. Her yarım periyottaki darbe sayısı taşıyıcı frekansına bağlıdır. Aynı

anahtarlama işaretleri tek yönlü üçgen taşıyıcı kullanarak üretilebilir. Bu yöntemi uygulamak daha kolaydır ve tercih edilir.



Şekil 15. SPWM dalga şekli

Çok seviyeli eviriciler için yüksek anahtarlama frekansı (yaklaşık olarak 1kHz anahtarlama frekansı değerinin üstü için) durumunda çok taşıyıcılı SPWM çeşitleri faz kaydırmalı ve seviye kaydırmalı olarak iki grupta toplanabilir. Seviye kaydırmalı SPWM yönteminde anahtarlama frekansı sabit alındığı için sıklıkla tercih edilir ve aynı zamanda basit bir anahtarlama şemasına sahiptir.

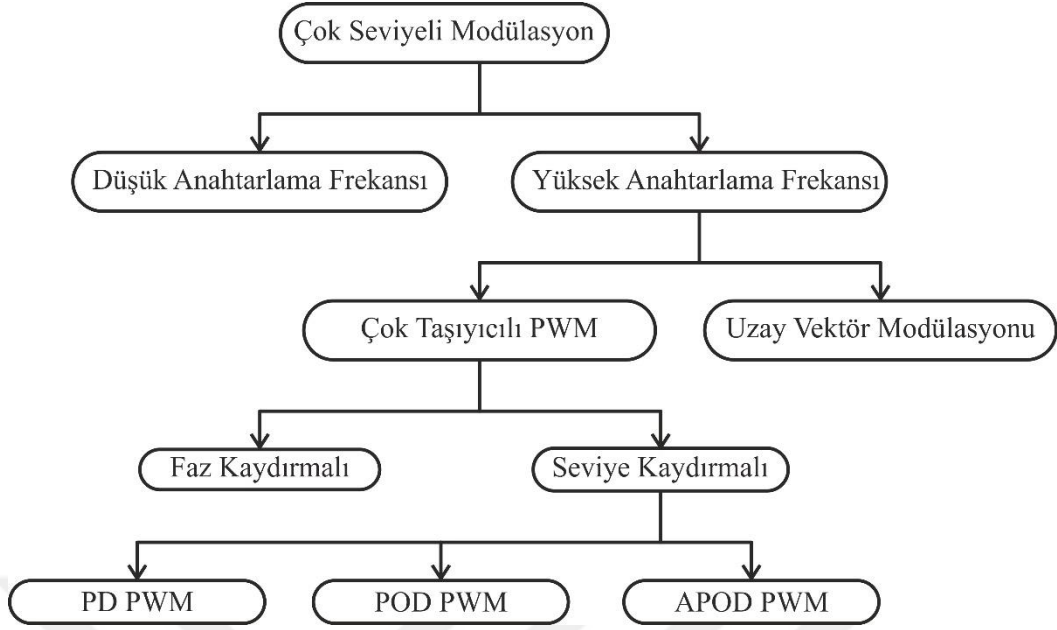
Çok seviyeli eviriciler için kullanılan seviye kaydırmalı SPWM yöntemi taşıyıcı sinyallerin fazlarını ve sayılarını değiştirerek uygulanır. Burada referans gerilim değişmemektedir. Taşıyıcı sinyallerin sayısı kullanılan eviricinin seviyesine bağlıdır. Seviye sayısının bir eksiği kadar taşıyıcı sinyal gereklidir. Örneğin m seviyeli bir evirici için $m-1$ adet aynı frekansa (f_c) ve aynı genliğe (A_c) sahip taşıyıcı ihtiyacı vardır. Referans işaret dalga şekli tepeden tepeye A_m genliğine ve f_m frekansına sahip olsun. Referans sinyal taşıyıcı sinyallerin her biriyle sürekli karşılaştırılır. Eğer referans sinyal taşıyıcı sinyalden daha büyükse o taşıyıcıya karşılık gelen aktif anahtar kapalı konuma geçer.

Çok seviyeli eviricilerde genlik modülasyon indeksi (M_a) ve frekans oranı (M_f) Denklem (10) ve Denklem (11)'deki gibi tanımlanır.

$$M_a = \frac{A_m}{(m-1)A_c} \quad (10)$$

$$M_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (11)$$

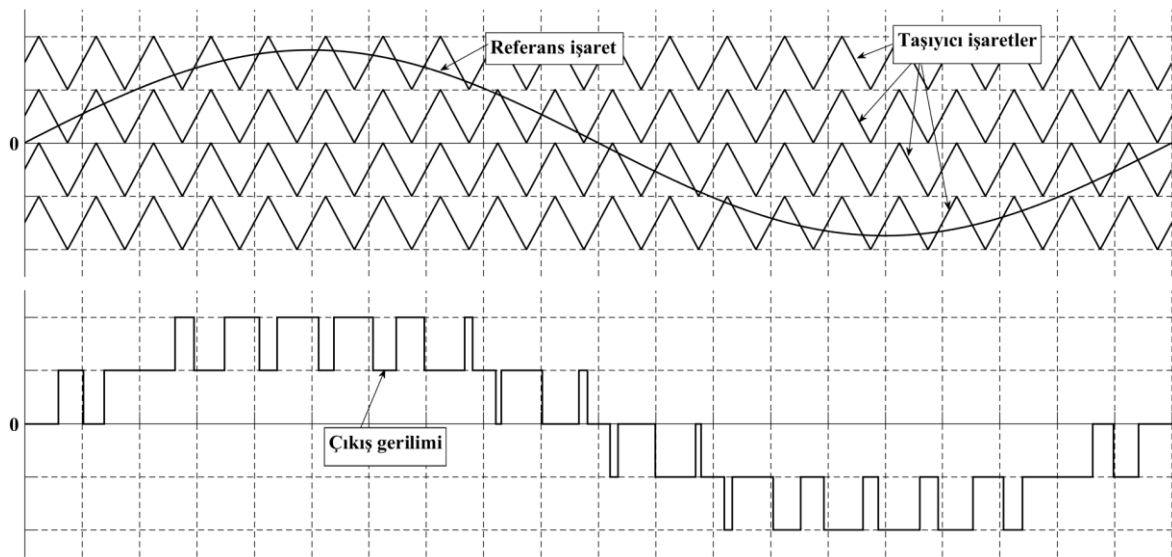
Seviye kaydırmalı SPWM yönteminde taşıyıcı sinyallerin durumuna göre farklı şekillerde isimlendirilen yöntemler vardır (Carrara vd., 1992). Bu yöntemlerden en çok kullanılanları; taşıyıcı işaretlerin aynı fazda olduğu durum (PD, Phase Disposition), sıfır referansının üstünde veya altında olan taşıyıcılar arasında 180° faz farkı olan durum (POD, Phase Opposite Disposition) ve ardışık her taşıyıcı işaret arasında 180° faz farkı olan durum (APOD, Alternative Phase Opposition Disposition) şeklinde sıralanabilir. Şekil 16'da modülasyon tekniklerinin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 16. Modülasyon tekniklerinin sınıflandırılması

1.6.1. Düz Dizme (PD, Phase Disposition)

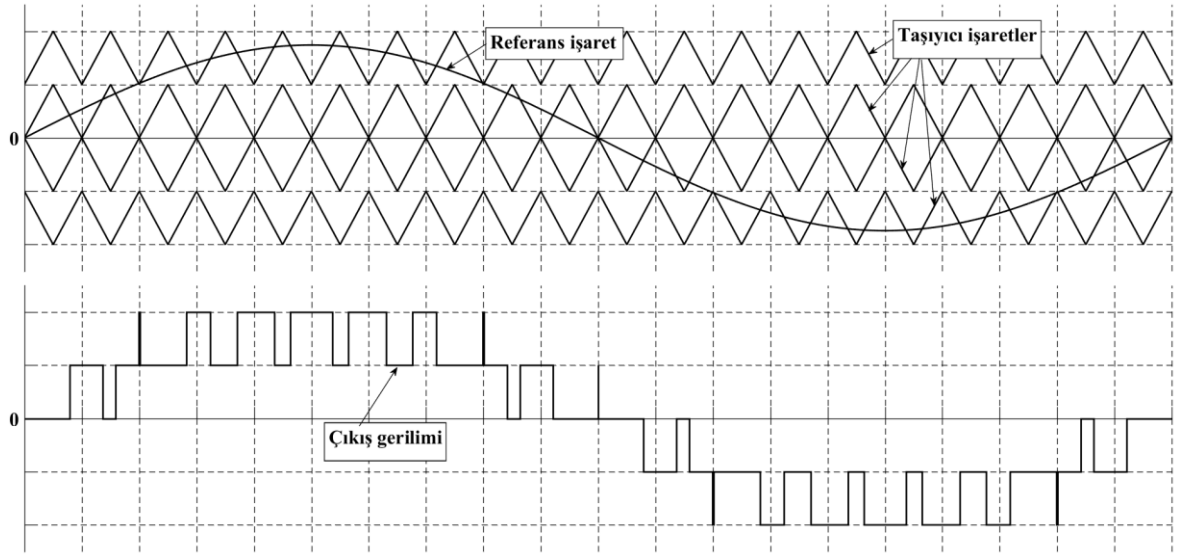
Bu yöntemde bütün taşıyıcı sinyalleri aynı fazdadır. Örneğin m seviyeli bir evirici için $m-1$ adet taşıyıcı dalga kullanılır. Taşıyıcılar aynı fazda dizildiği için bu yönteme düz dizme yöntemi denir. Şekil 17’de beş seviyeli bir evirici için taşıyıcı dalgalar ve referans dalga grafikleri ile çıkış gerilimi değişimi verilmiştir.



Şekil 17. Düz dizme yöntemi grafiksel gösterimi

1.6.2. Ters Dizme (POD, Phase Opposition Disposition)

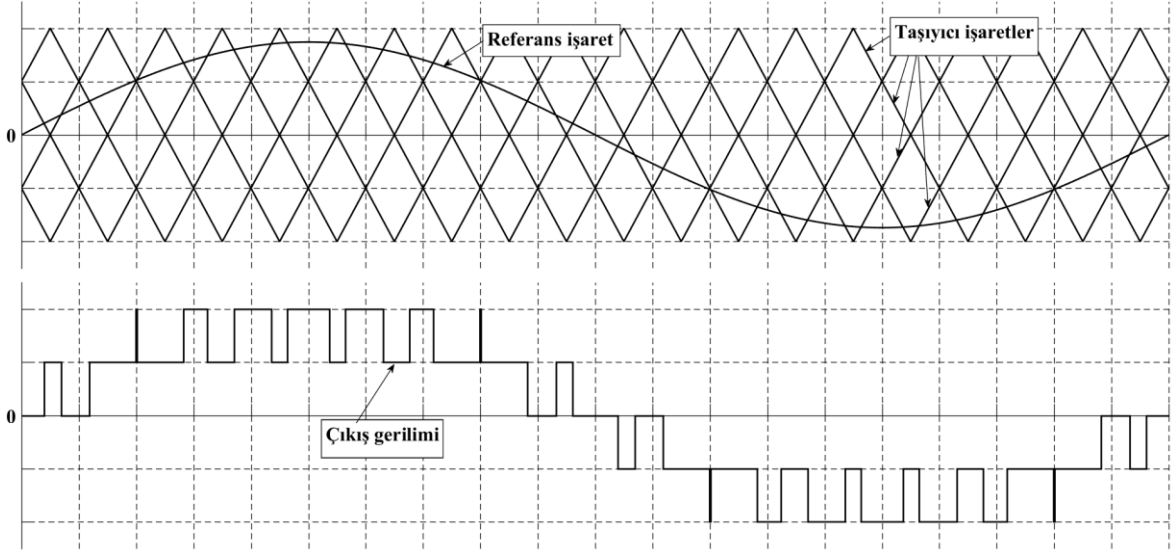
Bu yöntemde modülasyon dalgasının sıfır referansının üstündeki taşıyıcılar altındakilere göre 180° faz kaydırılmış olarak dizilmiştir. Sıfır referansın üstündeki taşıyıcılar kendi aralarında aynı fazda ve altındakiler de kendi aralarında aynı fazda olarak dizilir. Örneğin m seviyeli bir evirici için $m-1$ adet taşıyıcı dalga kullanılır. Taşıyıcılar sıfır referansına göre 180° faz kaydırılarak dizildiği için bu yöntem ters dizme yöntemi denir. Şekil 18’de beş seviyeli bir evirici için taşıyıcı dalgalar ve referans dalga grafikleri ile çıkış gerilimi değişimi verilmiştir.



Şekil 18. Ters dizme yöntemi grafiksel gösterimi

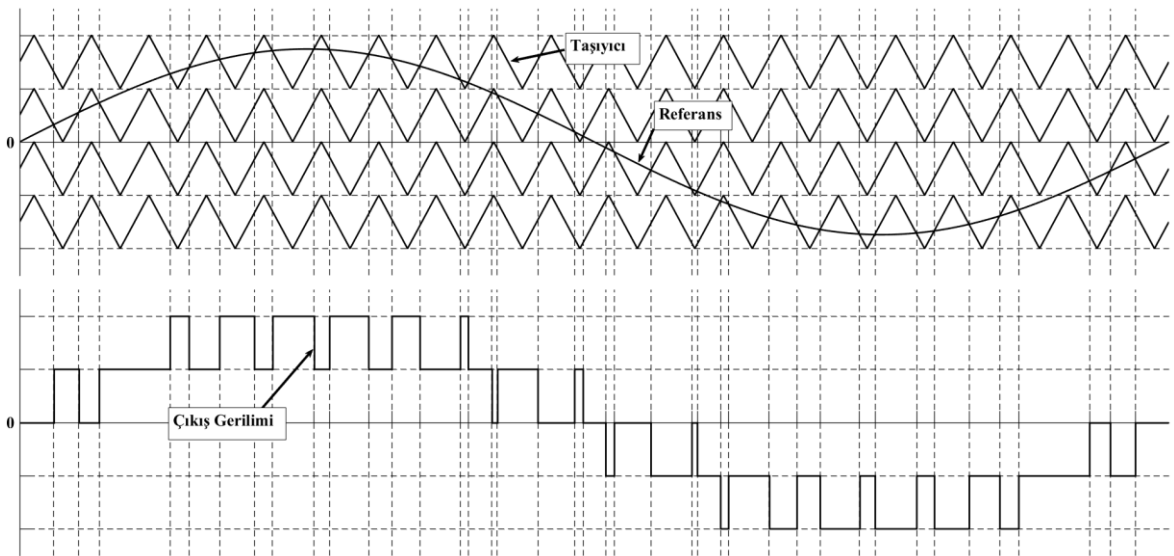
1.6.3. Düz-Ters Dizme (APOD, Alternative Phase Opposition Disposition)

Bu yöntemde bütün taşıyıcı sinyalleri her birinin bitişiğindeki diğer taşıyıcılara göre 180° faz kaydırılarak yerleştirilmiştir. Örneğin m seviyeli bir evirici için $m-1$ adet taşıyıcı dalga kullanılır. Her taşıyıcı birbirine göre 180° faz kaydırılarak yani bir ters bir düz olarak dizildiği için bu yöntem düz-ters dizme yöntemi denir. Şekil 19’da beş seviyeli bir evirici için taşıyıcı dalgalar ve referans dalga grafikleri ile çıkış gerilimi değişimi verilmiştir.



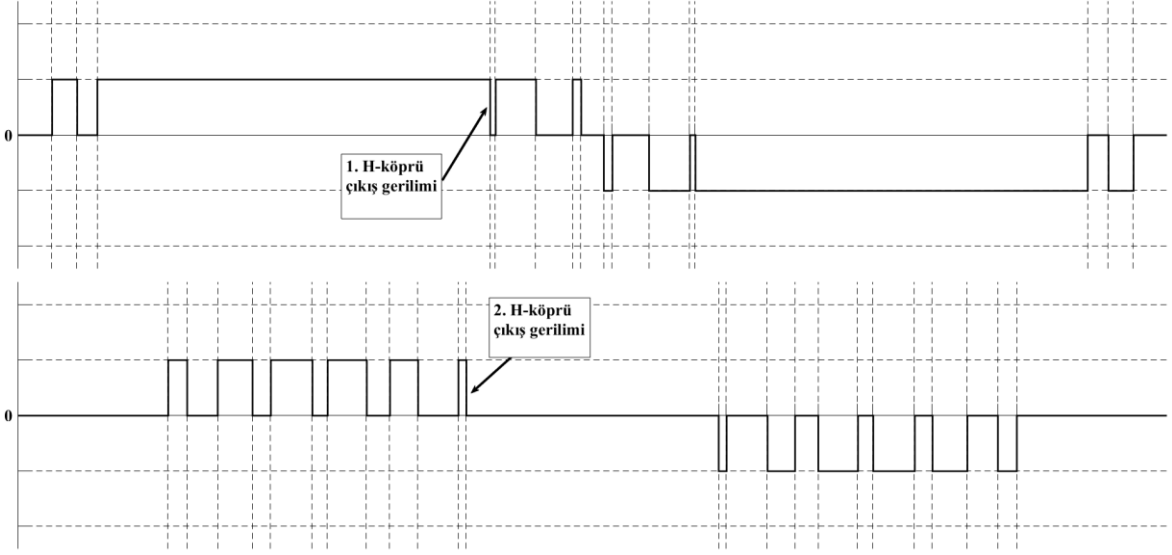
Şekil 19. Düz-ters dizme yöntemi grafiksel gösterimi

Bu tez çalışmasında, STATCOM yapısında bulunan beş seviyeli kaskad bağlı H-köprü temelli olan çok seviyeli evirici için PD-PWM yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem Matlab/Simulink ortamında ayrıntılı olarak incelenmiş ve grafiklerle açıklanmıştır. Şekil 20’de PD PWM kullanılarak Matlab/Simulink ortamında çizdirilen beş seviyeli eviricinin tek fazı için çıkış gerilimi görülmektedir. Dört eşit parçalı olan ve aynı fazda olan taşıyıcı sinyaller ile kontrol devresinin çıkışından elde edilen referans sinyal kesişim noktalarında karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda beş seviyeli eviricinin çıkış gerilimi elde edilir.



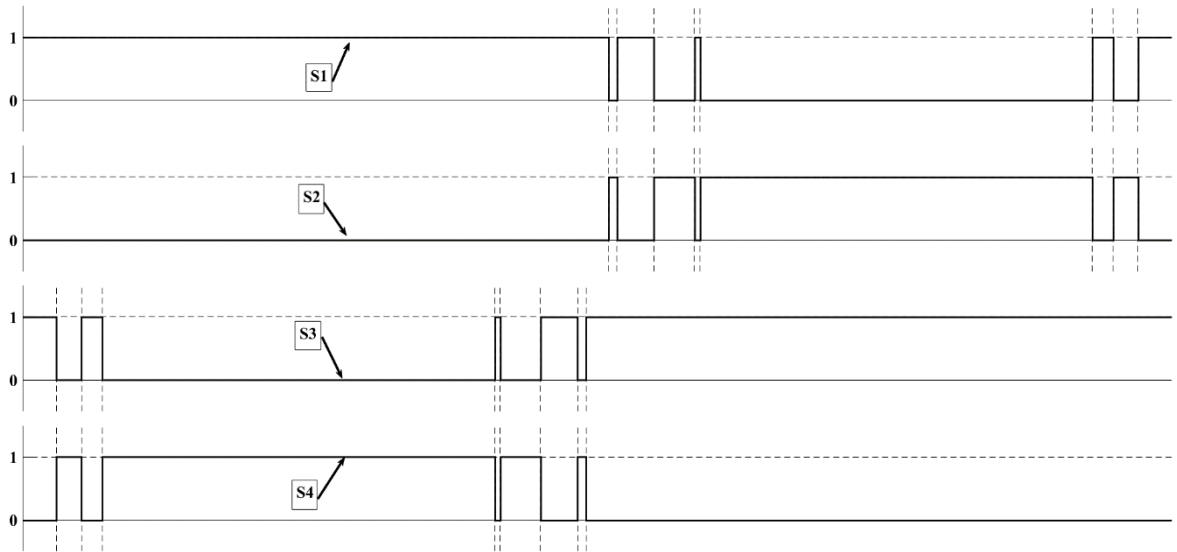
Şekil 20. Beş seviyeli eviricinin tek faz çıkış gerilimi

Şekil 21’de beş seviyeli eviricinin tek fazında bulunan iki adet H-köprülerin çıkış gerilimleri görülmektedir ve burada görülen gerilimlerin toplanmasıyla Şekil 20’de görülen evirici çıkış gerilimi elde edilir.

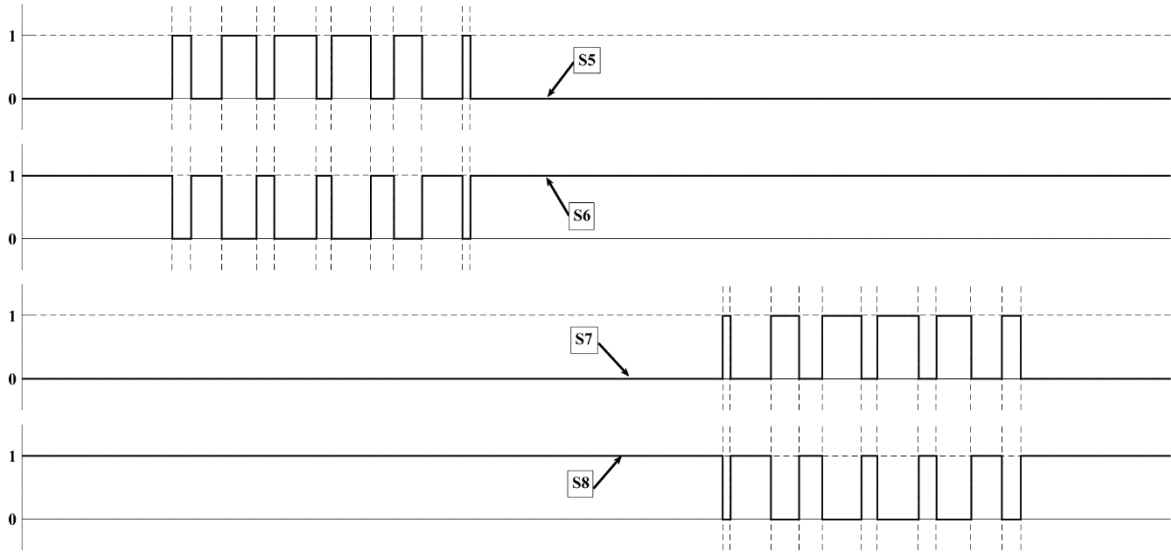


Şekil 21. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için H-köprü çıkış gerilimleri

Şekil 22’de ve Şekil 23’te beş seviyeli eviricinin tek fazında bulunan iki adet H-köprülerin anahtarlama durumlarını gösteren dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 22. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için birinci H-köprü anahtarlama durumları



Şekil 23. Beş seviyeli eviricinin tek fazı için ikinci H-köprü anahtarlama durumları

1.7. Çok Seviyeli STATCOM İçin Denetim Yöntemleri

STATCOM denetiminin ana fonksiyonu, istenilen çıkış gerilimi ile ilgili olarak eviricide her anahtarın açık kapalı durumlarını hesaplayarak bir takım koordineli zamanlamalı dalga şekli üretip kompanzasyon için gerekli olan reaktif güç alışverişi yaparak senkron bir çıkış dalga şekli üretmek için evirici güç anahtarlarını anahtarlamaaktır.

Çıkış geriliminin genliği ve açısı evirici ile ilgili reaktif akımı hesaplar ve böylece AA sistem ile reaktif güç alışverişi yapılır. Literatürde STATCOM denetim şekilleri ile ilgili birçok farklı çalışma yapılmıştır. DA-hat gerilimi sabit tutulur ve STATCOM hat akımı direk olarak denetlenir (Çetin, 2007). Modülasyon indeksi sabit tutulur ve DA-hat geriliminin değişmesiyle reaktif güç kontrol edilir (Mohaddes vd., 1999) ya da tam tersi olarak DA-hat gerilimi sabit tutulup modülasyon indeksinin değiştirilmesiyle reaktif güç kontrol edilir. (Çöteli, 2010) DA-hat gerilimi sabit tutulur ve STATCOM hat akımı dolaylı olarak denetlenir. (Masand vd., 2006) AA çıkış geriliminin genliği DA kondansatör gerilimi ile orantılı olduğundan kondansatördeki DA gerilim oluşturularak evirici çıkış gerilimi için gerekli genlik ve açı sağlanır. Bu orantıdan dolayı, DA kondansatör geriliminin denetlenmesiyle STATCOM hat akımı dolaylı olarak denetlenmiş olur.

1.7.1. Doğrusal Denetim Yöntemleri

1.7.1.1. $p - q$ Teorili Denetim

Bu denetim yönteminde, $p-q$ teorisine dayalı kontrol stratejilerini uygulamak için, elektrik sistemindeki anlık aktif ve reaktif gücün hesabı, Clarke dönüşümünden elde edilen α - β eksen takımındaki gerilimleri ve akımları kullanarak yapılır. Anlık toplam güç Denklem (12)'de verildiği gibidir ve kontrol amaçlı kullanılan anlık gücü hesaplamak için kullanılan temel denklemdir (Akagi vd., 2007).

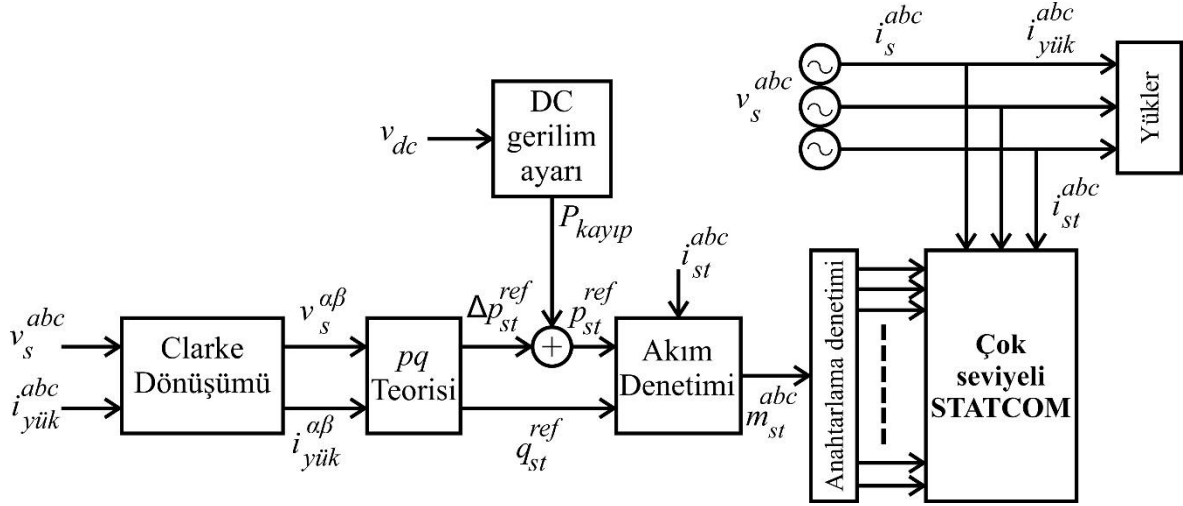
$$s = p + jq = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (12)$$

Burada verilen p ve q , sırasıyla aktif ve reaktif gücü temsil etmektedir. Bu ifade anlık gerilimleri ve akımları kullandığından, s 'de herhangi bir kısıtlama yoktur ve bu nedenle durağan ve dinamik koşullar için kullanılabilir. Denklem (12), Denklem (13)'teki gibi matris formunda da yazılabilir. Bu denklemden akımları çekersek de Denklem (14) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (14)$$

Bu tanımlardan yola çıkılarak $p - q$ teorisine dayanan genel denetim şeması Şekil 24'te görüldüğü gibidir.



Şekil 24. $p - q$ teorili denetim yöntemi genel blok diyagramı

Denklem (13) ile anlık aktif ve reaktif gücü hesaplamak için sistem gerilimleri ve akımları α - β eksen takımına dönüştürülür. Bu değerler, STATCOM cihazı tarafından enjekte edilecek gerekli gücü hesaplamak için kullanılır. STATCOM yüklere reaktif güç aktarır ve herhangi bir aktif güç çekmez.

$$\Delta p_{st}^{ref} = 0 \quad (15)$$

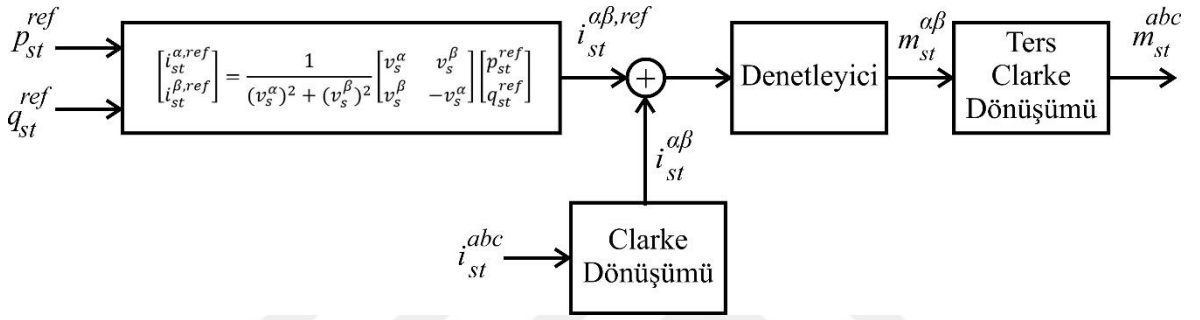
$$q_{st}^{ref} = -q_{yük} = -(v_s^\beta i_{yük}^\alpha - v_s^\alpha i_{yük}^\beta) = v_s^\alpha i_{yük}^\beta - v_s^\beta i_{yük}^\alpha \quad (16)$$

Burada; Δp_{st}^{ref} STATCOM referans aktif güç değişimini, Δq_{st}^{ref} STATCOM referans reaktif güç değişimini, $q_{yük}$ yükün reaktif gücünü, $i_{yük}^\alpha$ yük akımının α bileşenini, $i_{yük}^\beta$ yük akımının β bileşenini, v_s^α sistem geriliminin α bileşenini ve v_s^β sistem geriliminin β bileşenini ifade etmektedir.

STATCOM yapısında bulunan eviriciye sıfır aktif güç iletildiği düşünülürse, bu referans değerleri şebeke tarafında birim güç faktörüne sahip olmanızı sağlar. Fakat elemanlardaki doğal kayıplardan dolayı, bu aktif güç tam olarak sifıra eşit olamaz ve bu nedenle toplam DA gerilimini istenen değerde tutmak için belirli bir güç gerekir.

Kayıplara bağlı olan ve tüm DA kondansatörleri şarj etmek için kullanılan aktif güç, Şekil 24'te gösterildiği gibi gerekli aktif güce eklenen bir denetleyici ile basitçe kontrol edilebilir. Üretilen aktif ve reaktif güç referansları yardımıyla akım denetimi bloğu, çok seviyeli STATCOM'un anahtarlama elemanları için gerekli olan anahtarlama işaretlerini

üretir ve anahtarlama denetimi bloğuna gönderir. Burada da seçilen bir anahtarlama tekniği ile eşit bir dağılımla anahtarlama işaretleri gönderilir. Şekil 24’te görülen akım denetim bloğu, doğrusal denetleyicilerden gelişmiş doğrusal olmayan denetleyicilere kadar çeşitli teknikler kullanılarak tasarlanabilir. Şekil 25’te akım denetim bloğunun içyapısı görülmektedir. Şekil 25’ten görülebileceği gibi, Denklem (14) kullanılarak akım referansları hesaplanır ve daha sonra bir denetleyici ölçülen değerler ile elde edilen bu referans değerler arasındaki hatayı sıfırlamak için kullanılır.



Şekil 25. $p - q$ teorili denetim yöntemi akım denetim bloğu

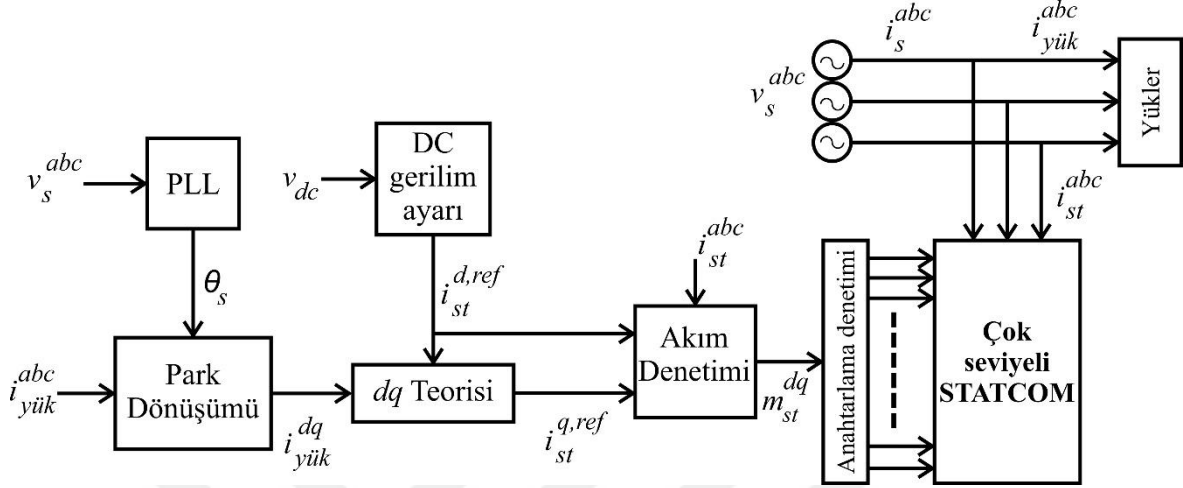
Şekil 25'teki denetleyici bloğunun sadece bir PID türü denetleyici olduğu düşünülürse, bu yaklaşımların performansı düşüktür çünkü sinüzoidal sinyaller için sıfır kararlı durum hatası sağlamazlar (Ortiz vd., 2008).

1.7.1.2. dq Teorili Denetim

Şekil 26 dq tabanlı bir denetim sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Şekil 26'da görüldüğü gibi bir PLL bloğu, dq senkron referans yapısını elde etmek için Park dönüşümünü senkronizasyon açısı θ_s ile besler [26]. Yük akımının dq bileşenleri elde edilir ve STATCOM akımının q bileşeninin referans değerini hesaplamak için kullanılır. Birim referans güç faktörü gerekliliği olduğu için Şekil 26'da görülen dq teorisi bloğu Denklem (17) ile sonuçlandırılır. Böylece tüm reaktif güç STATCOM tarafından sağlanır ve böylece tüm reaktif yük akımı STATCOM'a geçer.

$$i_{st}^{q,ref} = -i_{yük}^q \quad (17)$$

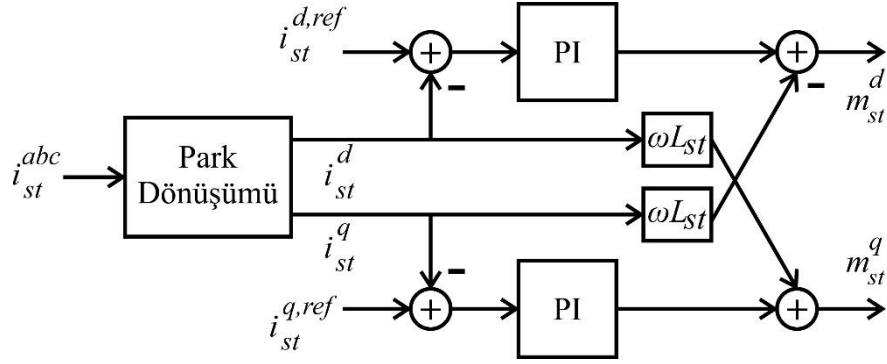
Burada; $i_{st}^{q,ref}$ STATCOM akımının q bileşeninin referans değerini ve $i_{yük}^q$ yük akımının q bileşenini ifade etmektedir.



Şekil 26. dq teorili denetim yöntemi genel blok diyagramı

STATCOM akımının d bileşeninin referansı, DA gerilim ayarı bloğu tarafından üretilir ve bu blok için genelde bir PI kontrolörü kullanılır. Park dönüşümü kaynak gerilimi ile senkronize edildiğinde, doğru akım aktif güç ile ilişkilendirilir ve dolayısıyla DA gerilimi düzenleyen STATCOM kayıplarını kompanze etmek için kullanılabilir. $p - q$ denetim şemasına benzer şekilde, buradaki v_{dc} gerilimi çok seviyeli eviricide yer alan tüm gerilimlerin toplamına veya ortalamasına karşılık gelir.

Şekil 26'daki akım denetimi bloğu, modülasyon aşamasında kullanılan sinyallere ait d ve q bileşenlerini üretir. Bu bloğun denetimi için birçok farklı yöntem kullanılabilir. Genelde PID türü denetleyiciler bu denetim için oldukça uygundur çünkü evirici akımlarının dq bileşenleri DA büyüklüklere sahiptir ve bu nedenle basit PI denetleyicileri, kabul edilebilir bir dinamik performans ile sıfır kararlı durum hatası elde edebilir. Dolayısıyla, Şekil 27, dq akımlarını bağımsız olarak kontrol etmeye ve tatmin edici dinamik tepki elde etmeye yarayan senkron referans yapıdaki tipik doğrusal akım denetimi bloğunu göstermektedir.



Şekil 27. dq teorili denetim yöntemi akım denetim bloğu

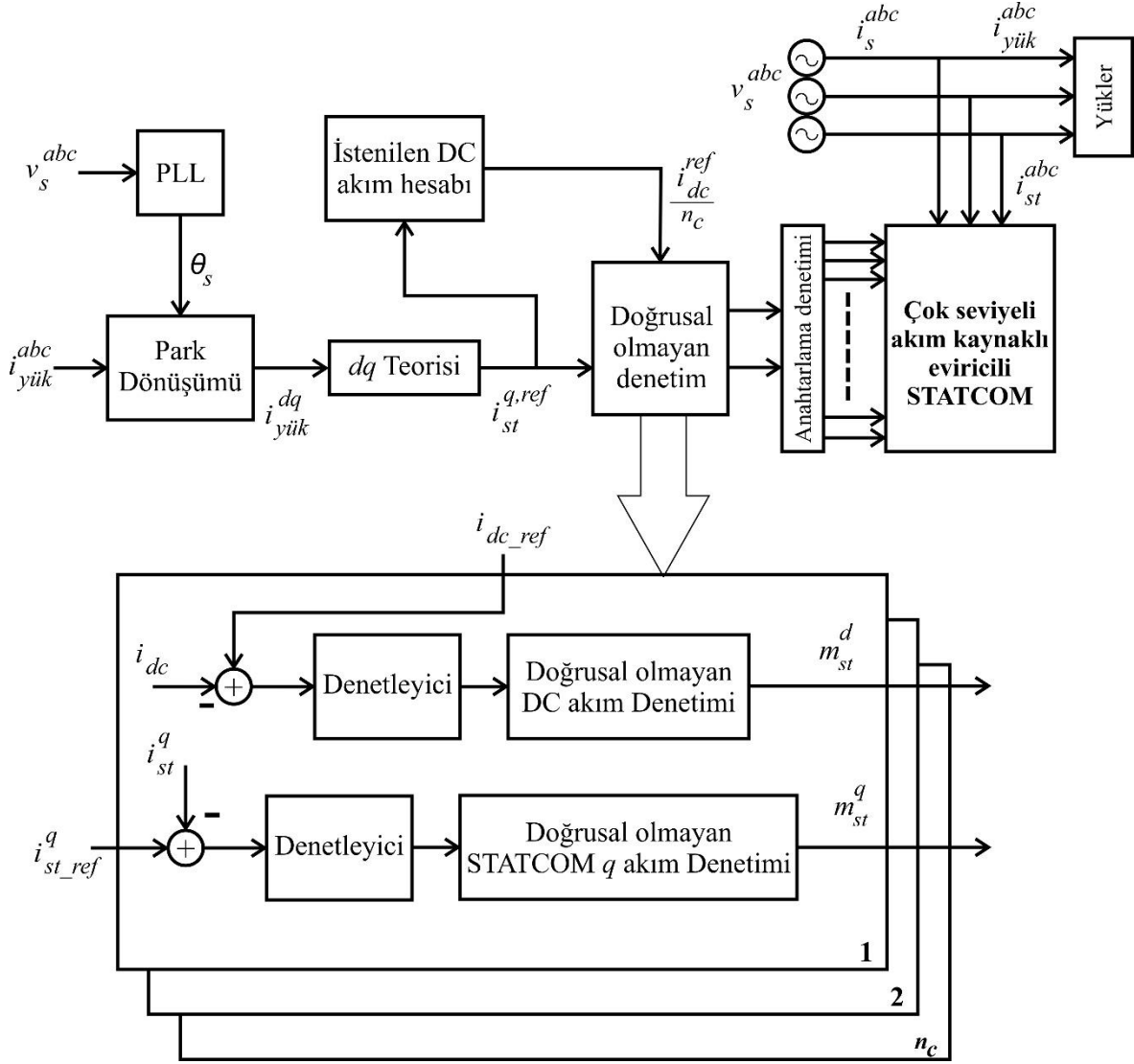
1.7.2. Doğrusal Olmayan Denetim Yöntemleri

1.7.2.1. Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma Tekniği

Giriş/çıkış doğrusallaştırma tekniği, STATCOM'un doğrusal olmayan modelini kullanır. Buradaki asıl amaç, STATCOM denetleyicisinin tasarlandığı çalışma noktasına yakın bir bölgede çalışmasını sürdürmek zorunda kalmadan, doğrusal denetleyicilerin kullanılmasını sağlayan bir doğrusal olmayan denetim ilkesi tanımlamaktır (Sekoguchi vd., 2002). Bu teknik, DA indüktör kayıplarını azaltmak için DA akım seviyesinin kompanzasyon gereksiniminin bir fonksiyonu olarak tanımlanabileceği akım kaynaklı evirici topolojileri için özellikle uygundur (Kazerani ve Quintana, 2005).

Bu kontrol yaklaşımının temel dezavantajı, stratejiyi uygulamak için algılanması gereken elektriksel değişkenlerin sayısıdır. Bu sayı, sistemin dinamik modeli ile ilgili doğrusal olmayan yasayı hesaplamak için kullanılan durum değişkenleri ve bozukluklarla ilgilidir.

dq referans yapı teorisini kullanarak çok seviyeli akım kaynaklı eviricili STATCOM cihazını denetlemek için, doğrusal olmayan denetleyici yapısı, STATCOM akımının q bileşeninin referans olarak kullanılması açısından doğrusal durumdaki ile benzerdir. Giriş/çıkış doğrusallaştırma tekniğinin blok diyagramı Şekil 28'de görülmektedir.



Şekil 28. Giriş/çıkış doğrusallaştırma tekniği

Burada STATCOM akımının q bileşeni DA akım seviyesini belirler. Her bir akım kaynaklı eviricinin eşit reaktif güç kompanzasyonu sağlaması ve akım kaynaklı eviricilerin LC filtresine paralel bağlanması göz önüne alındığında, referans akım bir fazdaki hücre sayısına (n_c) bölünür.

Doğrusal Olmayan Denetleyici bloğu, her bir yarı iletken elemanın ihtiyacı olan kapı tetiklemelerini oluşturmak için kapı sinyal generatörü tarafından kullanılan her bir akım kaynaklı evirici için modülasyon sinyalini hesaplar.

Doğrusal olmayan denetleyici yapısını tanımlamak için iki farklı yol vardır. İlk olarak, DA akım denetleyicisi, STATCOM akımının d bileşenini ayarlamak için tanımlanabilir. STATCOM akımının q bileşeni için referans değeri istenen güç faktörü tarafından

tanımlanırken, bu bileşen STATCOM aktif gücünü kontrol etmek ve akım kaynaklı eviricilerdeki DA akım seviyesini düzenlemek için kullanılabilir. Her bir akım kaynaklı evirici, gerekli q bileşeninin bir bölümünü sağlayabilmesine rağmen, ne yazık ki d bileşen akım kaynaklı eviriciler için ortaktır ve bir güç dağıtım stratejisi gereklidir. Çok seviyeli akım kaynaklı evirici topolojisini kontrol etmenin ikinci ve daha kolay bir yolu, STATCOM akımının q bileşenini denetleyici çıkışında elde edilen modülasyon sinyalinin q bileşeniyle kontrol etmektir ve d bileşeni DA akımını kontrol edecektir (Melin vd., 2011).

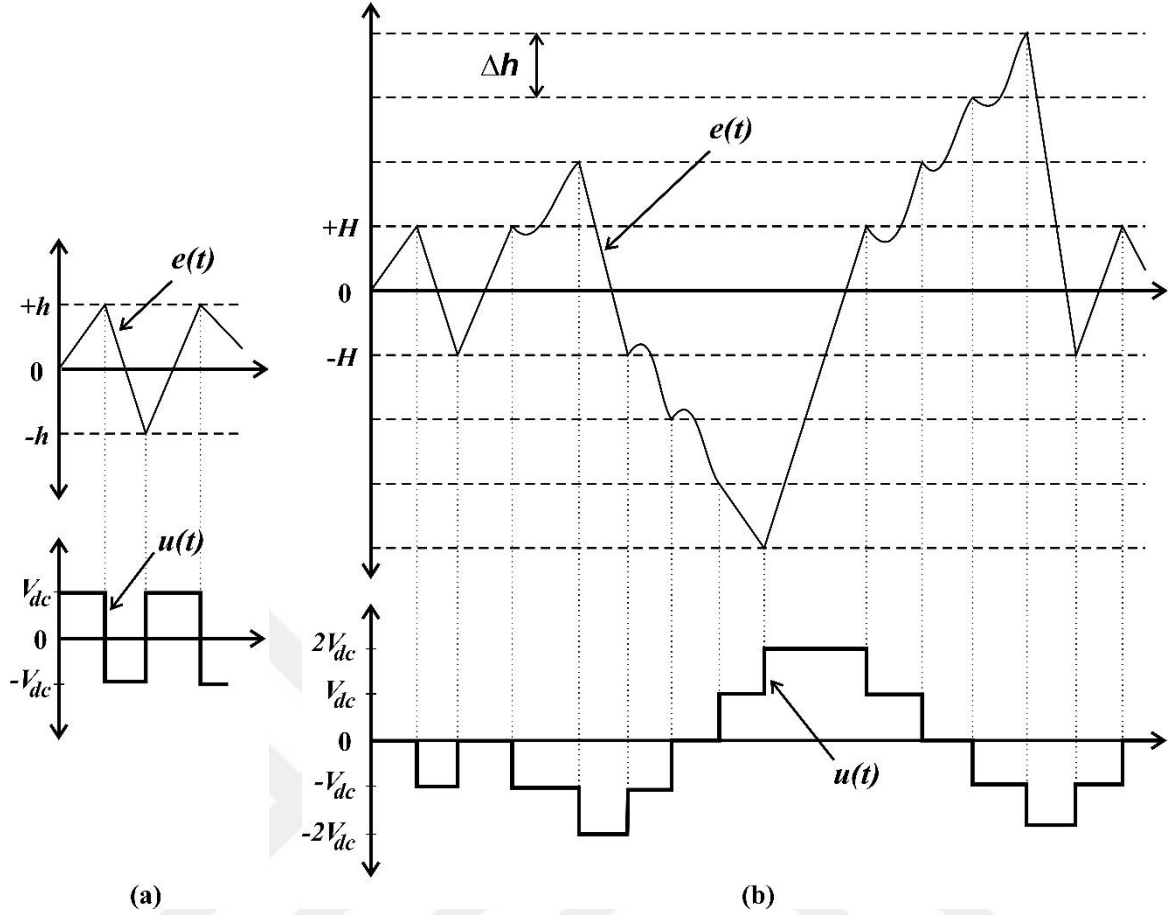
1.7.2.2. Histerezis Denetim

Güç çeviricilerindeki histerezis denetim, uygulanmasının sadeliği ve dinamik performansının iyi olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Rebeiro ve Uddin, 2012). Bununla birlikte, bilinmeyen eşdeğer anahtarlama frekansı olan sonuç dalga şekillerinin harmonik içeriğine ilişkin önemli bir dezavantaja sahiptir ve ayrıca anahtarlama harmonikleri spektrumların her yanına yayılmıştır.

Histerezis denetimin uygulanması, 2 seviyeli bir evirici için oldukça kolaydır. Bir tolerans bandı tanımlanmalı ve mevcut hata bandın dışına çıktığında evirici bir durumdan diğerine geçmelidir. Bu durum Şekil 29a'da görülmektedir. Böylece kontrol yasasının dijital bir platformda programlanması Denklem (18)'deki gibi kolay hale gelmektedir.

$$\begin{array}{ll} \text{if } e_i(t) \geq h, & \text{then } u(t) = -V_{DA} \\ \text{else if } e_i(t) \leq -h, & \text{then } u(t) = +V_{DA} \end{array} \quad (18)$$

Burada, $e_i(t)$ akım hatası, h histerezis bandı ve $u(t)$ evirici çıkışıdır.



Şekil 29. Histeresis denetimi (a) iki seviyeli (b) çok seviyeli

Çok seviyeli eviriciler için histeresis denetimi basit değildir ve literatürde çeşitli yaklaşımlarla ilgili çalışmalar yapılmıştır (Zare ve Ledwich, 2002; Gupta vd., 2006). Çok seviyeli bir histeresis modülasyonunu uygulamanın farklı yolları vardır. Bunların arasından çoklu bantların düşünüldüğü simetrik veya asimetrik olabilen ve ayrıca zaman tabanlı şemalar olarak da önerilmiş yaklaşımları bulmak mümkündür (Shukla vd., 2011).

Şekil 29b'de çok seviyeli eviriciler için uygun olan çok bantlı histeresis stratejisi ile ilgili bir alternatif uygulama görülmektedir. Burada yarıiletken elemanların kapı darbelerini üretmek için simetrik bantlar kullanılır. Bunlardan dış bantlar ek seviyelerin anahtarlama üretirken iç bantlar komşu seviyeler arasındaki anahtarlama için kullanılır. Bahsedilen şekilde H iç banda karşılık gelir ve dış bantlar küçük Δh basamakları tarafından oluşturulur. Böylece, eğer hata en dış bantın dışına çıkarsa, hatayı düzeltmek ve onu histeresis bantlarına dahil etmek için çok seviyeli dalga şeklindeki daha yüksek seviye seçilmelidir.

1.7.2.3. Öngörülü Denetim

Bu denetim stratejisi, belirli bir topolojinin olası tüm anahtarlama durumlarının değerlendirilmesini ve istenen ile gelecekteki çalışma durumu arasındaki hatayı en aza indiren en uygun anahtar kombinasyonunun seçimini içermektedir. Bunu başarmak için, değişkenlerin gelecekteki davranışlarını tahmin etmek amacıyla sistemin doğru bir modelinin çıkarılması önemlidir. Her örnekleme zamanında, belirli bir topolojinin denetimi bir optimizasyon problemi olarak minimize edilen bir maliyet fonksiyonunu tanımlayacaktır (Rodriguez ve Cortes, 2012).

Öngörülü denetim tekniği çok seviyeli STATCOM uygulamalarında da kullanılabilir. Muhtemel kombinasyonların sayısının anahtarlama elemanlarının sayısı ile üstel büyüme şeklinde bir artış göstermesi bu uygulama için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çünkü bu muhtemel kombinasyonların sayısının çok fazla oluşu hesaplama yükünü kayda değer bir şekilde artırmaktadır. Bunun yanı sıra sürekli duruma ulaşıldığında komşu geçerli durumların en uygun çözüm olması gibi hesaplama sayılarının azaltılması için alternatifler önermek mümkündür. Farklı anahtarlama durumlarında aynı çıkış seviyesi elde edilebilir. Bu nedenle bu durumlar ihmal edilebilir. Bu da denetleyicinin işlem yükünü azaltır (Han vd., 2013).

Çok seviyeli STATCOM'lar için AA taraftaki diferansiyel eşitlik Denklem (19)'da görüldüğü gibidir.

$$V_s^{abc} = L_{st} \frac{d}{dt} i_{st}^{abc} + R_{st} i_{st}^{abc} + V_{st}^{abc} \quad (19)$$

Burada; V_s^{abc} üç faz şebeke gerilimini, i_{st}^{abc} üç faz STATCOM akımını, L_{st} bağlantı endüktansının endüktans değerini ve R_{st} bağlantı endüktansının direnç değerini ifade etmektedir.

Denklem (19)'dan i_{st}^{abc} çekilip ayrıştırılırsa, bir sonraki değeri Denklem (20)'den hesaplanabilir.

$$i_{st}^{abc}(k+1) = \left(1 - T_s \frac{R_{st}}{L_{st}}\right) i_{st}^{abc}(k) + \frac{T_s}{L_{st}} \{V_s^{abc}(k) - V_{st}^{abc}(k)\} \quad (20)$$

Burada T_s algoritmanın örnekleme zamanıdır. k anında değerlendirilen değişkenler o andaki değişkenlere karşılık gelir ve bu model, sonraki örnekleme zamanında sistemin gelecekteki yani $k + 1$ anındaki davranışını tahmin etmek için kullanılır.

Ayrık zamanlı sistem modeli elde edildikten sonra bir maliyet fonksiyonu önerilmelidir. Bu maliyet fonksiyonu olası tüm anahtarlama kombinasyonları için değerlendirilmeli, maliyet fonksiyonunu en aza indirgeyen seçenek seçilmeli ve bir sonraki örnekleme zamanında uygulanmalıdır. Mevcut hatayı en aza indirgeyen tipik bir maliyet fonksiyonu Denklem (21)'deki gibidir.

$$g = |i_{st}^{abc,ref}(k + 1) - i_{st}^{abc}(k + 1)| \quad (21)$$

Maliyet fonksiyonu bir sonraki örnekleme zamanında, akım referansı ile STATCOM akımının öngörülen değeri arasındaki farkın mutlak değerinden oluşur.

1.8. Modifiye Edilmiş Bulanık Mantık Denetleyici (MBMD)

Hayatımızda karşımıza çıkan birtakım olayları açıklamak için kesin ifadeler kullanmak bazen imkansız gibidir. Bu olaylar belirsizliklere sahip olabilir ya da doğrusal olmayan özellikleri vardır. Bu olaylarla ilgili ölçülmek istenen büyüklükler veya belirlenmek istenen terimler hakkında her zaman kesin bilgilere sahip olamayabiliriz. Bu belirsizlik durumlarında bulanık mantık ortaya çıkmaktadır.

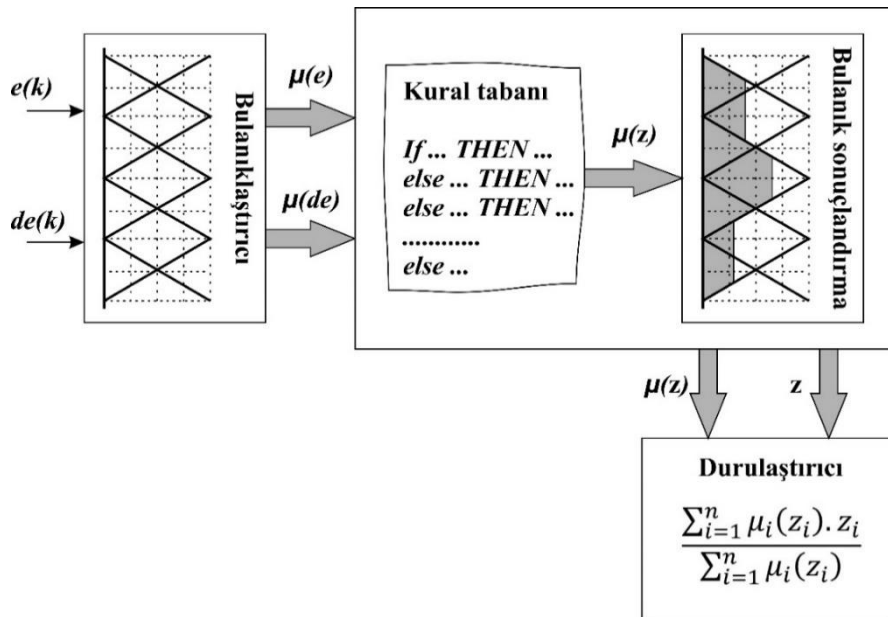
Bulanık mantık, if-then-else yapısı ile belirsizlik içeren, doğrusal olmayan, duruma ve koşullara göre farklı anlam ve değer ifade eden verileri temsil edip değerlendirebilmektedir. İnsanların deneyimleri aracılığıyla sayısal ifadeler yerine sözel ya da sembolik ifadeler kullanarak sistemlerin parametrelerini tasarlayan bir yöntemdir. Mantıksal ilişkilerle ilgilidir. Günlük hayatta kullandığımız birçok terim bulanık yapıdadır ya da bulanık ifadeler içerir. Örneğin bir insanın yaşlılık veya gençlik durumu birçok insana göre ya da aldığımız referansa göre görecelidir. Yaşlılığın veya gençliğin çok fazla, fazla, orta, az, çok az gibi derecelendirmeleri yapılabilir. Dolayısıyla mantıksal sistemlerin bulanık olarak ifade edilebilmeleri mümkündür.

Bulanık mantık, diğer kontrol sistemlerine göre birçok üstünlüklere sahiptir: Bir sistemle ilgili tam olarak bilinmeyen ya da eksik olan bilgilere göre işlem yapma yeteneğine

sahiptir. Sistem ile ilgili uzman kişi ya da kişilerin deneyimlerinden faydalanarak sistem hakkında gerekli olan komut ve talimatlardan yararlanır. Bulanık mantığın kontrol edilecek sistemin matematiksel modeline ihtiyacı yoktur ve serbest model yaklaşımına dayanır. Doğrusal olmayan bir kontrol yapısına sahip olduğu için de doğrusal olmayan sistemlerde kullanımı da mümkündür. Uzman kişinin kontrol stratejisinden yola çıktığı için anlaşılması kolay ve uygulanması da basittir. Aynı anda birçok işlem yapılabilmesine de izin verir. Diğer kontrol sistemlerinin çoğuna göre basit bir yazılıma sahip olması dolayısıyla da uygulamalar basitleşmektedir. Sistemin daha esnek çalışmasını sağlar ve sisteme müdahale etmeden yazılımı değiştirerek farklı durumlarda kontrol sağlanabilir.

Bulanık mantık kavramı ilk olarak Dr. Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır (Zadeh, 1965). Zadeh, dünyadaki birçok kümelerin kesin olmayan belirsiz sınırlarla tanımlandığını savunmuştur. Daha sonra E. H. Mamdani tarafından 1974 yılında bir buhar makinesi için bulanık mantık uygulama çalışması yapılmıştır (Mamdani, 1974).

Bulanık mantık endüstrinin her alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bazı belirsizliklere sahip olan sistemler için esnek karar verme avantajı nedeniyle kontrol sistemlerinde giderek artan bir kullanıma sahip olmaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen ani yük değişimleri, frekanstaki oynamalar ve harmonik bozulmaları bulanık mantık tabanlı denetleyicilerin kullanılmasını artırmaktadır. MBMD'nin genel şekli Şekil 30'daki gibidir.



Şekil 30. MBMD'nin temel yapısı (Altaş, 2017)

MBMD, Şekil 30'da görülen şemada 3 parçadan oluşan bir yapıya sahiptir. Bu üç parça, Bulanıklaştırıcı, Kural İşleme Ünitesi ve Durulaştırıcı'dır. Bulanıklaştırıcı ünitesi, uygulanan kesin girişleri alarak bulanık değerlere dönüştürmektedir. Elde edilen bulanık değerler kural işleme ünitesine gelir. Daha sonra bulanık kurallar vasıtasıyla işlenerek bulanık bir sonuç elde edilir. Bu değerler Durulaştırma ünitesine gelir. Sonrasında bulanık sonuçlar kesin bir değere çevrilerek sistemde kullanılır.

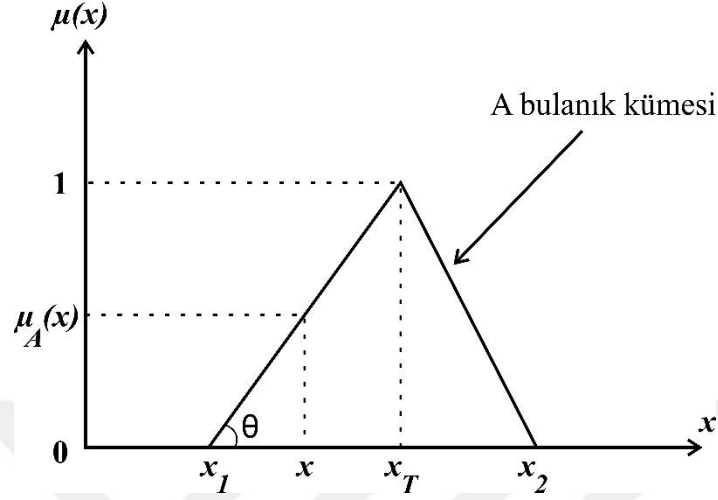
MBMD'nin girişi hata (e) ve hatadaki değişim (de)'dir. MBMD'nin kural tabanı ünitesinde bu giriş değerlerine göre bir kural tablosu oluşturulur. Oluşturulan kurallar için Tablo 7'de örnek bir tablo verilmiştir. Bu tablonun oluşturulmasına yönelik geniş açıklamalar (Altaş ve Sharaf, 2007) de bulunabilir.

Tablo 7. Kural tablosu

Hata (e)	Hatadaki değişim (de)				
	NB (Negatif Büyük)	NK (Negatif Küçük)	S (Sıfır)	PK (Pozitif Küçük)	PB (Pozitif Büyük)
NB	NB	NB	NK	NK	S
NK	NB	NK	NK	S	PK
S	NK	NK	S	PK	PK
PK	NK	S	PK	PK	PB
PB	S	PK	PK	PB	PB

Üyelik fonksiyonları MBMD'nin temel elemanlarıdır. Bu üyelik fonksiyonları yamuk, üçgen, sinüsoid ve cauchy gibi farklı tiplerde olabilir. Bu tezde üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır (Altaş ve Sharaf, 2007). Bir bulanık küme üyelik fonksiyonları ile temsil edilir. Klasik bir X kümesi üzerindeki bulanık küme Denklem (22) ile tanımlanabilir. Şekil 31'de üçgen üyelik fonksiyonu görülmektedir. Denklem (23) ve Denklem (24)'te ise üçgen üyelik fonksiyonu için denklemler verilmiştir.

$$A = \{(x, \mu_A(x)), \text{ öyle ki } x \in X\} \quad (22)$$



Şekil 31. Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\mu_A(x) = \max \left(\min \left(\frac{x - x_1}{x_T - x_1}, \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_T} \right), 0 \right) \quad (23)$$

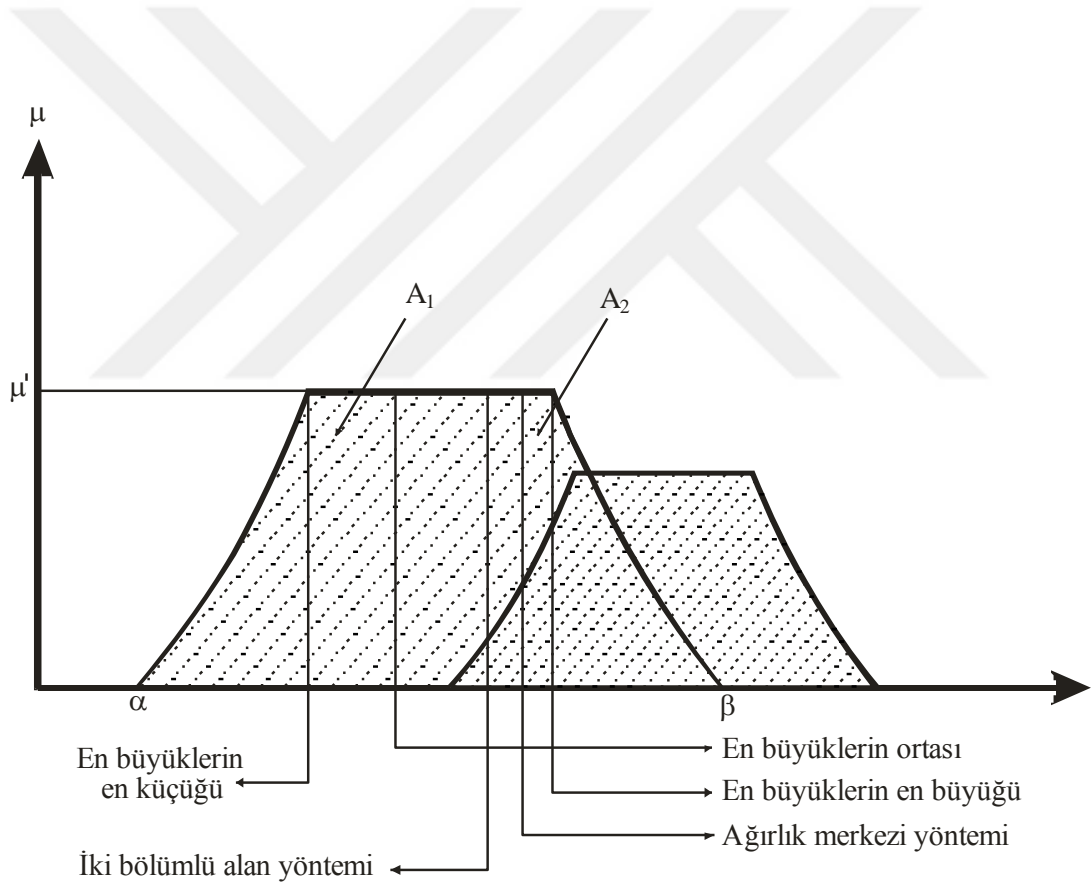
$$\tan \theta = \frac{1}{x_T - x_1} = \frac{\mu_A(x)}{x - x_1} \quad (24)$$

Denklem (22) ile verilen $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonunu temsil etmektedir. Bir başka deyişle x kesin sayılarının A bulanık kümesindeki üyelik dereceleridir. Bu üyelik fonksiyonu x kesin küme elemanlarının X kesin kümesine olan üyeliğinin derecesini temsil etmektedir. Yani örneğin bir eleman 1 değerine sahip ise o elemanın tümüyle o kümeye ait olduğu anlamına gelmektedir, 0 ise de o elemanın belirtilen kümeye ait olmadığını gösterir.

MBMD'nin bulanıklaştırma işleminde girişten gelen üyelik değerlerinin minimumları alınır ve kuralların her biri için gerekli ağırlık katsayıları belirlenir. Bulanıklaştırıcıya gelen kesin değerlerin burada tanımlı olan Pozitif Büyük (PB), Pozitif Küçük (PK), Sıfır (S), Negatif Küçük (NK) ve Negatif Büyük (NB) bulanık kümelerinde herhangi bir üyeliğe sahip olup olmadığı incelenir. Bulanık kümelerde üyeliğe sahip olan giriş değişkenlerinin bulanık değerleri bulanık kural işleme ünitesine gönderilir.

Ağırlık katsayıları öncelikle bulanıklaştırma ünitesinde belirlenir. Daha sonra elde edilen değerler çarpılmak üzere kuralların işlendiği kısma gönderilir. Bu ünite kullanılan bilgi tabanı ya da kural tabanı denetlenecek sistem ile ilgili bilgilerin toplandığı bir veri tablosudur. Sistemle ilgili bilgiler sistem giriş çıkışlarını if...then...else... koşul cümleleriyle birbirine bağlar. Bu koşulların her biri bir kuraldır. Bu aktif kuralların her biri için bir bulanık çıkış elde edilir ve bu bulanık çıkışlar durulaştırıcıya gönderilir.

Durulaştırma ünitesine gönderilen bulanık çıkışlar burada durulaştırılarak kesin sayıya dönüştürülür. Durulaştırma ünitesinde ağırlık merkezi yöntemi ya da diğer adıyla alanların merkezi yöntemi kullanılır ve böylece kesin değerler elde edilir. Şekil 32’de durulaştırma işleminin yöntemleri gösterilmiştir.



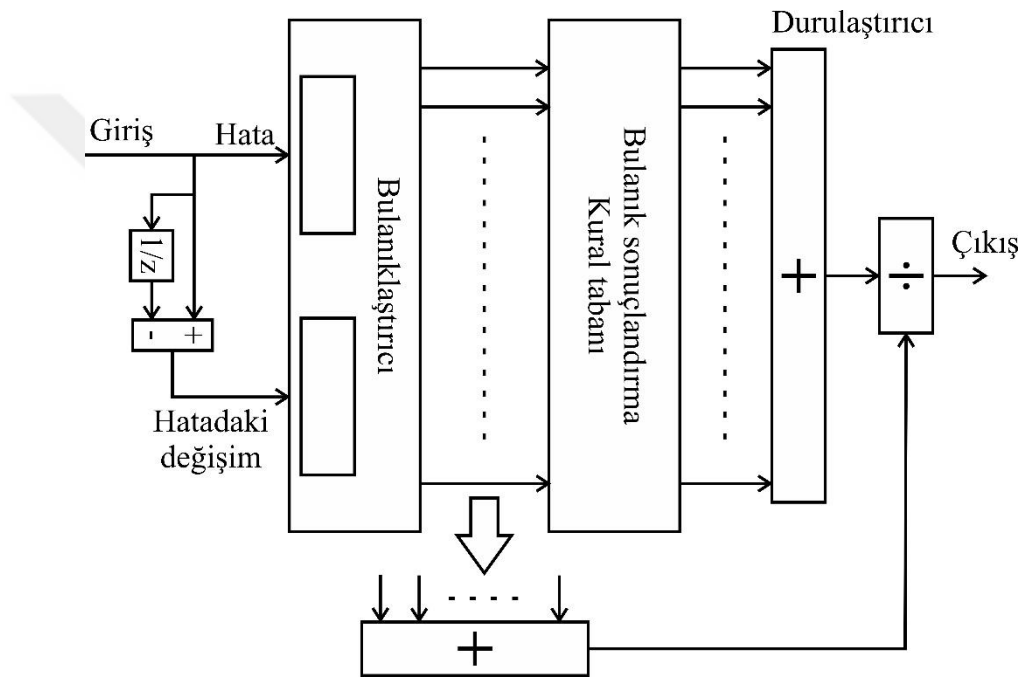
Şekil 32. Durulaştırma işlemi

Ağırlık Merkezi Yöntemine göre elde edilen kesin ifade Denklem (26)'ya göre bulunur.

$$\tan\theta = \frac{1}{x_T - x_1} = \frac{\mu_A(x)}{x - x_1} \quad (25)$$

$$Z_{COA} = \frac{\int \mu(z) \cdot z \cdot dz}{\int \mu(z) dz} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(z_i)} \quad (26)$$

Bu kesin değerler denetleyicinin çıkışıdır. Şekil 33'te MBMD blok diyagramında ayrıntılı model görülmektedir.

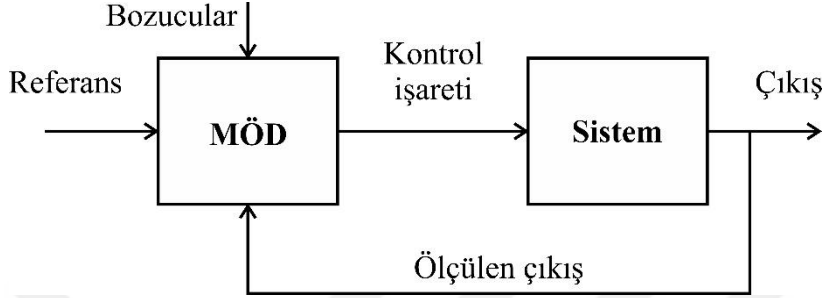


Şekil 33. MBMD blok diyagramı

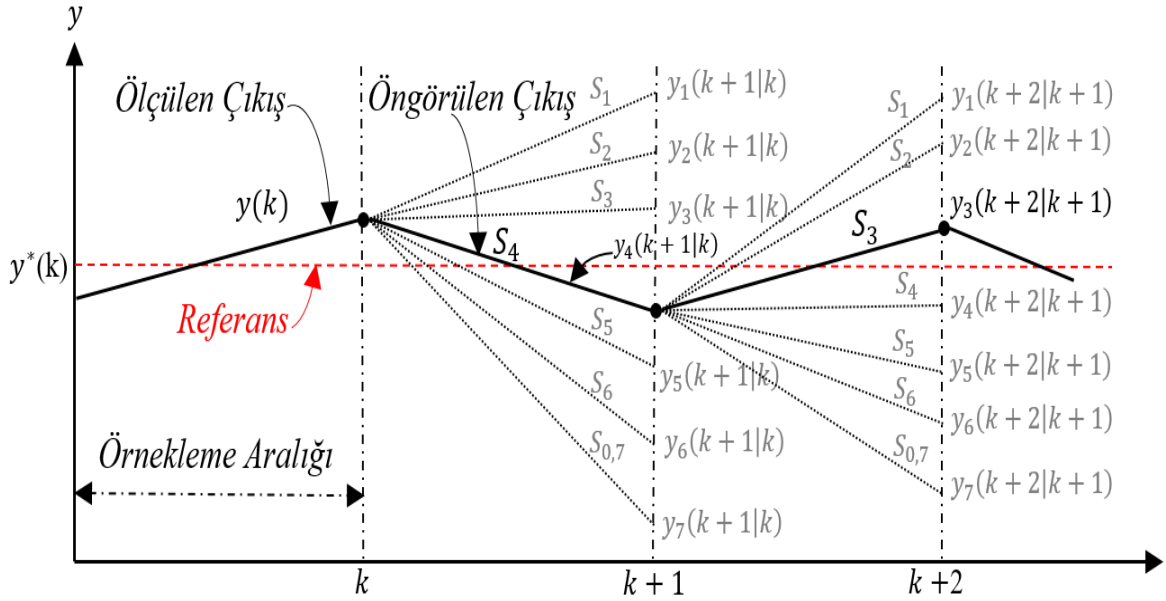
1.9. Model Öngörülü Denetleyici

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan kontrol teknikleri olan klasik PID kontrol tekniği dışında gelişmiş kontrol tekniklerinden biri olan Model Öngörülü Denetleyiciler (MÖD) de kullanılmaktadır. Güç elektroniği alanında MÖD'nin ilk uygulanmaya başlaması 1980'li yıllarda başlamıştır. Güç elektroniğinde ilk uygulama alanları düşük anahtarlama frekansına sahip yüksek güç sistemleridir. Hızlı ve güçlü mikroişlemcilerin geliştirilmesi ile MÖD'nin güç elektroniği alanındaki uygulamaları kayda değer bir şekilde artmıştır. Zamanda öngörü ufkuna kadar, bu çeşit denetleyicilerin ortak

elemanları değişkenlerin gelecek davranışlarını tahmin etmek için sistemin modelini kullanırlar ve maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle en iyi çalışma durumunu seçerler. Şekil 34'te MÖD'nin temel yapısı ve Şekil 35'te öngörülen çıkış seçim yörüngesi görülmektedir (Danayiyen vd, 2017).



Şekil 34. MÖD'nin temel yapısı



Şekil 35. MÖD'nin öngörülen çıkış yörüngesi

(27) ve (28) denklemlerinde MÖD'nin durum uzay modeli olarak ifade edilebilen ayrık zaman modeli eşitlikleri görülmektedir.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (27)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (28)$$

Sistemin istenilen davranışını temsil etmek için bir maliyet fonksiyonu tanımlanmalıdır. Maliyet fonksiyonunun denklemini aşağıda görülmektedir. Bu denklem, referans değerleri, gelecekteki durumları ve gelecekteki harekete geçirme işlevlerini dikkate alır.

$$J = f(x(k), u(k), \dots, u(k + N)) \quad (29)$$

MÖD, sistem modeline ve sistem kısıtlamalarına tabi tutularak, N süresi boyunca önceden tanımlanmış bir ufuk için maliyet fonksiyonunu en aza indirmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Sonuç, N adet en uygun çalıştırma dizisidir. Denetleyici, optimizasyon probleminin her örnekleme anında tekrar çözüldüğü bu dizinin sadece ilk elemanını uygular. Bu işlem için ise yeni ölçülen bilgiler kullanılır ve her zaman en uygun çalıştırmanın yeni bir dizisi elde edilir.

MÖD teorisi 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlandığından dolayı güç elektroniği ve sürücülerindeki uygulamaları, bu sistemlerde gerekli olan hızlı örnekleme zamanlarından dolayı daha yeni yeni uygulanmaya başlanmıştır. Hızlı mikroişlemcilerin geliştirilmesiyle güç elektroniği ve sürücüler alanlarında bu yeni kontrol tekniğinin kullanımı hızla artmaktadır.

MÖD, denetleyicilerin çok geniş bir alanını kapsar ve literatürde birçok farklı uygulamaları sunulmuştur. Bunların en ilgi çekici olanı optimizasyon problemlerinin analitik olarak çözümlenmesine izin veren Genelleştirilmiş Öngörülü Denetleyici (GÖD)'dir. Sistemin doğrusal olduğu ve kısıtlamaların olmadığı durumda belirgin bir kontrol yasası sağlayarak kolayca uygulanabilir (Bordons ve Camacho, 1998; Clarke vd, 1987). Bu denetleyici birçok güç elektroniği çeviricileri (El-Kholy, 2005; Effler vd, 2008; Low, 1998) ve sürücüler uygulamalarında (Kennel vd, 2001; Efiguren vd, 2008; Hassaine vd, 2007) kullanılmaktadır.

MÖD'nin gerçek sistemlerde uygulanmasını mümkün kılmak için, hızlı örnekleme nedeniyle hesaplamalar için az zaman göz önüne alındığında, açık MÖD isimli bir strateji kullanılarak optimizasyon problemlerinin çoğunun çevrimdışı hale getirilmesi önerilmiştir. MÖD'nin optimizasyon problemi, sistem modelini, kısıtlamaları ve hedefleri göz önüne alarak çevrimdışı olarak çözülür ve sistemin durumunun bir fonksiyonu olarak en uygun çözümü içeren bir başvuru çizelgesinin ortaya çıkmasına neden olur. DA-DA dönüştürücüler ve üç fazlı eviriciler (Beccuti vd, 2009; Mariethoz ve Morari, 2009) gibi güç

dönüştürücülerin kontrolü ve sabit mıknatıslı senkron motorların kontrolü için açık MÖD uygulanmıştır (Mariethoz vd, 2009).

Çoğu GÖD ve açık MÖD şemaları bir modülatör kullanarak doğrusal bir sistem olarak güç dönüştürücüsü modeline benzemektedir. Bu yaklaşım, optimizasyonu basitleştirir ve çevrimiçi optimizasyona olan ihtiyacı ortadan kaldırarak açık bir kontrol yasasının hesaplanmasına izin verir. Bununla birlikte, bu sadeleştirme, güç çeviricilerinin ayrı durumlarını hesaba katmaz.

Güç dönüştürücülerinin ayrı durumlarının dahil edilmesiyle optimizasyon problemlerinin basitleştirilmesi mümkündür ve böylece çevrimiçi uygulanmasına izin verilir. Sınırlı sayıda anahtarlama durumu ve günümüzde mevcut olan hızlı mikroişlemciler göz önünde bulundurulduğunda, her anahtarlama durumunun çevrimiçi olarak değerlendirilmesiyle optimum çalıştırmanın hesaplanması gerçek bir olasılıktır. Bu düşünce ile kontrol tasarımında daha fazla esneklik ve basitlik sağlanmış olunur. Güç dönüştürücülerindeki anahtarlama durumları sonlu sayıda olası çalıştırmayı mümkün kıldığından, bu son yaklaşıma bazı çalışmalarda sonlu kontrol MÖD denir (Narimani vd, 2015; Xia vd, 2014).

Bir güç dönüştürücüsünün kontrolü için sonlu kontrol MÖD kullanılmak istendiğinde öncelikle aşağıdaki durumlar incelenmelidir:

- Tüm olası anahtarlama durumlarını ve giriş veya çıkış gerilimlerine veya akımlarına olan ilişkisini tanımlayan güç dönüştürücüsünün modellenmesi.
- Sistemin istenen davranışını temsil eden bir maliyet fonksiyonunun tanımlanması.
- Kontrol edilecek değişkenlerin gelecekteki davranışlarını öngören ayrık zaman modellerinin elde edilmesi.

Bir dönüştürücü modellenirken, temel eleman bir güç anahtarıdır (IGBT, Tristör, GTO, vd.). Bu güç anahtarlarının en basit modeli, açık ve kapalı olmak üzere sadece iki durumlu olan ideal bir anahtar olarak düşünülebilir. Bu nedenle, bir güç dönüştürücüsünün anahtarlama durumlarının toplam sayısı, her anahtarın iki anahtarlama durumunun farklı kombinasyonlarının sayısına eşittir. Bununla birlikte, DA bağlantısını kısa devre yapan kombinasyonlar gibi bazı kombinasyonlar mümkün değildir. Mümkün olan anahtarlama durumlarının sayısı için genel kural Denklem (30) ile verilmiştir.

$$N = x^y \quad (30)$$

Burada x , çeviricinin her bir faz bacağıının mümkün olan durumlarının sayısı, y , çeviricinin faz ya da bacak sayısı ve N ise mümkün olan anahtarlama durumlarının sayısıdır. Örneğin üç fazlı iki seviyeli bir evirici için mümkün olan anahtarlama durumu $N = 2^3 = 8$ olacaktır.

Kaskad çok seviyeli eviricilerde her faz için mümkün olan gerilim seviyelerinin sayısı Denklem (31) ile verilmektedir.

$$m = 2H + 1 \quad (31)$$

Burada m eviricinin seviye sayısı ve H ise bir faz bacağı için seri bağlı hücre (H-köprü) sayısıdır.

Üç fazlı kaskad H-köprü evirici için gerilim seviye kombinasyonlarının sayısı (K_m) Denklem (32) ile verilmektedir.

$$K_m = m^3 \quad (32)$$

Bir RL yüküne sahip üç fazlı kaskad H-köprü evirici için faz gerilimi Denklem (33) ile verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{st_{aN}} \\ V_{st_{bN}} \\ V_{st_{cN}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{di_{st_a}}{dt} + Ri_{st_a} + V_{seb_a} \\ L \frac{di_{st_b}}{dt} + Ri_{st_b} + V_{seb_b} \\ L \frac{di_{st_c}}{dt} + Ri_{st_c} + V_{seb_c} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Yük modeli Denklem (34)'teki α - β vektörel dönüşümü kullanılarak Denklem (35) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta} = L \frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}}{dt} + R\mathbf{i}_{\alpha\beta} \quad (35)$$

Burada $\mathbf{V}_{\alpha\beta}$ evirici gerilim vektörü ve $\mathbf{i}_{\alpha\beta}$ yük akım vektörünü ifade etmektedir.

Örneğin üç fazlı beş seviyeli bir kaskad H-köprü evirici için mümkün olan gerilim seviye kombinasyonlarının sayısı $K_m = 5^3 = 125$ olacaktır. Bazı çok seviyeli evirici yapıları için (örneğin dokuz seviyeli kaskad H-köprü evirici) gerilim seviye kombinasyonlarının sayısı milyonları bulmaktadır.

Diğer taraftan her hücre iki anahtar sinyaline sahiptir ve her faz bacağındaki hücreler için eviricinin bir faz bacağına düşen gerilim, iki durumlu anahtarlama sinyalleri cinsinden Denklem (36)'da verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{st_aN} \\ V_{st_bN} \\ V_{st_cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{DC} \sum_{j=1}^H (S_{aj,1} - S_{aj,2}) \\ V_{DC} \sum_{j=1}^H (S_{bj,1} - S_{bj,2}) \\ V_{DC} \sum_{j=1}^H (S_{cj,1} - S_{cj,2}) \end{bmatrix} \quad (36)$$

Burada örneğin A fazı için; $S_{aj,1}$ ve $S_{aj,2}$ A fazının j hücresinin anahtarlama sinyalleridir. Bir H-köprü evirici için mümkün olan anahtarlama kombinasyonları (K_s) Denklem (37) ile verilmektedir.

$$K_s = 2^{6H} \quad (37)$$

STATCOM evirici çıkış gerilim vektörü Denklem (38)'de verilmiştir.

$$\mathbf{V}_{st} = \frac{2}{3} (V_{st_aN} + \mathbf{a}V_{st_bN} + \mathbf{a}^2V_{st_cN}) \quad (38)$$

Burada \mathbf{a} birim vektörü ifade etmektedir. ($\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$) Denklem (33), Denklem (38)'den yararlanılarak vektörel formda yazılırsa Denklem (39) elde edilir.

$$V_{st} = Ri_{st} + L \frac{di_{st}}{dt} + V_{seb} \quad (39)$$

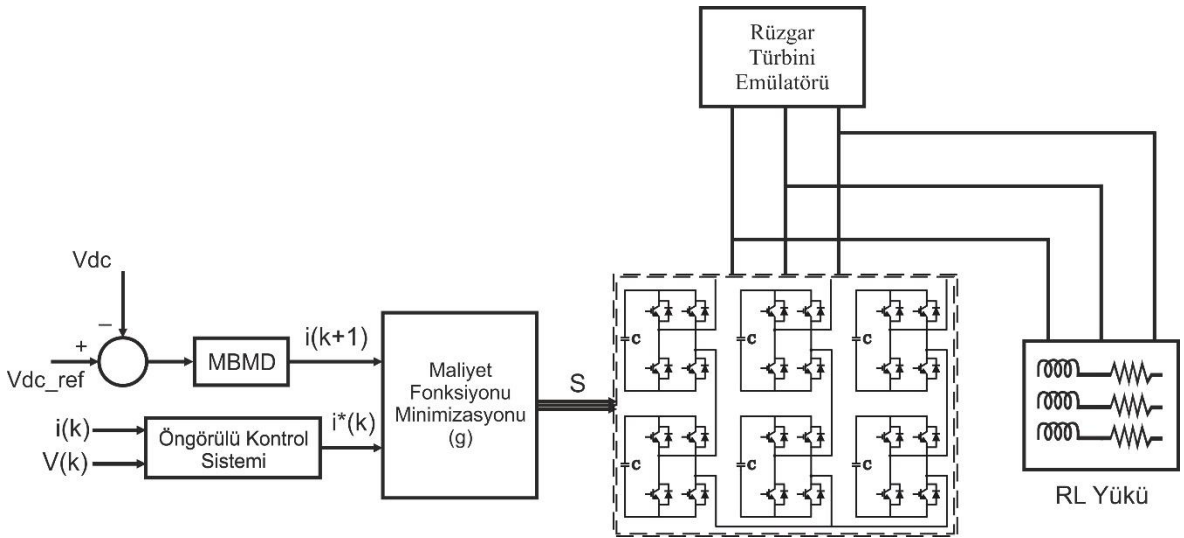
Öngörülü akım kontrol şeması evirici tarafından üretilen mümkün olan her gerilim vektörü için yük akımının davranışının tahmin edilmesidir. Öngörülen akım, sistemin ayrık modeline dayanmaktadır. Bu durum Denklem (40)'ta gösterildiği gibidir.

$$\frac{di_{st}}{dt} \approx \frac{i_{st}(k+1) - i_{st}(k)}{T_s} \quad (40)$$

Denklem (35) ayrık zamanlı olarak gösterilir ve yük akımının öngörülen değeri hesaplanırsa;

$$i_{st_pred}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_{st}(k) + \frac{T_s}{L} (V_{st}(k) - V_{seb}(k)) \quad (41)$$

denklemleri elde edilir. MÖD'nin amacı referans akımı başarılı bir şekilde takip etmek, her bir fazdaki her bir H-köprü hücresinin kapasite gerilimini dengelemek ve anahtarlama frekansını optimize etmektir. Model öngörülü akım kontrolörün blok diyagramı Şekil 36'da görülmektedir.



Şekil 36. Önerilen model öngörülü akım kontrol blok diyagramı

Öngörülen akım, kontrol sisteminin ihtiyacı olan uygun gerilim vektörünü seçmek için aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Maliyet fonksiyonu öngörülen akım ile referans değer arasındaki hata ölçümleri ile ifade edilir.

$$g = |i_{st_ref_a}(k+1) - i_{st_pred_a}(k+1)| + |i_{st_ref_b}(k+1) - i_{st_pred_b}(k+1)| \quad (42)$$

Burada $i_{st_ref_a}(k+1)$ ve $i_{st_ref_b}(k+1)$ referans akım vektörünün gerçek ve sanal kısımlarıdır. $i_{st_pred_a}(k+1)$ ile $i_{st_pred_b}(k+1)$ ise gerilim vektörü için öngörülen yük akım vektörünün gerçek ve sanal kısımlarıdır. Basitleştirmek amacıyla, bir örnekleme zaman aralığında referans akımın yeterli derecede değişimler göstermediği varsayılırsa $i_{st_ref_a\beta}(k+1) = i_{st_ref_a\beta}(k)$ olduğunu düşünebiliriz.

Dönüştürücünün modelinin diğer bir durumu, üç fazlı veya çok fazlı dönüştürücüler için, anahtarlama durumları ile gerilim vektörleri arasındaki ilişkidir. Birçok durumda, iki veya daha fazla anahtarlama durumu için aynı gerilim vektörünün üretildiğini bulabiliriz. Örneğin, üç fazlı iki seviyeli bir eviricide sekiz anahtarlama durumu vardır ve iki anahtarlama durumunun sıfır vektör oluşturduğu yedi farklı gerilim vektörü üretir. Üç fazlı beş seviyeli bir eviricide, 61 farklı gerilim vektörü üreten 125 anahtarlama durumu ile büyük bir fazlalık vardır. Yani 125 adet gerilim vektörü içerisinde aynı olanlar çıkarıldığında birbirinden farklı 61 adet gerilim vektörü elde edilmektedir. Kaskad H-köprü evirici için farklı gerilim vektörlerinin sayısı K_{m_y} , Denklem (43) ile hesaplanmaktadır.

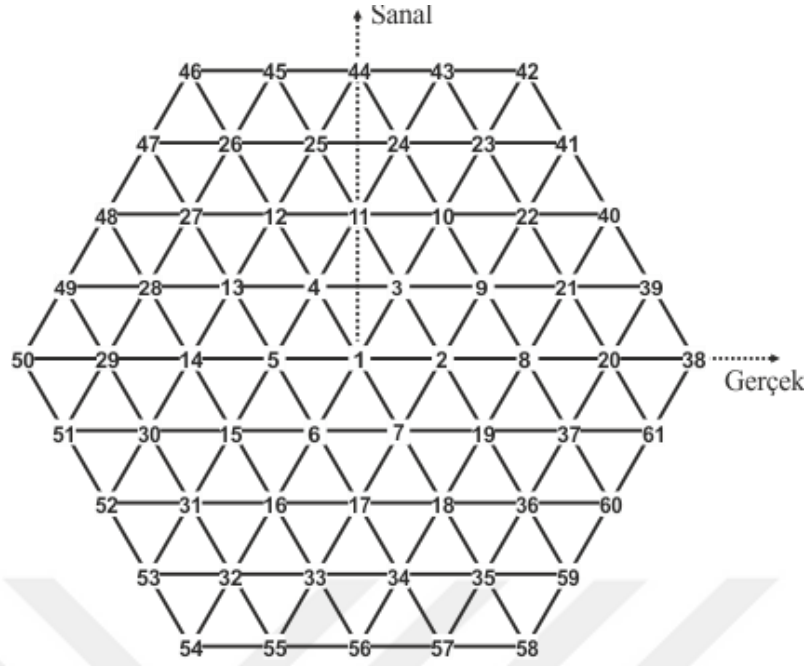
$$K_{m_y} = 12H^2 + 6H + 1 \quad (43)$$

Şekil 37'de ve Tablo 8'de anahtarlama durumları ile gerilim vektörleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.

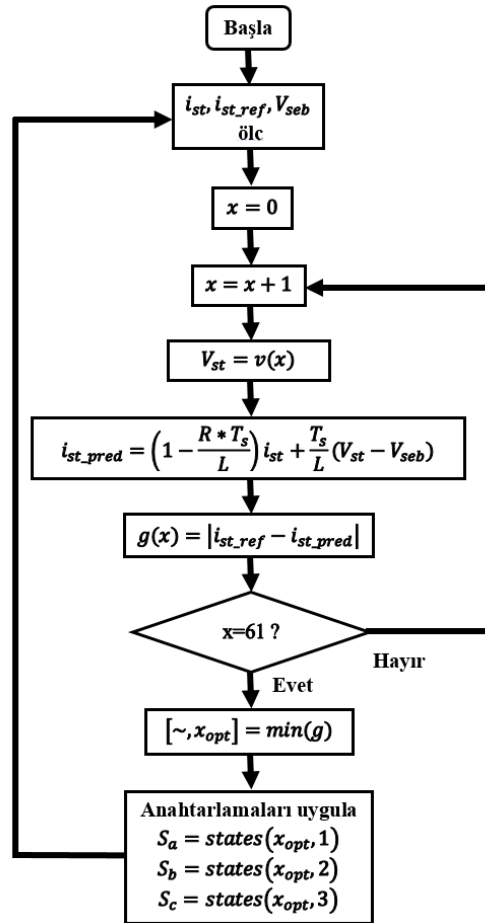
Şekil 38'de MÖD'ün akış diyagramı görülmektedir.

Tablo 8. Anahtarlama durumları

Nokta Numarası	Anahtarlama Durumları	Nokta Numarası	Anahtarlama Durumları	Nokta Numarası	Anahtarlama Durumları
1	(2,2,2), (1,1,1), (0,0,0), (-1,-1,-1), (-2,-2,-2)	21	(2,0,-1), (1,-1,-2)	41	(2,1,-2)
2	(1,0,0), (2,1,1), (0,-1,-1), (-1,-2,-2)	22	(1,0,-2), (2,1,-1)	42	(2,2,-2)
3	(1,1,0), (2,2,1), (0,0,-1), (-1,-1,-2)	23	(2,2,-1), (1,1,-2)	43	(1,2,-2)
4	(0,1,0), (-1,0,-1), (-2,-1,-2), (1,2,1)	24	(1,2,-1), (0,1,-2)	44	(0,2,-2)
5	(0,1,1), (-1,0,0), (-2,-1,-1), (1,2,2)	25	(0,2,-1), (-1,0,-2)	45	(-1,2,-2)
6	(0,0,1), (-1,-1,0), (-2,-2,-1), (1,1,2)	26	(-1,2,-1), (-2,1,-2)	46	(-2,2,-2)
7	(1,0,1), (2,1,2), (0,-1,0), (-1,-2,-1)	27	(-1,2,0), (-2,1,-1)	47	(-2,2,-1)
8	(2,0,0), (1,-1,-1) (0,-2,-2)	28	(-2,1,0), (-1,2,1)	48	(-2,2,0)
9	(2,1,0), (1,0,-1) (0,-1,-2)	29	(-1,2,2), (-2,1,1)	49	(-2,2,1)
10	(2,2,0), (1,1,-1), (0,0,-2)	30	(-1,1,2), (-2,0,1)	50	(-2,2,2)
11	(1,2,0), (0,1,-1), (-1,0,-2)	31	(-2,-1,1), (-1,0,2)	51	(-2,1,2)
12	(0,2,0), (-1,1,-1), (-2,0,-2)	32	(-1,-1,2), (-2,-2,1)	52	(-2,0,2)
13	(0,2,1), (-1,1,0), (-2,0,-1)	33	(0,-1,2), (-1,-2,1)	53	(-2,-1,2)
14	(-1,1,1), (-2,0,0), (0,2,2)	34	(0,-2,1), (1,-1,2)	54	(-2,-2,2)
15	(0,1,2), (-1,0,1), (-2,-1,0)	35	(1,-2,1), (2,-1,2)	55	(-1,-2,2)
16	(0,0,2), (-1,-1,1), (-2,-2,0)	36	(1,-2,0), (2,-1,1)	56	(0,-2,2)
17	(1,0,2), (0,-1,1), (-1,-2,0)	37	(1,-2,-1), (2,-1,0)	57	(1,-2,2)
18	(2,0,2), (1,-1,1), (0,-2,0)	38	(2,-2,-2)	58	(2,-2,2)
19	(2,0,1), (1,-1,0), (0,-2,-1)	39	(2,-1,-2)	59	(2,-2,1)
20	(2,-1,-1), (1,-2,-2)	40	(2,0,-2)	60	(2,-2,0)
				61	(2,-2,-1)



Şekil 37. Gerilim vektörleri



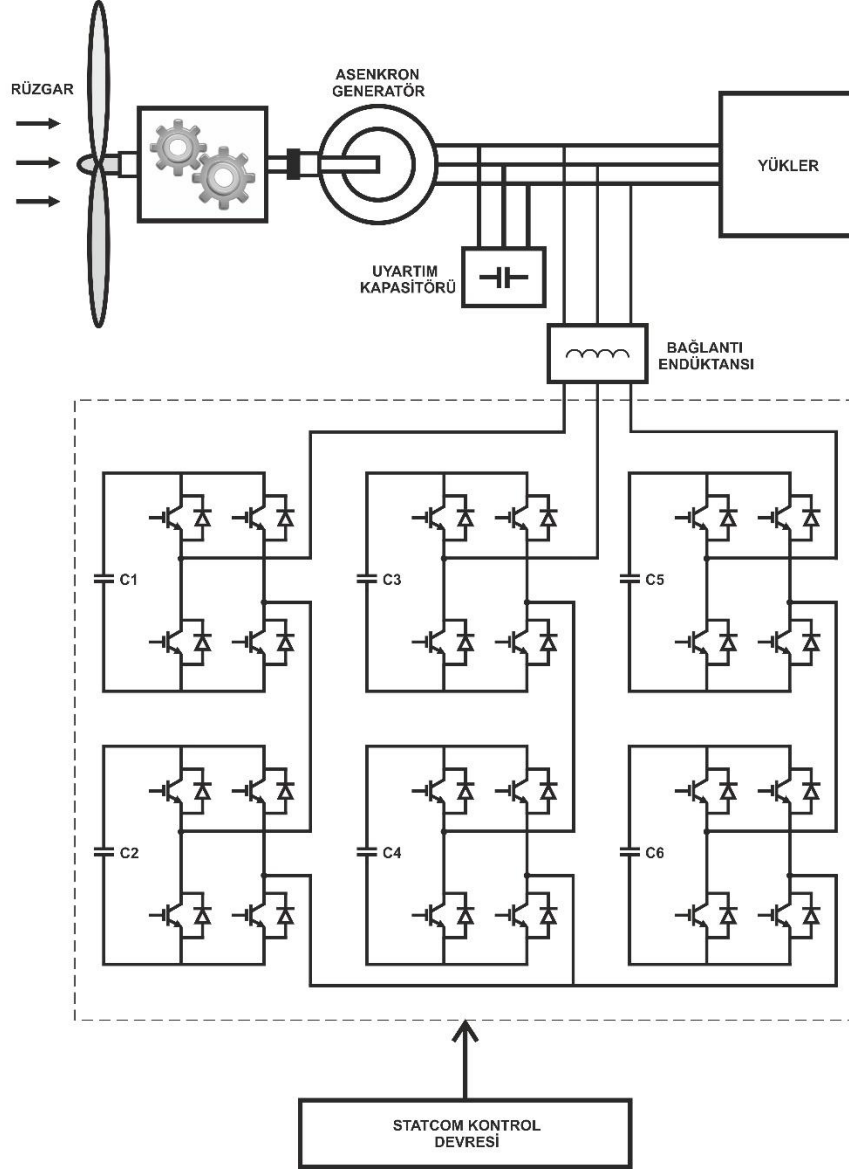
Şekil 38. MÖD akış diyagramı

1.10. Beş Seviyeli H-köprü Temelli STATCOM İçin Denetim Yöntemi Tasarımı

STATCOM için önerilen denetim yöntemlerinden biri olan dolaylı akım denetim yönteminde DA gerilim sabit tutulur ve eviricinin üretmesi gereken referans gerilimler referans aktif ve reaktif güce göre elde edilir. STATCOM denetimi için bu yöntem temel alınmıştır.

Şekil 39'da görülen STATCOM'un beş seviyeli evirici yapısında her fazda 2 adet olmak üzere toplam 6 adet H-köprü bulunmaktadır. Eviricinin her bir fazının gerilimi, ilgili fazdaki her H-köprünün çıkış gerilimlerinin toplamıdır. Bir H-köprünün her bir kolu, iki adet seri bağlı anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Bu anahtarlar DA-hat kondansatörünü kısa devreden korumak için birbirine zıt şekilde anahtarlantılar. (Birisini açık iken diğeri kapalıdır.) Bu korumayı sağlamak için anahtarların aynı anda açık olmasını önlemek gereklidir. Bunun için de anahtarlantılar arasına uygun bir ölü zaman gecikmesi uygulamak gerekir. Böylece bir H-köprünün aynı kol üzerindeki anahtarlarından birisi tamamen kapalı konuma geçmeden diğeri açık konuma geçmemiş olur.

Şekil 39'da görüldüğü gibi STATCOM güç sistemine paralel bağlanmıştır. Ortak bağlantı noktasındaki bu bağlantıyı sağlamak için de seri bir bağlantı endüktansı (Z_{st}) kullanılmıştır. Bağlantı endüktansına doğru akan reaktif akımın (i_{st}) büyüklüğü, STATCOM ac çıkış gerilimi (v_{st}) ile ortak bağlantı noktasındaki şebeke gerilimi (v_{pcc}) arasındaki gerilim farkı ile orantılıdır. Bu da DA-hat kondansatörünün geriliminin (v_{DA}) genliğinin kontrol edilmesiyle elde edilir.



Şekil 39. STATCOM'lu sistem yapısı

ABC koordinat eksenindeki denklem denetim sistemi tasarımı açısından çok zor bir denklemdir. Çünkü matematiksel modelin AA tarafındaki değişkenler zamana bağlıdır. Bu nedenle ABC koordinat eksenini PARK dönüşümü ile iki faz koordinat eksenine dönüştürülür. ABC koordinat ekseninin matrisi iki faz eş zamanlı olarak dönen koordinat eksenine Denklem (44)'te PARK dönüşüm matrisi yardımıyla dönüştürülür.

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$i_{stdq} = T * i_{abc}$ olarak dönüşüm yapılır.

STATCOM akımı ile ilgili dönüşüm sonrasında Denklem (45) yazılabilir:

$$i_{st} = i_{st} < \pm\varphi = \pm i_{std} \pm j i_{stq} \quad (45)$$

Burada φ ; i_{st} ile v_{pcc} arasındaki faz farkı, i_{std} ; DA-hat kondansatörünün şarj/deşarj durumları için kullanılan aktif akım ve i_{stq} ; bağlantı endüktansı Z_{st} 'ye doğru akan reaktif akımdır.

PLL, yük akımının i_{lq} STATCOM çıkış geriliminin ve akımının park dönüşümü ile dq eksen takımına dönüştürülmesi için gerekli olan şebeke geriliminin faz açısını hesaplamaktadır. Daha sonra da denetleyici, eviricinin anahtarlama elemanlarını sürmek için anahtarlama sinyallerini üretmektedir. Bu anahtarlama sinyallerini üretmek için sinüzoidal PWM (SPWM) tekniği kullanılmıştır (Naderi ve Rahmati, 2008).

STATCOM'un dq eksen takımındaki transfer fonksiyonu Denklem (46)'daki gibidir.

$$\begin{bmatrix} v_{std} \\ v_{stq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{pccd} \\ v_{pccq} \end{bmatrix} - L_{st} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{std} \\ i_{stq} \end{bmatrix} - \omega L_{st} \begin{bmatrix} i_{stq} \\ -i_{std} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$v_{std}(n, n+1) = v_{pccd}(n, n+1) - \frac{L_{st}}{T_{istd}} (i_{std}(n+1) - i_{std}(n)) - \omega L_{st} i_{stq}(n, n+1) \quad (47)$$

$$v_{stq}(n, n+1) = v_{pccq}(n, n+1) - \frac{L_{st}}{T_{istq}} (i_{stq}(n+1) - i_{stq}(n)) + \omega L_{st} i_{std}(n, n+1) \quad (48)$$

STATCOM uygulamalarında denetleyici cevabının her zaman hızlı ve doğru olması istenir. Bu nedenle STATCOM'un bir sonraki örnekteki çıkış akımının anlık örnekteki akım referansını izlemesi istenir.

$$i_{std}(n+1) = i_{std_ref}(n) \quad (49)$$

$$i_{stq}(n+1) = i_{lq}(n) \quad (50)$$

Bir örnekleme periyodu sırasında n ve $n + 1$ örnekleri arasında doğrusallık oluşur.

$$i_{std}(n, n+1) = (i_{std_ref}(n) + i_{std}(n)) / 2 \quad (51)$$

$$i_{stq}(n, n+1) = (i_{iq}(n) + i_{stq}(n)) / 2 \quad (52)$$

Şebeke gerilimi ve STATCOM çıkış gerilimi bir örnekleme periyodunda referans gerilime eşit ve sabit kabul edilir.

$$v_{pccd}(n, n+1) = v_{pccd}(n) \quad (53)$$

$$v_{pccq}(n, n+1) = v_{pccq}(n) = 0 \quad (54)$$

$$v_{std}(n, n+1) = v_{std_ref}(n) \quad (55)$$

$$v_{stq}(n, n+1) = v_{stq_ref}(n) \quad (56)$$

(49) – (56) denklemleri (47) ve (48) denklemlerinde yerine konulursa referans dq gerilim değerleri Denklem (57) ve Denklem (58)'deki gibi elde edilir.

$$v_{std_ref}(n) = v_{pccd}(n) - K_{id}(i_{std_ref}(n) - i_{std}(n)) - \omega L_{st}(i_{iq}(n) + i_{stq}(n)) / 2 \quad (57)$$

$$v_{stq_ref}(n) = -K_{iq}(i_{iq}(n) - i_{stq}(n)) + \omega L_{st}(i_{std_ref}(n) + i_{std}(n)) / 2 \quad (58)$$

Burada denetleyici kazancının değeri:

$$K_{i(d,q)} = \frac{L_{st}}{T_{ist(d,q)}} \quad (59)$$

Böylece şebeke gerilimine karşı istenilen STATCOM çıkış geriliminin genliği ve onun faz açısı sırasıyla Denklem (60)'ta ve Denklem (61)'de görüldüğü gibidir.

$$v_{st_ref} = \sqrt{(v_{std_ref})^2 + (v_{stq_ref})^2} \quad (60)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{stq_ref}}{v_{std_ref}} \right) \quad (61)$$

Şekil 39'da her bir H-köprüdeki kondansatörler enerji depolama elemanı olarak kullanılır. Bu kondansatör gerilimlerinin toplamı gerilim kontrol döngüsünde aktif referans akım tarafından hesaplanan sistem ihtiyacına göre düzenlenir.

$$I_{DA} = C \frac{dV_{DA}}{dt} \quad (62)$$

C iki H-köprünün kapasitelerinin toplamı ve I_{DA} eviriciye doğru akan akımdır. Bu denklem dq koordinat ekseninde tekrar yazılırsa Denklem (63) elde edilir.

$$I_{DA_dq} = C \frac{dV_{DA_dq}}{dt} \quad (63)$$

DA-hat kondansatörlerinin şarj ve deşarjı için sadece d eksen akım bileşenlerine ihtiyaç olduğu için q eksen bileşenleri ihmal edilebilir. n ve n+1 örnekler için yukarıdaki denklem tekrar yazılırsa ve tercih edilen örnek oranına (T_{vdad}) bölünürse n ve n+1 örnek periyotları için aktif akım vektörünün ortalama genliği Denklem (64)'deki gibidir.

$$I_{DA_d}(n, n + 1) = \frac{C}{T_{vdad}} V_{DA_d}(n, n + 1) \quad (64)$$

Bir sonraki örnekteki DA-hat kondansatörlerine karşı toplam DA gerilim referans gerilime eşitlenerek bulunur.

$$V_{DA_d}(n + 1) = V_{DA_d_ref}(n) \quad (65)$$

Bir örnekleme periyodunda akım sabit ve referans akıma eşit kabul edilir.

$$I_{DA_d}(n, n + 1) = I_{std_ref}(n) \quad (66)$$

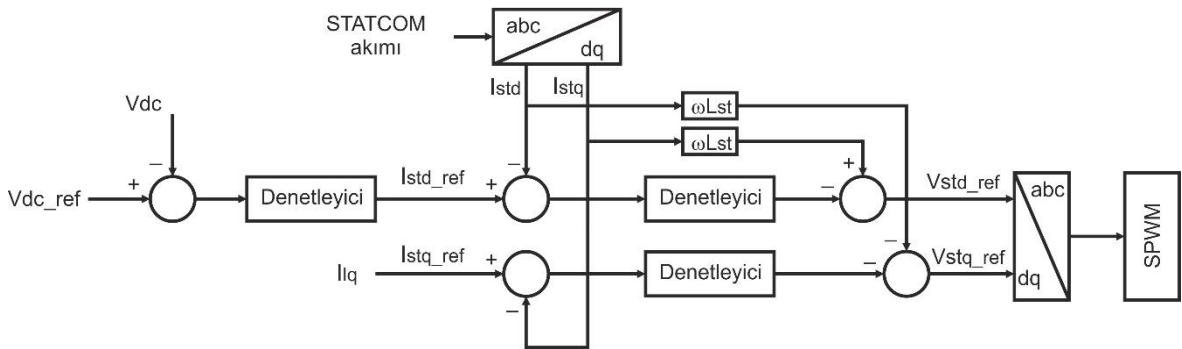
Denklem (65) ve Denklem (66), Denklem (64)'te yerine konulursa sonuç referans akım değeri Denklem (67)'deki gibi olur.

$$I_{std_ref}(n) = \frac{C}{T_{vdad}} (V_{DA_d_ref}(n) - V_{DA_d}(n)) \quad (67)$$

DA referans gerilim 1 p.u. ise denetleyicinin gerilim katsayısı Denklem (68)'deki gibi olur.

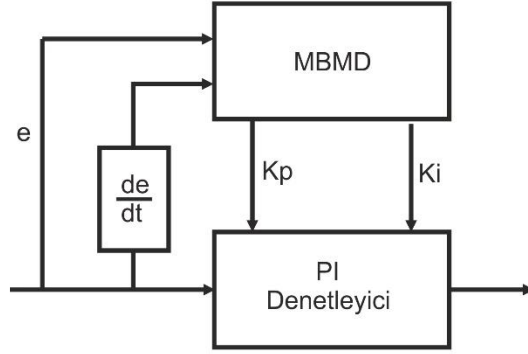
$$K_{p_vd} = \frac{C}{T_{vdad}} \quad (68)$$

Şekil 40, (60), (61) ve (67) numaralı denklemlerden elde edilerek STATCOM için senkron referans yapı teorili dolaylı akım denetim sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Bu denetim sisteminde DA gerilim sabit tutulur ve eviricinin üretmesi gereken referans gerilimler referans aktif ve reaktif güce göre elde edilir. Bu denetim yöntemi için gerekli olan AA ve DA akım ve gerilimler sensörler yardımıyla ölçülür ve denetim sisteminin giriş parametreleri oluşturulur. Ölçülen bu sinyaller referans değerleri oluşturacak şekilde çözümlenir ve denetleyiciler yardımıyla işlenerek yarıiletken elemanlara gönderilmek üzere anahtarlama sinyalleri üretilir.



Şekil 40. d-p referans yapı teorili dolaylı akım denetim yöntemi

Şekil 40'daki denetim yönteminin denetleyici blokları için farklı denetleyici yapıları (PI, MBMD, MBMD-PI, MÖD) kullanılmıştır. Şekil 41'de MBMD-PI denetleyicinin genel yapısı görülmektedir.

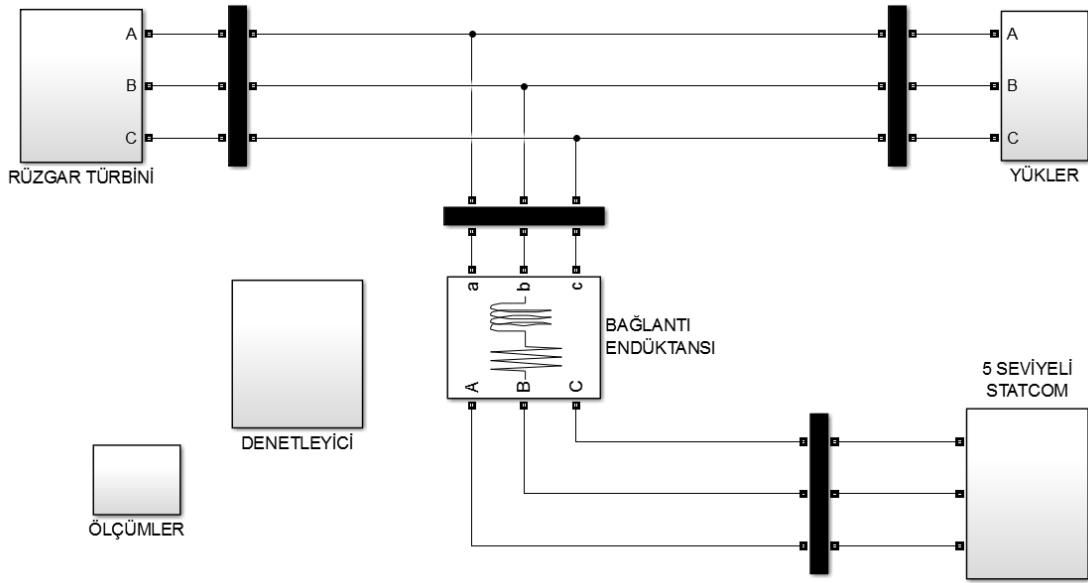


Şekil 41. MBMD-PI Denetleyici

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

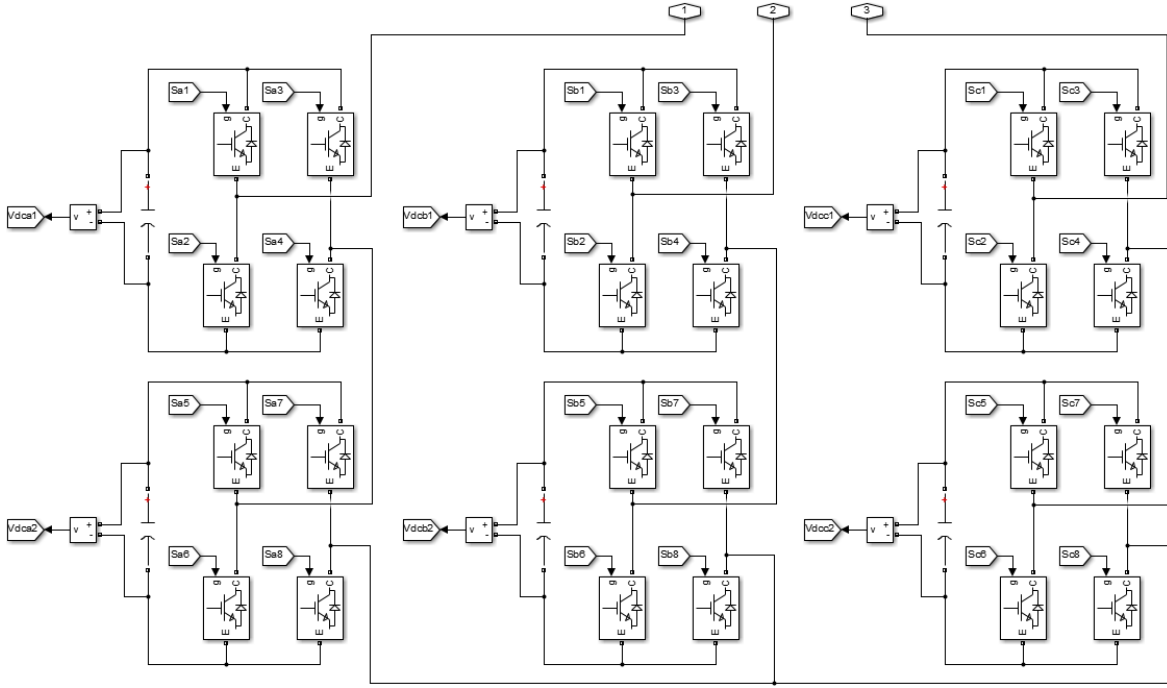
2.1. Benzetim Çalışmaları

STATCOM benzetimi için Matlab / Simulink yazılımı kullanılmıştır. Benzetimi yapılan sistemin Matlab / Simulink modeli Şekil 42’de görülmektedir.



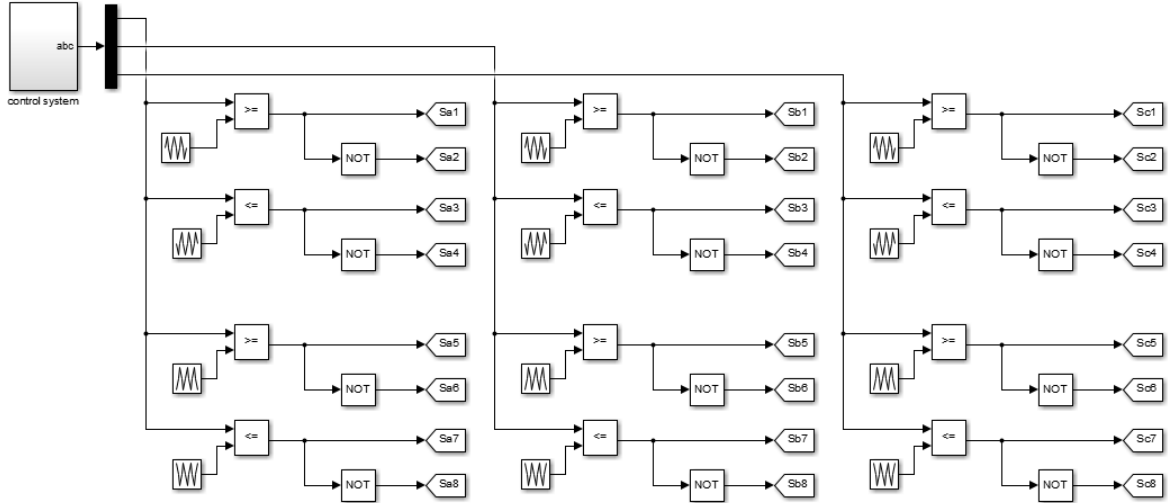
Şekil 42. Benzetimi yapılan sistemin Matlab / Simulink Modeli

Şekil 43’te benzetimi yapılan sistemde kullanılan 5 seviyeli STATCOM’un iç yapısı görülmektedir.



Şekil 43. 5 seviyeli STATCOM'un iç yapısı

Şekil 44'te STATCOM yapısında bulunan 24 adet IGBT elemanlarına gönderilen anahtarlama sinyallerinin üretildiği blok diyagram görülmektedir.



Şekil 44. 5 seviyeli STATCOM'un anahtarlama sinyalleri üretim bloğu

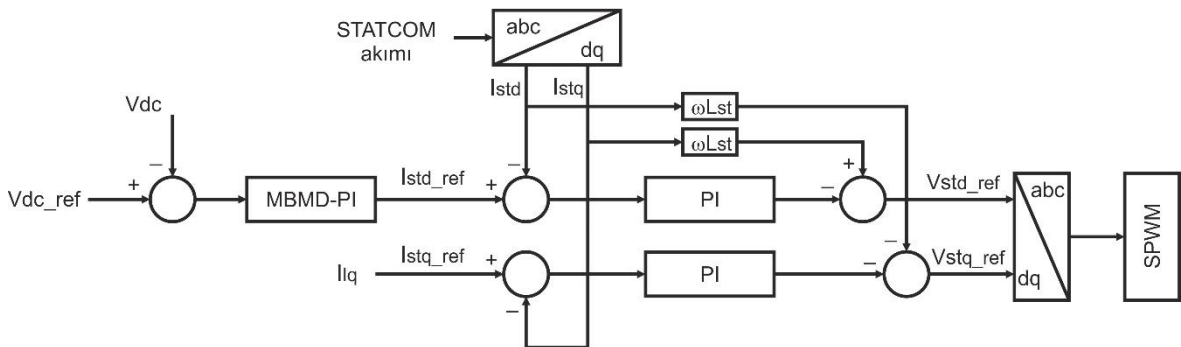
Benzetimi yapılan sistemin denetimi için örnekleme frekansı deneysel sistemle uyumlu olması için 6.5 kHz olarak seçilmiştir. STATCOM cihazının anahtarlama elemanları için ise 800 Hz anahtarlama frekansı uygulanmıştır. Gerçek zamanlı çalışma ile

karşılaştırabilmek için seçilen bu değerler Tablo 9’da verilmektedir. Seçilen bu değerler gerçek zamanlı deneysel sistem parametrelerine yakındır.

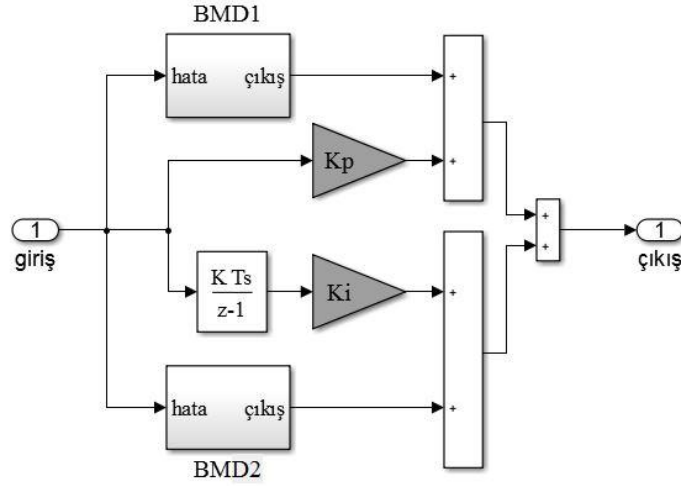
Tablo 9. Birinci benzetim çalışması için sistem parametreleri

Sembolü	Tanımı	Değeri
V	Sistem gerilimi	Üç faz 380 V, 50 Hz
V_{DA}	DA-hat gerilimi	200 V
C_{DA}	DA-hat kapasitesi	4700 μ F
f	Örnekleme frekansı	6.5 kHz
f_{sw}	Anahtarlama frekansı	800 Hz
R_f	Bağlantı direnci	56 m Ω
L_f	Bağlantı endüktansı	6 mH
	Yük 1	1 kW Omik Yük
	Yük 2	4 kW asenkron motor
	Yük 3	3 kW Omik Yük (0.3-1s)
	Yük 4	1 kW+5 kVar (0.4-1s)

Bu benzetim çalışmasında iki farklı denetim yöntemi kullanılmıştır ve kıyaslanmıştır. Bunların birincisinde hem STATCOM akımlarının denetimi için hem de kondansatörlerin gerilimlerinin denetimi için klasik PI denetleyici kullanılmıştır. İkincisinde ise STATCOM akımlarının denetimi için klasik PI denetleyici, kondansatörlerin gerilimlerinin denetimi için ise MBMD-PI denetleyici kullanılmıştır. Hata ve hatadaki değişim sinyallerini alan bulanık denetleyici çıkışındaki K_p ve K_i değişimleri PI katsayılarına eklenerek denetim sağlanmış olur. STATCOM’un dinamik ve statik performansını artırmak amacıyla PI denetleyiciye bulanık mantık eklenmiştir. MBMD-PI ile PI’lı denetim yönteminin blok diyagramı Şekil 45’te görülmektedir. Şekil 46’da MBMD-PI denetim bloğunun içyapısı görülmektedir.

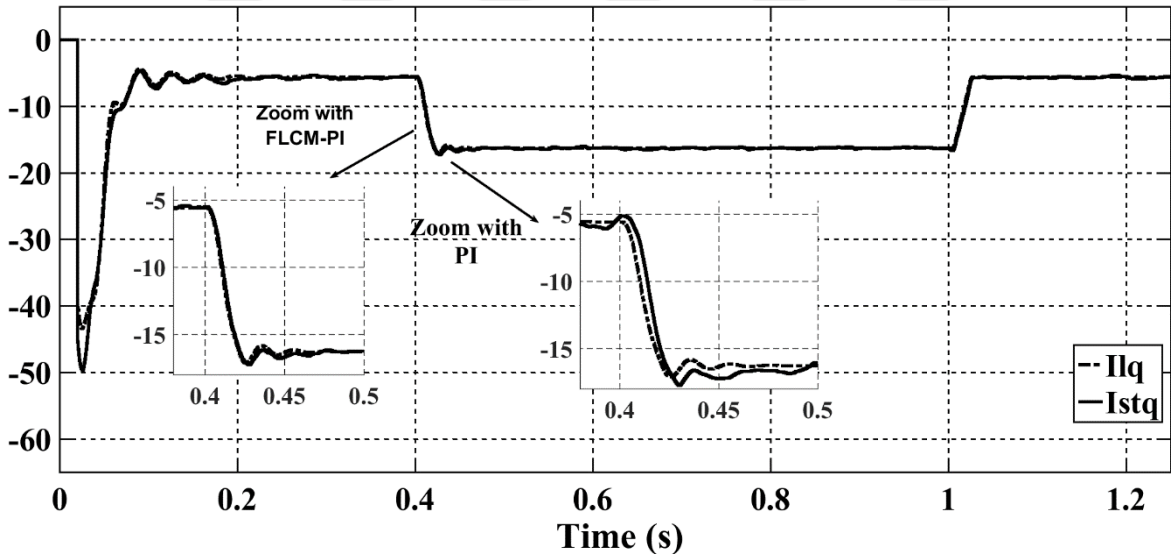


Şekil 45. MBMD-PI ile PI’lı dolaylı akım denetim yönteminin blok diyagramı



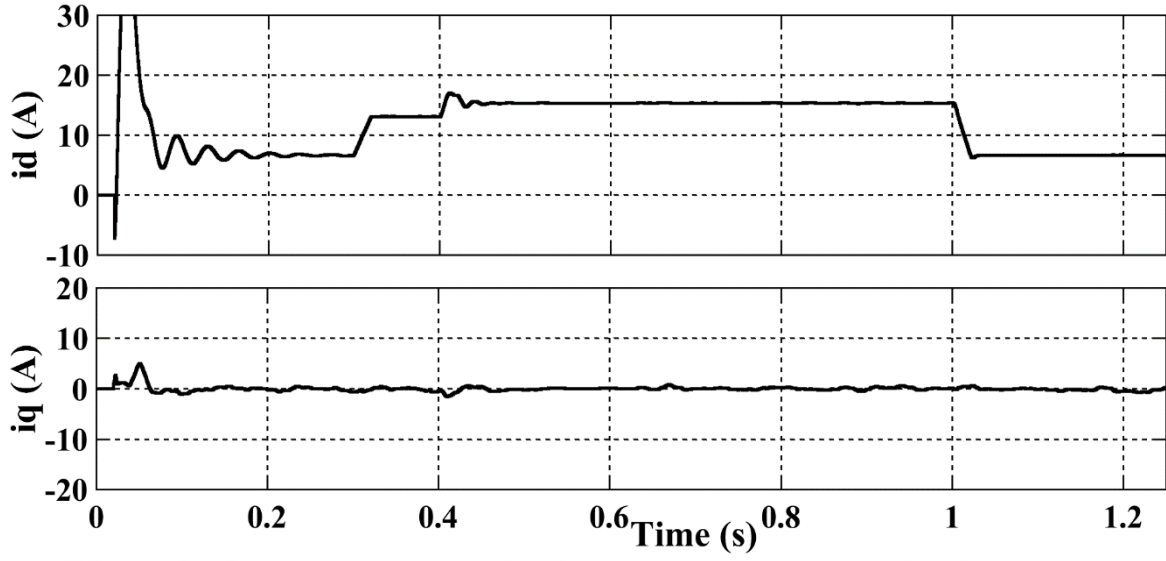
Şekil 46. MBMD-PI denetim bloğunun içyapısı

Şekil 47’te yük değişimi sırasında STATCOM cihazının verdiği cevap görülmektedir. Yük akımının reaktif bileşeninin (ilq) değişimine karşı STATCOM akımının reaktif bileşeninin (istq) değişimi görülmektedir.



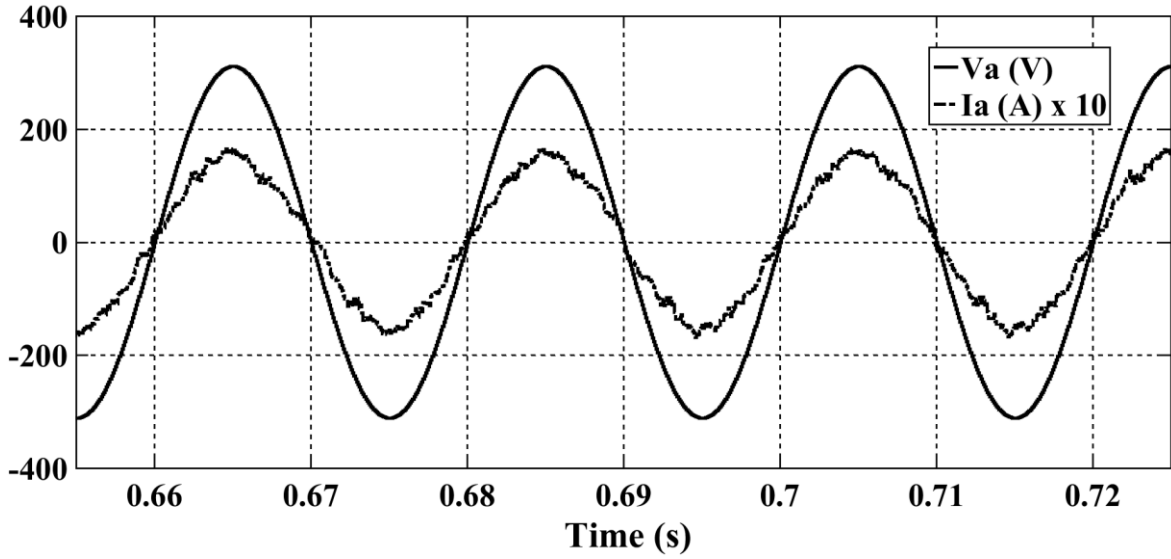
Şekil 47. Yük üzerindeki reaktif akım ile STATCOM reaktif akımı değişimleri

Şekil 48’de ortak bağlantı noktası akımının d ve q bileşenleri görülmektedir. Reaktif gücün olması gerektiği gibi 0VAr seviyesinde olduğu görülmektedir.



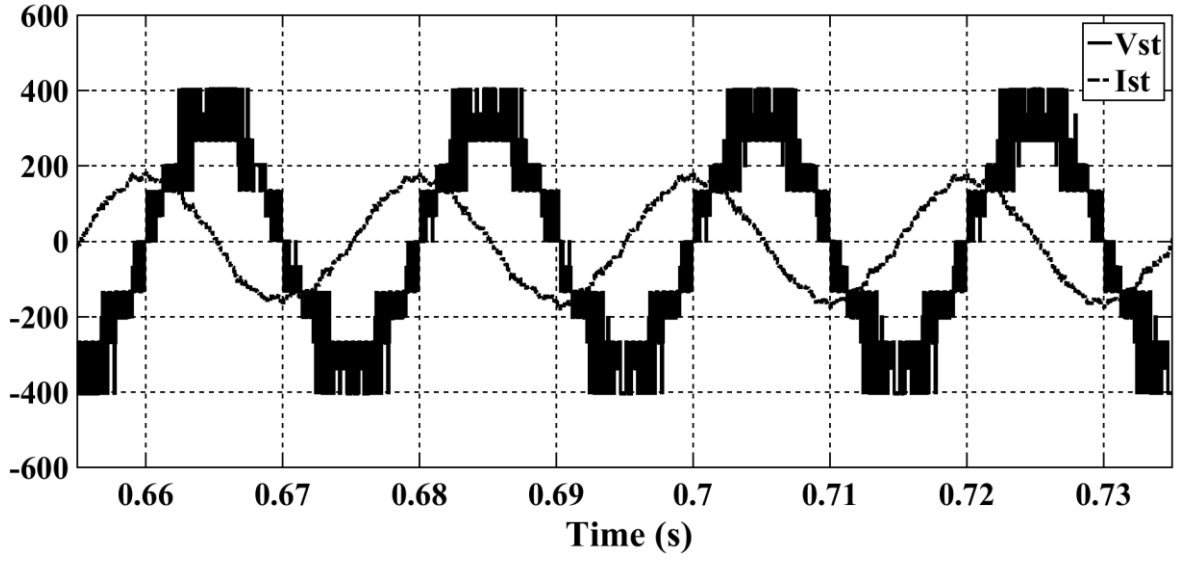
Şekil 48. Kaynak akımının d ve q bileşenleri

Şekil 49’da ortak bağlantı noktası gerilim ve akım (x10) değişimleri görülmektedir. Güç faktörü açısından incelenmesi gereken bu şekilde gerilim ve akım arasında faz farkının olmadığı görülmektedir.



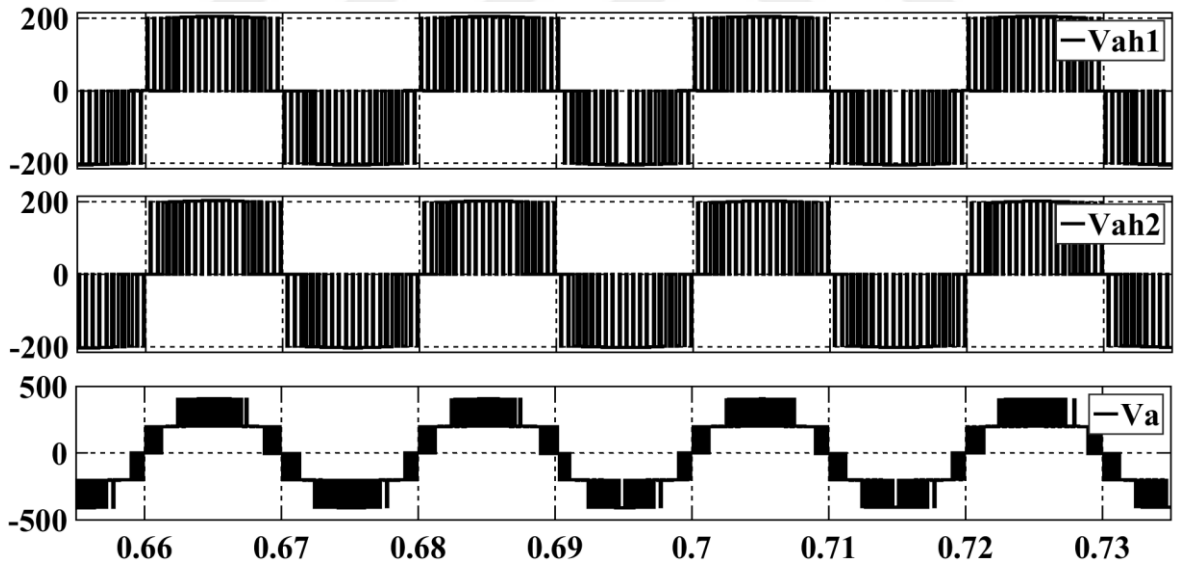
Şekil 49. Kaynak geriliminin ve akımının dalga şekilleri

Şekil 50’de STATCOM çıkışındaki gerilim ve akım değişimleri görülmektedir.



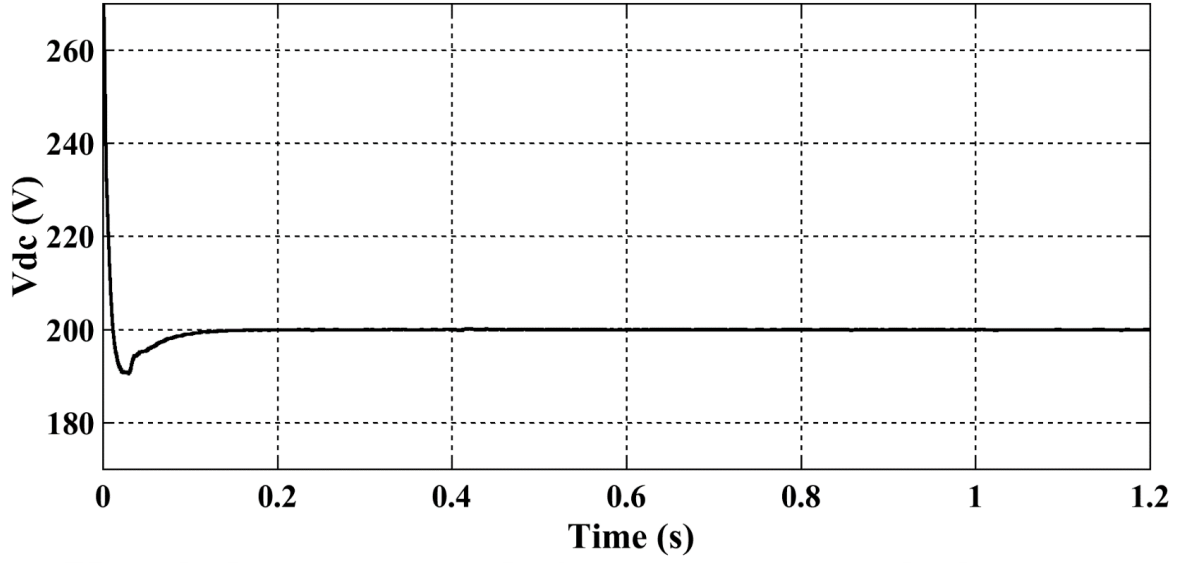
Şekil 50. STATCOM çıkış geriliminin ve akımının dalga şekilleri

Şekil 51’de 5 seviyeli kaskad evirici tabanlı STATCOM’un bir fazı için her bir H-köprü gerilimleri ve bir fazının toplam gerilim değişimleri görülmektedir.



Şekil 51. STATCOM’un bir fazının gerilim değişimi

Şekil 52’de STATCOM’un DA-hat gerilim değişimi görülmektedir.



Şekil 52. STATCOM'un DA-hat gerilim değişimi

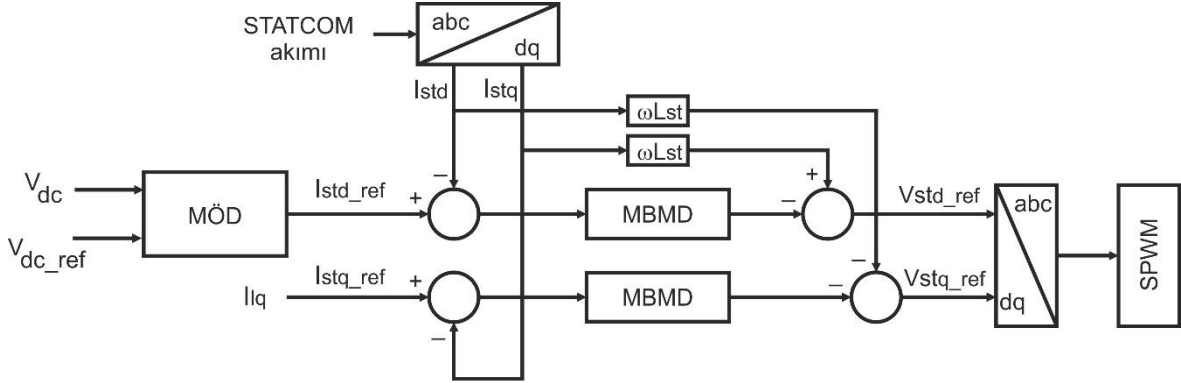
Yapılan ikinci benzetim çalışmasında seçilen değerler Tablo 10'da verilmektedir.

Tablo 10. İkinci benzetim çalışması için sistem parametreleri

Sembolü	Tanımı	Değeri
V	Sistem gerilimi	Üç faz 380 V, 50 Hz
V_{DA}	DA-hat gerilimi	200 V
C_{DA}	DA-hat kapasitesi	4700 μ F
f	Örnekleme frekansı	6.5 kHz
fsw	Anahtarlama frekansı	800 Hz
Rf	Bağlantı direnci	56 m Ω
Lf	Bağlantı endüktansı	6 mH
	Yük 1	1 kW Direnç Yüğü
	Yük 2	4 kW asenkron motor
	Yük 3	3 kW Direnç Yüğü (0.3-1s)
	Yük 4	1 kW+2 kVar (0.4-1s)
	Yük 5	1 kW+2 kVar (0.6-1s)

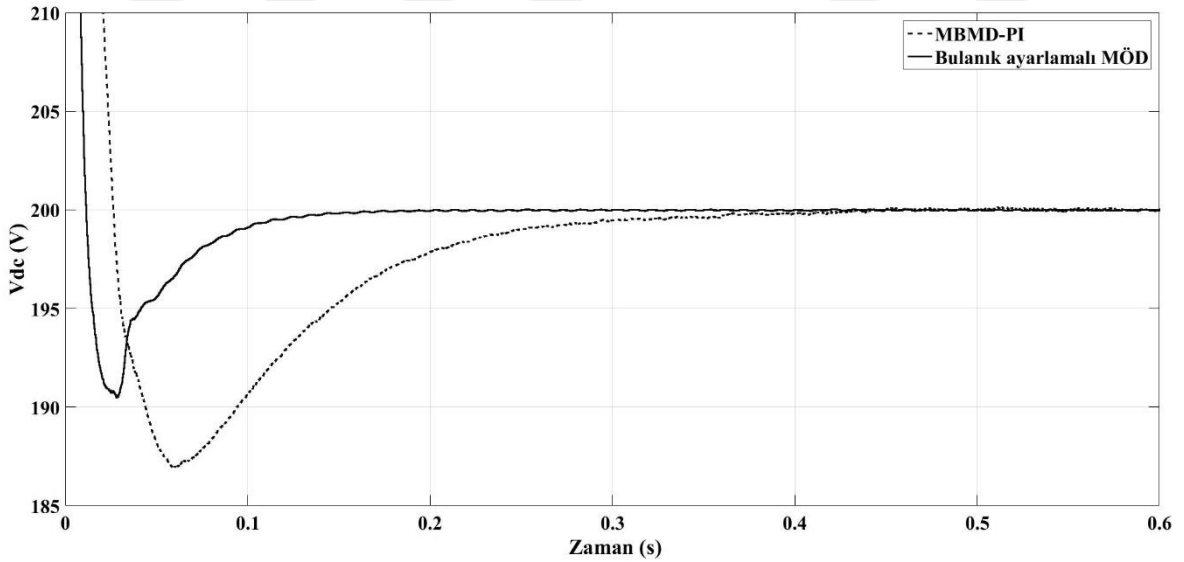
Bu benzetim çalışmasında iki farklı denetim yöntemi kullanılmıştır ve kıyaslanmıştır. Bunların birincisinde STATCOM akımlarının denetimi için klasik PI denetleyici ile kondansatörlerin gerilimlerinin kontrolü için ise MBMD-PI denetleyici kullanılmıştır. Benzetim çalışmasının ikinci aşamasında ise STATCOM akımlarının denetimi için MBMD ile kondansatörlerin gerilimlerinin kontrolü için ise Matlab/Simulink ortamında bulunan

hazır MÖD bloğu kullanılmıştır. Bu benzetim çalışması için kullanılan MÖD-MBMD'li denetim yönteminin yapısı Şekil 53'te görülmektedir.



Şekil 53. MÖD-MBMD'li dolaylı akım denetim yönteminin blok diyagramı

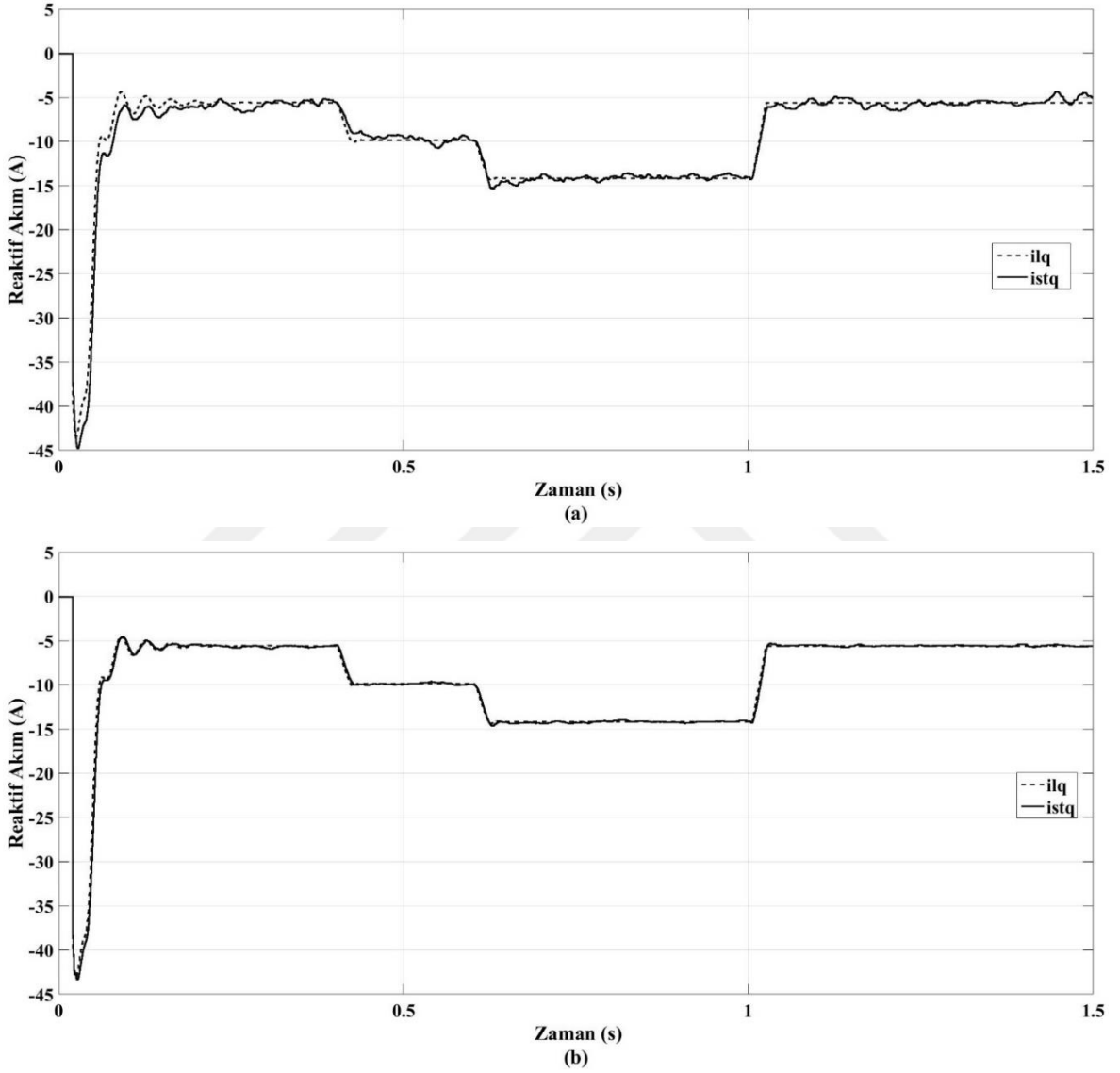
STATCOM'un toplam DA-hat gerilim değişimleri Şekil 54'te görülmektedir. Şekil 54'te MÖD-MBMD'li denetim yöntemini kullanan benzetim sonucunda görüldüğü gibi hem maksimum aşmada hem de oturma zamanında daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 54. STATCOM'un DA-hat gerilim değişimi

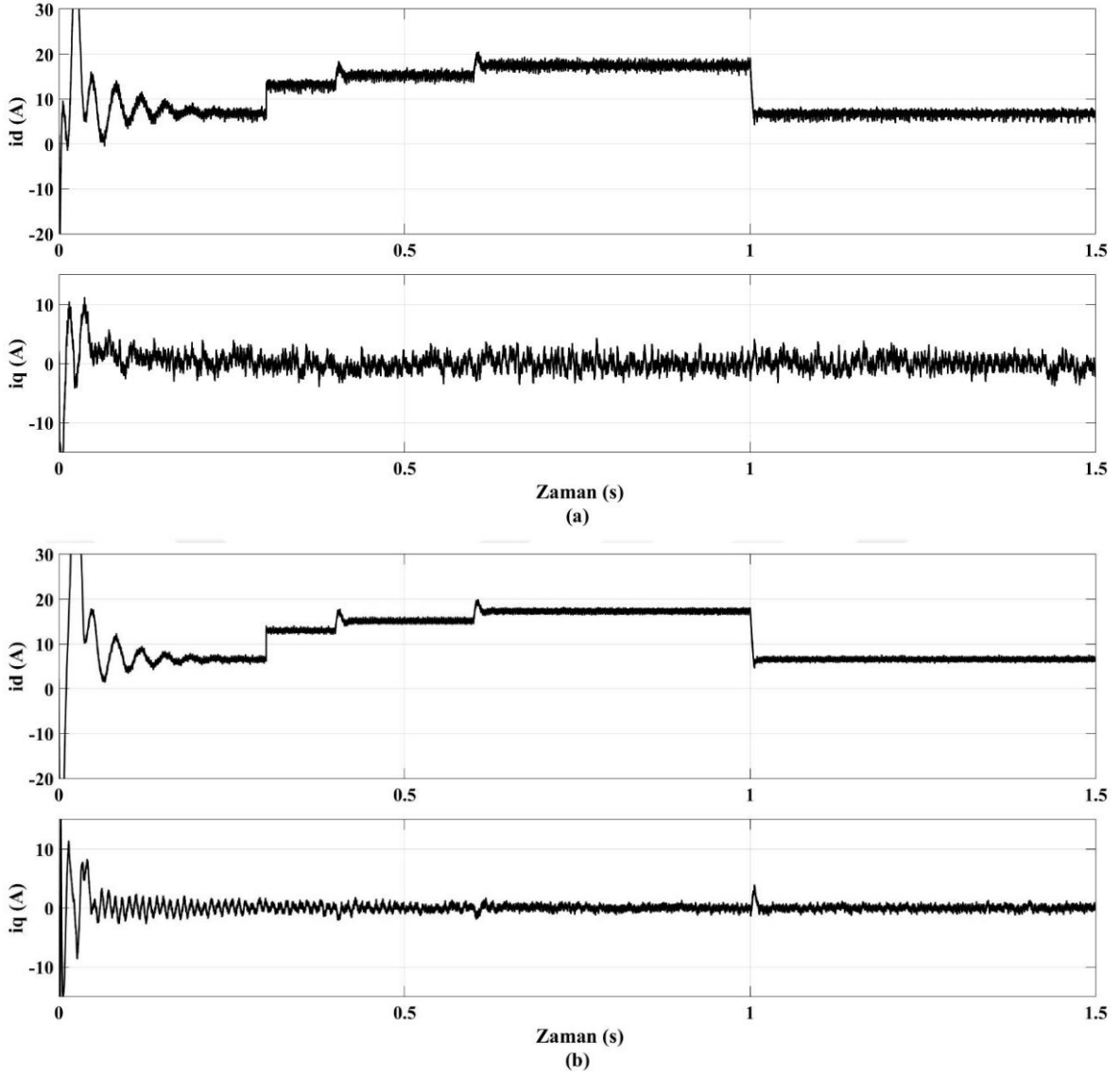
Şekil 55'te farklı yük koşullarındaki yükün ve STATCOM'un akımlarının reaktif bileşenlerinin değişimleri görülmektedir. Şekil 55 (a)'da MBMD-PI denetleyicili benzetim

çalışmasının sonucu görülmektedir. Şekil 55 (b)'de ise MÖD-MBMD'li denetleyici sonucu görülmektedir. Bu iki grafik kıyaslandığında MÖD-MBMD'li benzetim sonucunda STATCOM akımındaki dalgalanmaların daha az olduğu ve referans olan yük reaktif akımını daha başarılı izlediği görülmektedir.



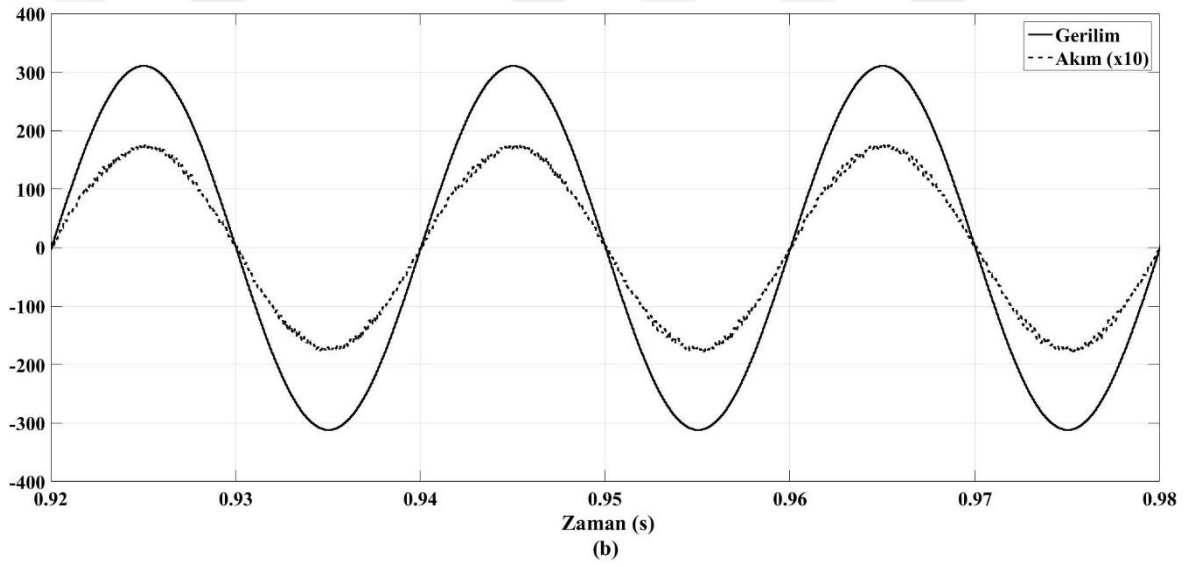
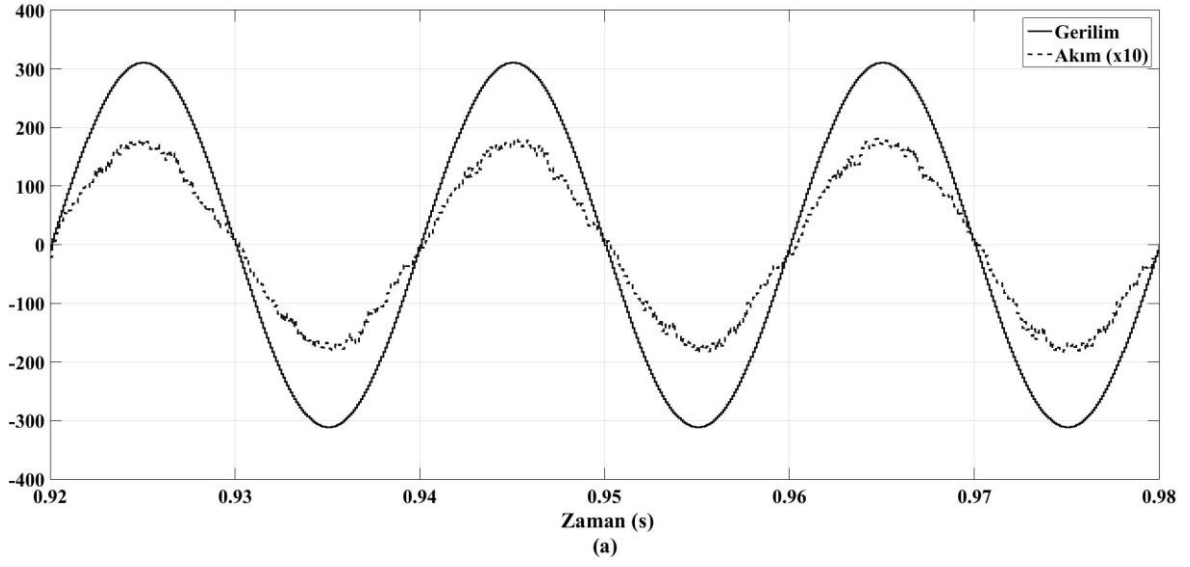
Şekil 55. Yük üzerindeki reaktif akım ile STATCOM reaktif akımı değişimleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD

Şekil 56 kaynak akımının d ve q bileşenlerini göstermektedir. Bu şekillerde görüldüğü gibi reaktif güç her iki benzetim için beklendiği gibi 0 Var seviyesindedir.



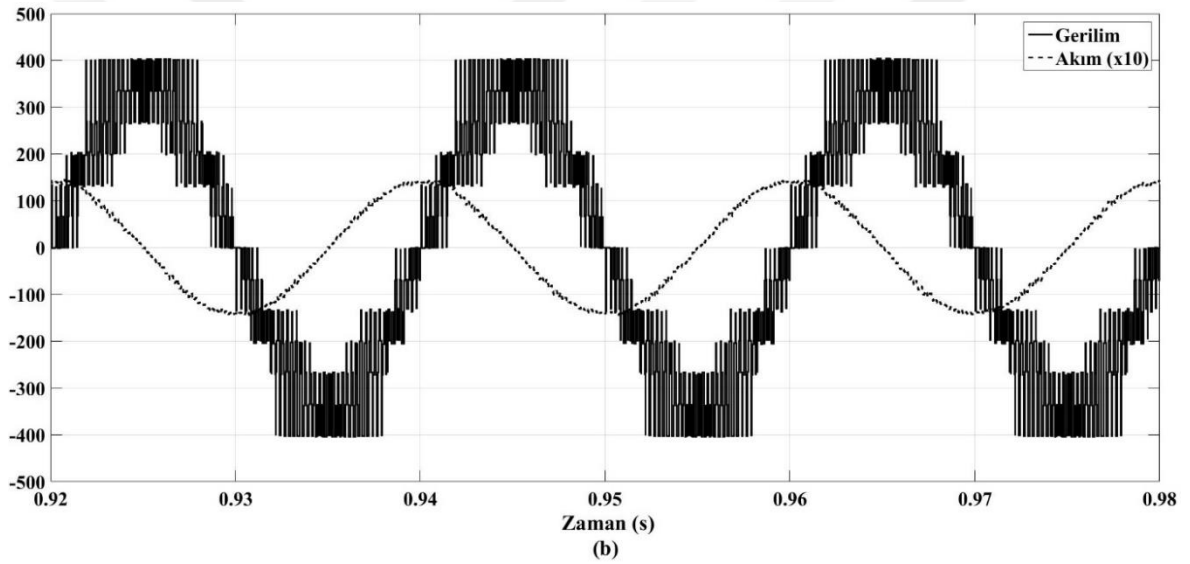
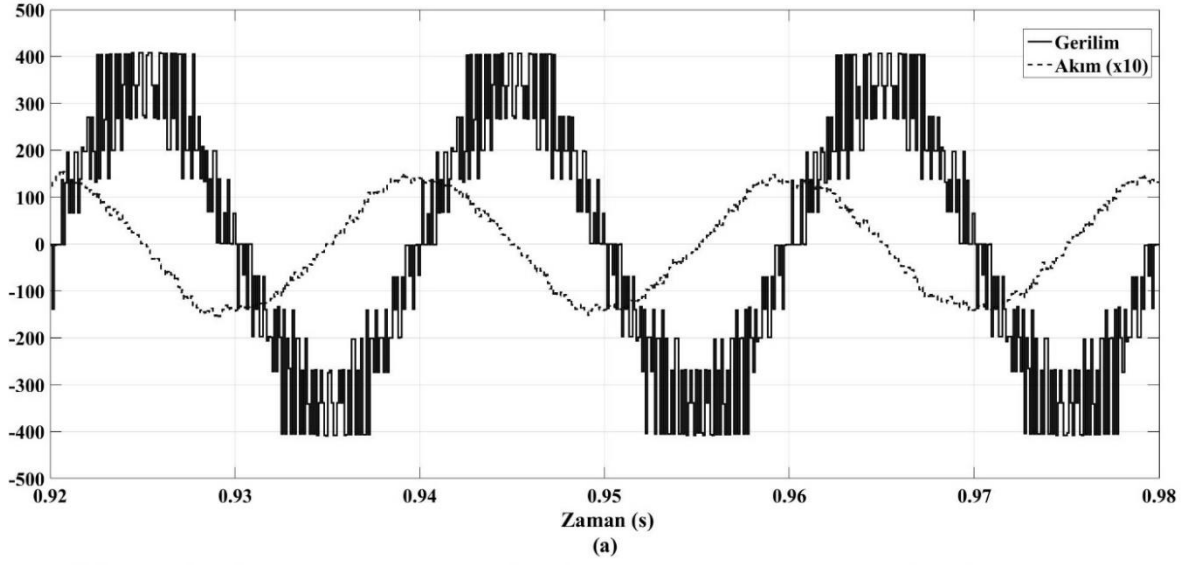
Şekil 56. Kaynak akımının d ve q bileşenleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD

Kaynak geriliminin ve akımının değişimleri Şekil 57'de görülmektedir. Güç faktörü açısından analiz edildiğinde kaynak gerilimi ile kaynak akımı arasında faz farkının olmadığı bu şekillerde net olarak görülmektedir.



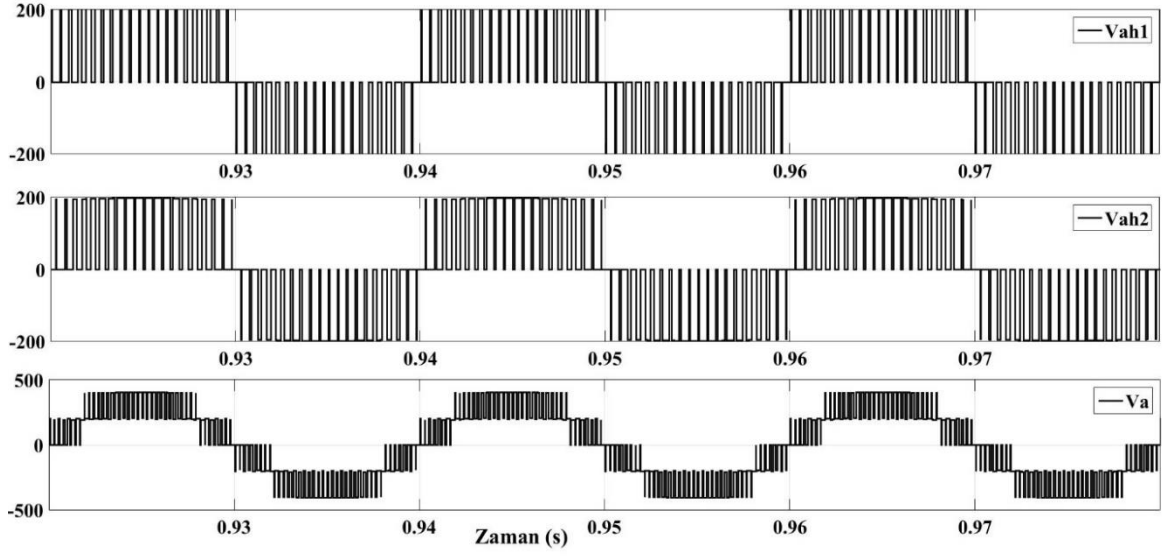
Şekil 57. Kaynak akımının ve geriliminin dalga şekilleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD

STATCOM çıkış akımının ve geriliminin dalga şekilleri Şekil 58’de görülmektedir.



Şekil 58. STATCOM çıkış akımının ve geriliminin dalga şekilleri (a) MBMD-PI, (b) MÖD-MBMD

Beş seviyeli kaskad H-köprü eviricili STATCOM'un bir fazı için H-köprü gerilim değişimleri Şekil 59'da görülmektedir. Vah1 ile Vah2 gerilimleri, STATCOM'un evirici kısmındaki a fazında bulunan iki adet H-köprü gerilimlerini temsil etmektedir. Va ise STATCOM'un bir fazında bulunan iki adet H-köprü gerilimlerinin toplamını göstermektedir.



Şekil 59. STATCOM'un bir fazının gerilim değişimleri

2.2. Deneysel Çalışmalar

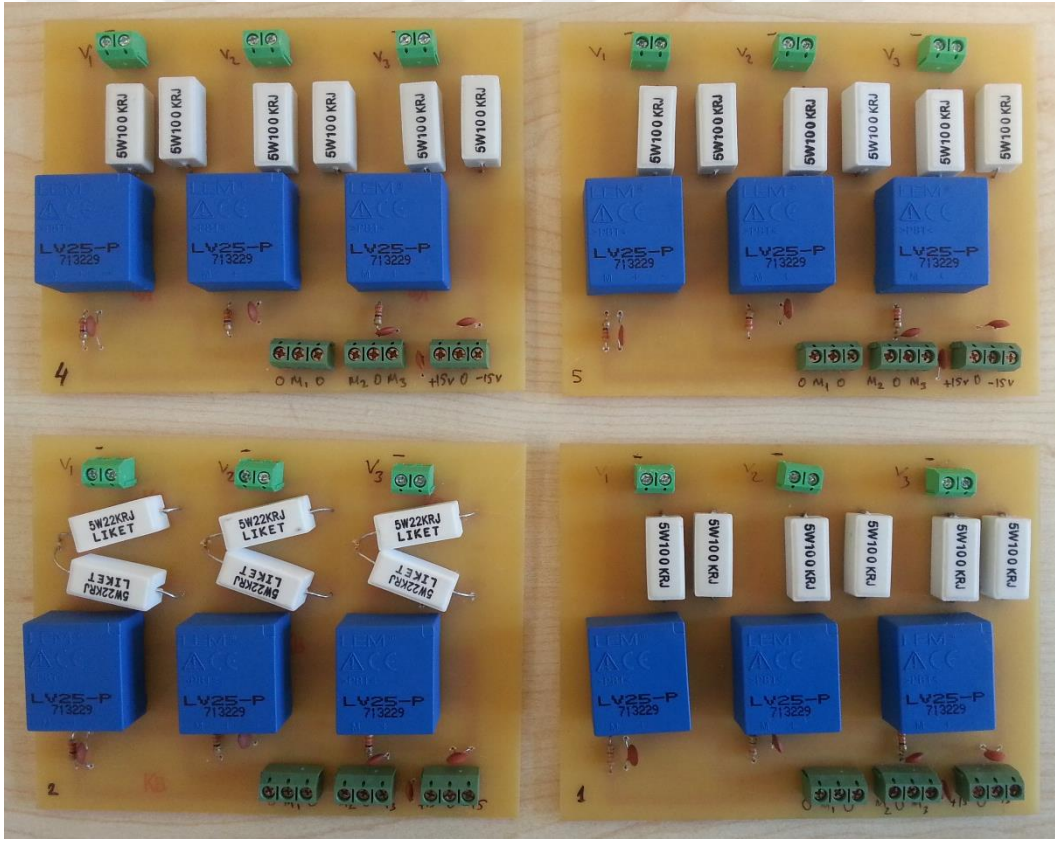
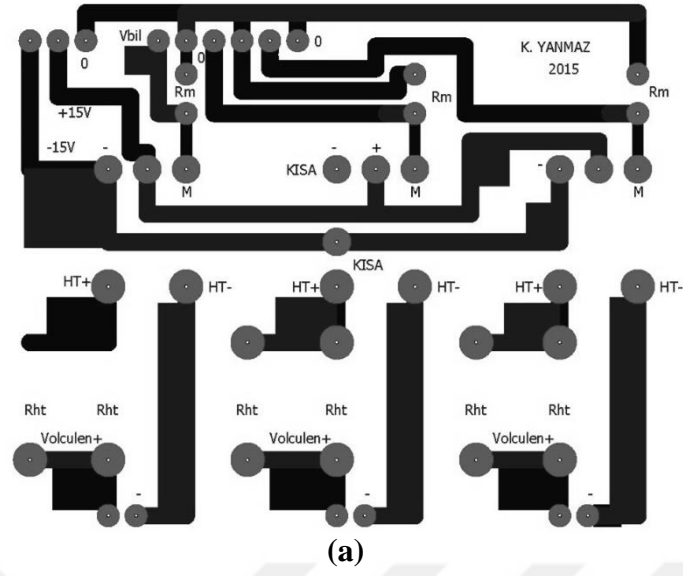
Yapılan deneysel çalışmalarla ilgili görseller aşağıda görülmektedir. Şekil 60'da rüzgar türbininin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş emülatörü görülmektedir. 22kW gücünde bir asenkron makine türbin görevini yerine getirmektedir ve bu motorun mili diğer 15kW gücüne sahip asenkron makinenin miline akuple edilmiştir. Böylece 15kW gücündeki asenkron makine generatör olarak kullanılmaktadır.



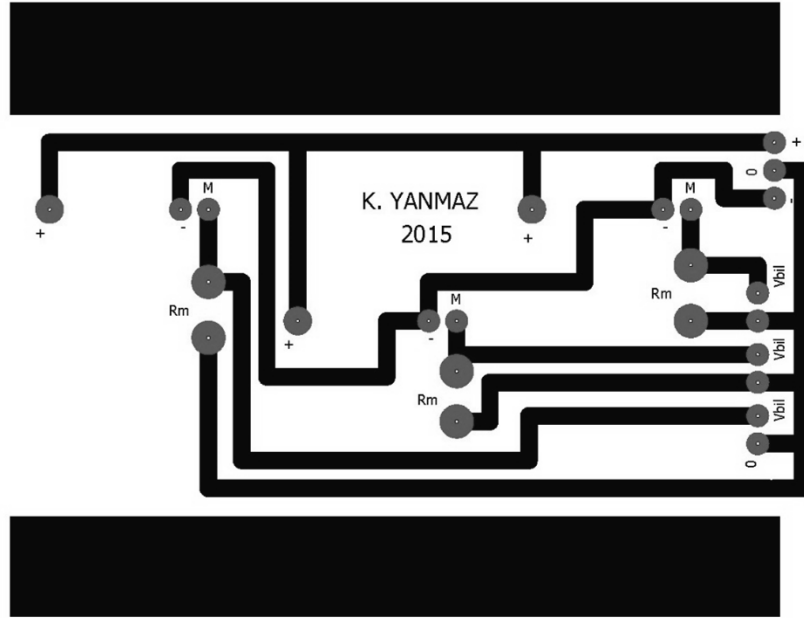
Şekil 60. Rüzgar türbini emülatörü

STATCOM yapısında kullanılan gerilim kontrollü çok seviyeli evirici için IGBT modüller Intelligent Power Modul (IPM) yapısında olup 75A 1200V değerlerine sahip her biri içerisinde 6 adet IGBT bulunan modüllerdir.

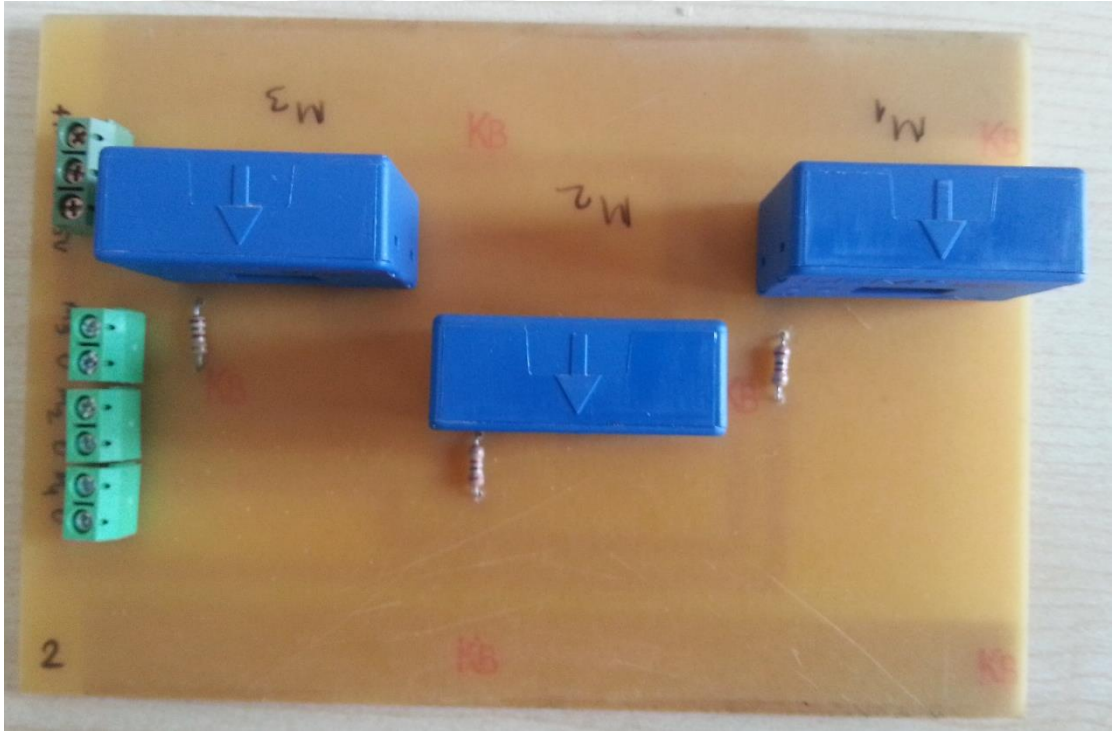
Şekil 61 ve Şekil 62’de akım gerilim ölçümleri için tasarlanan kartlar görülmektedir. Bu ölçüm kartlarında gerilim ölçümü için Lem firmasının LV25-P isimli gerilim algılayıcı elemanı, akım ölçümü için ise yine aynı firmanın LA55-P isimli akım algılayıcı elemanı kullanılmıştır.



Şekil 61. (a) Gerilim sensör devresinin baskı devre hali (b) Gerilim sensör devresi



(a)

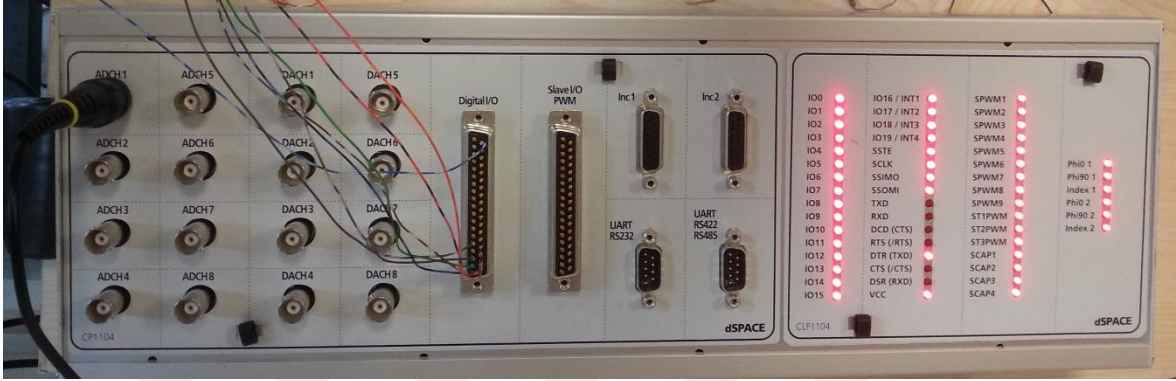


(b)

Şekil 62. (a) Akım sensör devresinin baskı devre hali (b) Akım sensör devresi

IGBT modülünün kontrol kartı ile birlikte bilgisayar destekli çalıştırılması ve için örnek uygulama yapılmıştır.

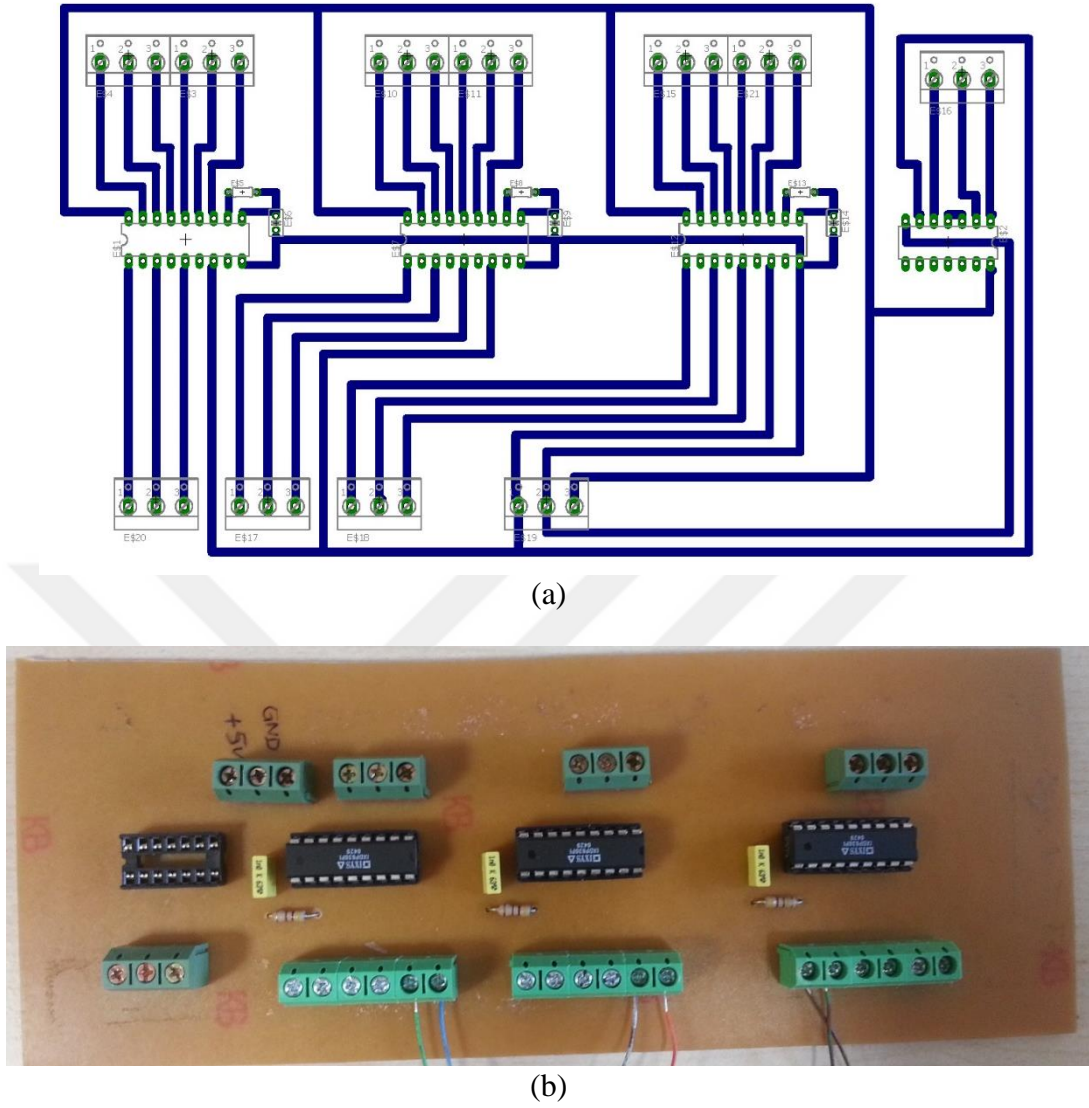
Şekil 63'te deneysel sistem ile bilgisayar arasında veri alışverişi yapmak için kullanılacak olan kontrol kartı (dSPACE DS1104 R&D Controller Board) görülmektedir. STATCOM kontrol sinyallerini bilgisayar ortamından deneysel sisteme göndermek için ve sistemde ölçülen büyüklükleri bilgisayara aktarmak için kullanılır.



Şekil 63. dSPACE DS1104 kontrol kartı bağlantı paneli

Bilgisayar aracılığı ile Matlab/Simulink ortamında hazırlanan model ile PWM anahtarlama sinyalleri kontrol kartı vasıtasıyla IPM'lere gönderilmektedir. IPM içerisindeki 6 adet IGBT elemanlarına gönderilen sinyallere ölü zaman eklenmesi gerektiğinden araya oluşturulan bir ölü zaman devresi yerleştirilmiştir. Böylece IGBT elemanlarının aynı anda iletimde kalması engellenmiş ve olası arızalardan korunmuştur.

IGBT elemanlarının anahtarlama sırasında eklenmesi gereken ölü zaman Şekil 64'teki devre ile sağlanmaktadır.

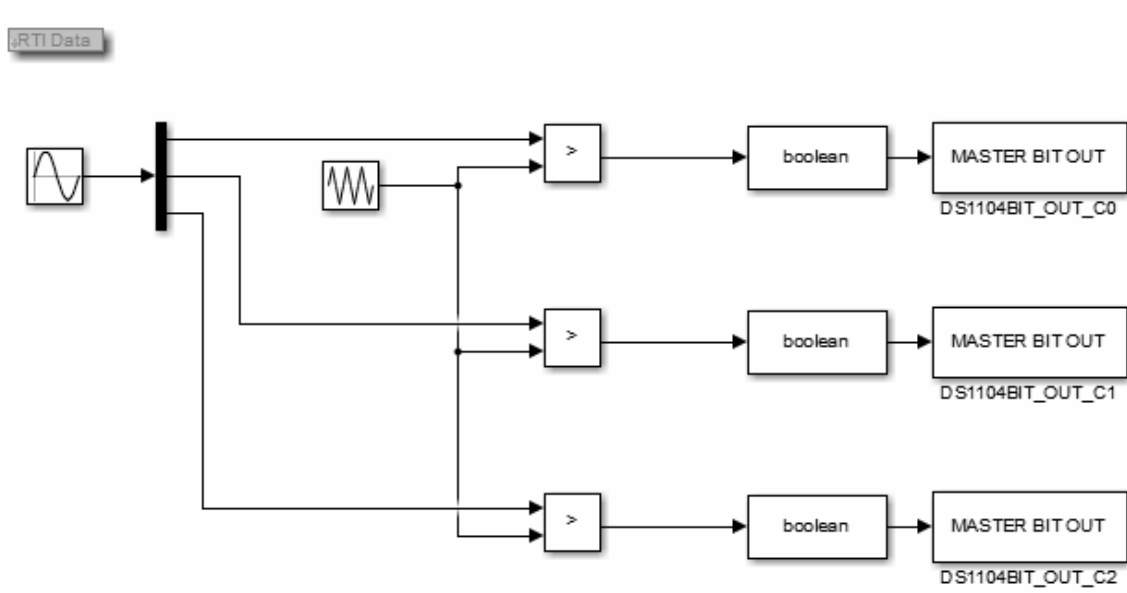


Şekil 64. (a) Ölü zaman devresinin baskı devre hali (b) Ölü zaman devresi

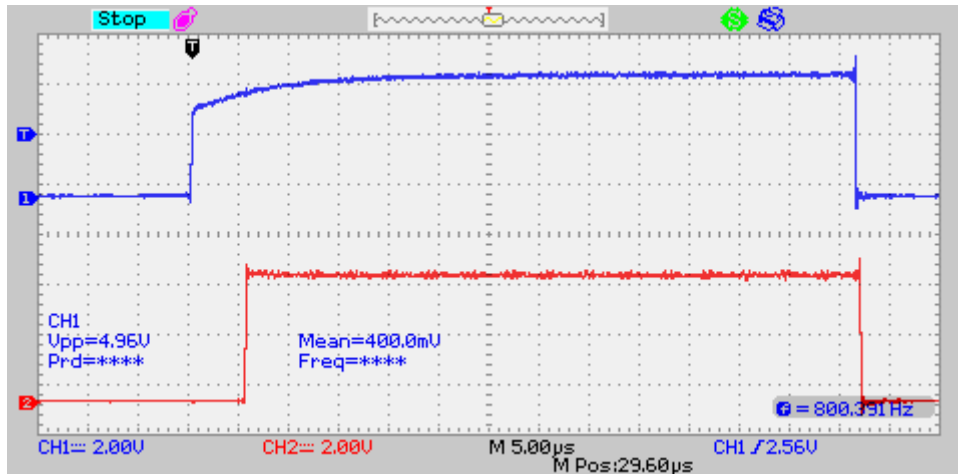
Ölü zaman gecikme devresi IXDP630PI isimli sayısal ölü zaman entegresi ile yapılmıştır. Bu gecikmenin süresini ayarlamak için entegrenin katalog bilgilerinden yararlanılmıştır. Ölü zaman devresi ile yapılan gecikme IPM içerisinde bulunan aynı kol üzerindeki iki IGBT için biri diğerinin tersi olan anahtarlama sinyalleri Şekil 66’da ve Şekil 67’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yaklaşık 5 μ s’lik bir gecikme sağlanmıştır. Bu gecikme için entegreye bağlanan R_{osc} ile C_{osc} elemanlarının değerleri $R=560\Omega$ $C=1nF$ olarak seçilerek istenilen gecikme (8 clock’luk ölü zaman süresi) sağlanmış olur ve bu PWM işaretlerinin terslenmiş durumlarını da alarak çıkışa aktarmaktadır. Bu hesaplama Denklem (69) ile yapılmıştır. Böylece aynı kol üzerinde bulunan IGBT elemanlarının aynı anda iletimde olmaları önlenerek hatalara karşı korumaları sağlanmış olur.

$$f_{osc} = \frac{0.98}{C_{osc}(R_{osc}+30)+3*10^{-8}} \quad (69)$$

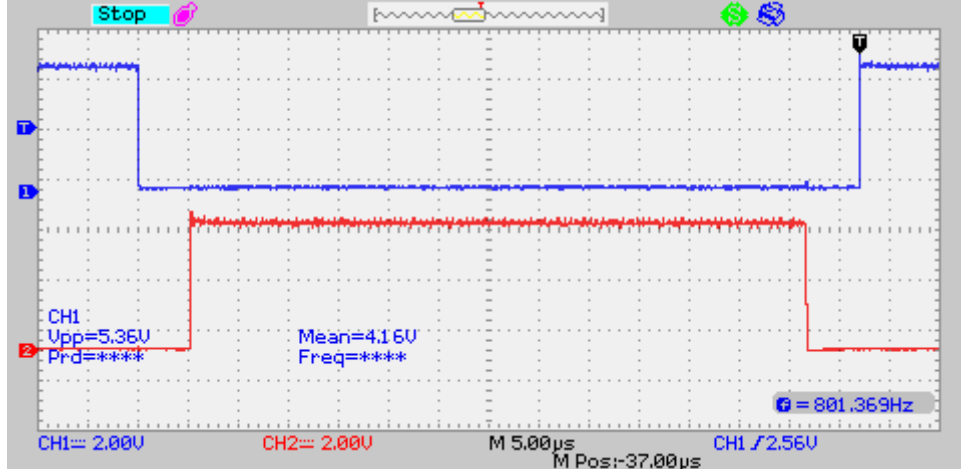
Şekil 65'te DS1104 kontrol kartı aracılığıyla bilgisayardan ölü zaman devresine gönderilen anahtarlama sinyallerinin Matlab/Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 65. Anahtarlama sinyallerinin Simulink modeli

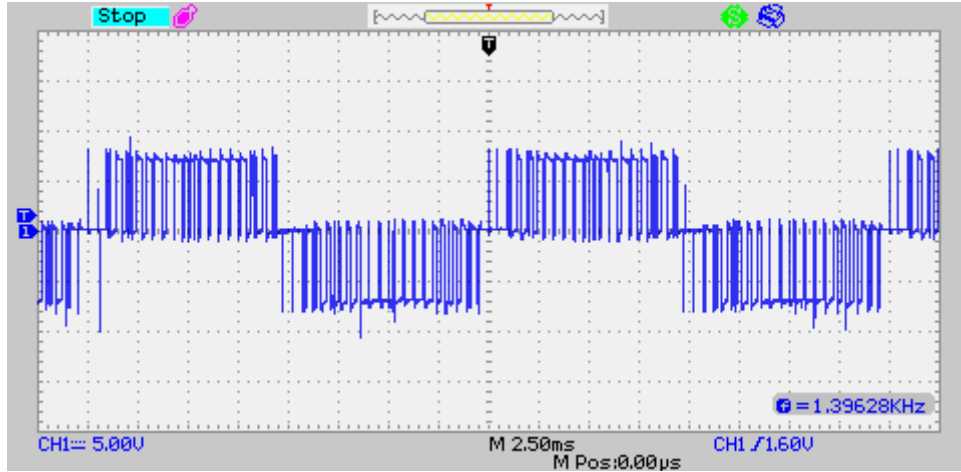


Şekil 66. Anahtarlama sinyallerindeki ölü zaman gecikmesi (tek sinyal)



Şekil 67. Anahtarlama sinyallerindeki ölü zaman gecikmesi (terslenmiş iki sinyal)

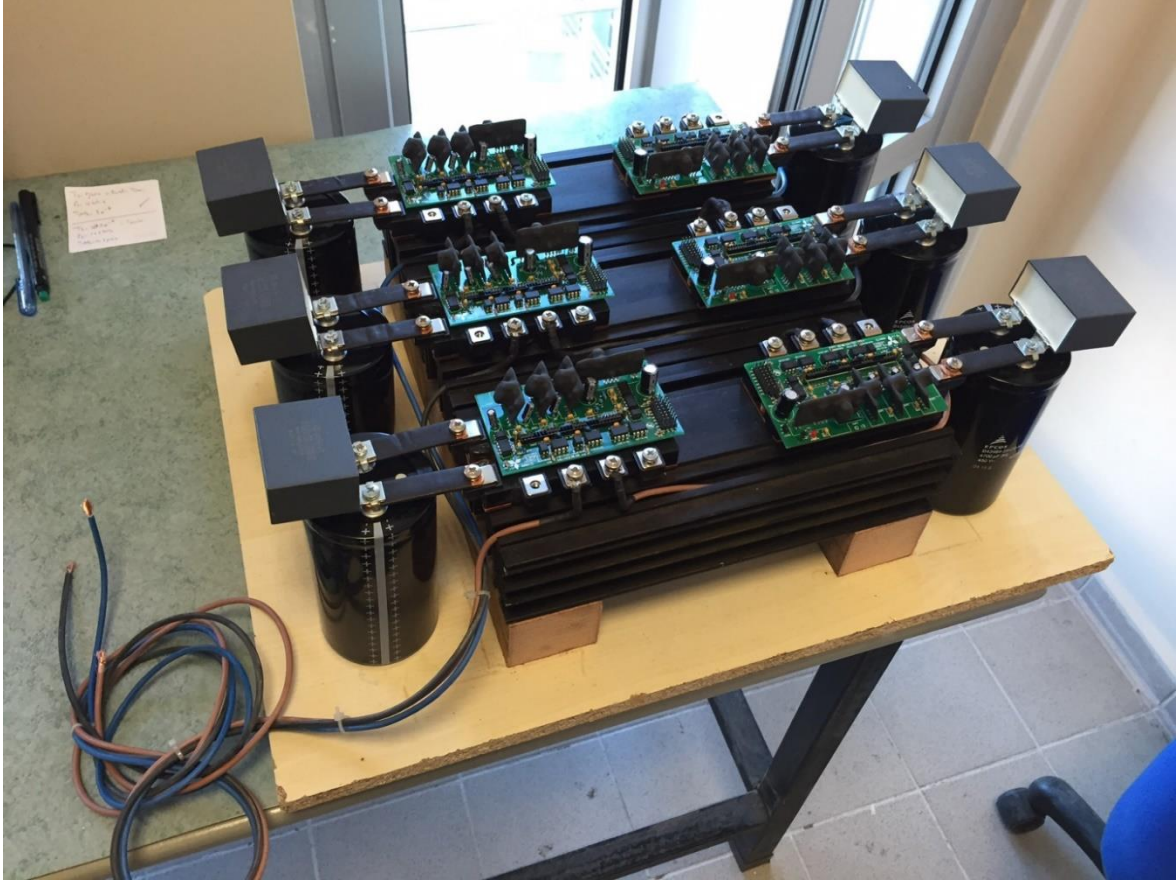
İlk olarak STATCOM iki seviyeli olarak (tek IPM (6 adet IGBT) kullanarak) çalıştırılıp denenmiştir. STATCOM'un IPM elemanının da tarafına bir da kaynağı bağlanmıştır. IPM'nin 3 faz çıkışı ise 3kW'lık bir asenkron motorun uçlarına bağlanmıştır ve motor çalıştırılmıştır. Giriş olarak da kaynağından 72V uygulandığında 3 faz çıkış geriliminin iki fazı arası (faz-faz) gerilim değişimi Şekil 68'de gösterilmiştir (osiloskop probu x10 kademesinde).



Şekil 68. Fazlar arası çıkış gerilimi değişimi

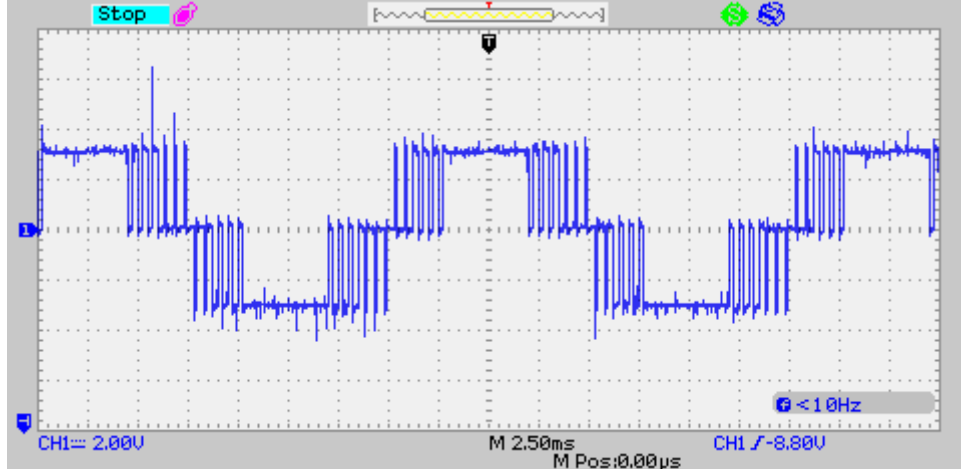
Şekil 69'da STATCOM yapısında kullanılacak olan gerilim kaynaklı evirici görülmektedir. Gerilim kaynaklı evirici için ihtiyaç olan DA gerilim, elektrolitik kondansatörler tarafından sağlanmaktadır. Bu kondansatörler uygun olmayan bir anda şebekede anahtarlama anındaki titreşimleri önlemeye yardımcı olur. Bu görevi yerine

getirmek için kullanılan elektrolitik kondansatörler Şekil 69’da bağlanmış olarak görülmektedir. Bu kondansatörlerin pozitif ve negatif uçlarına paralel olarak bağlanmış olan film kondansatörler ise gerilim kaynaklı eviricilerin uygulamalarında meydana gelebilen gerilim değişimlerindeki etkileri azaltmak için kullanılmaktadır.



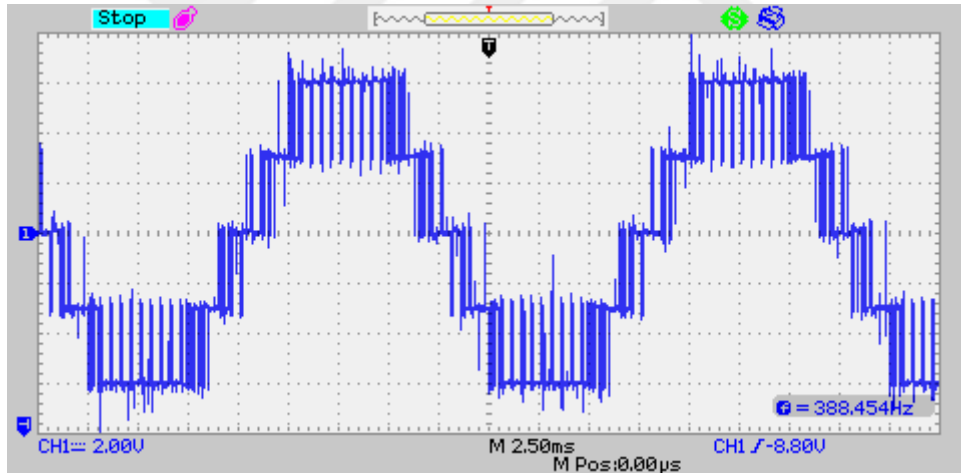
Şekil 69. STATCOM gerilim kaynaklı evirici yapısı

Beş seviyeli STATCOM yine her bir IPM’nin DA tarafına DA gerilim kaynakları bağlanarak denenmiştir. Şekil 70, STATCOM yapısında kullanılan gerilim kaynaklı eviricinin bir fazında bulunan iki H-köprünün bir tanesinin gerilim değişimini göstermektedir. ($V_{DA}=30V$)



Şekil 70. STATCOM çıkışının bir fazının bir H-köprü gerilim değişimi

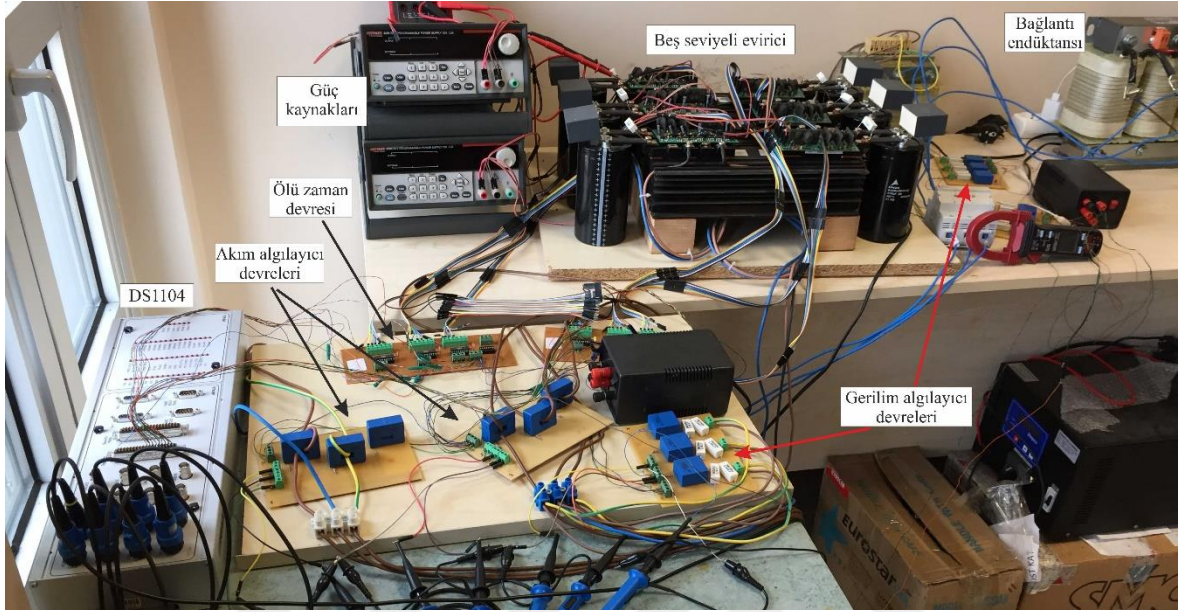
Şekil 71, STATCOM yapısında kullanılan gerilim kaynaklı eviricinin bir fazının gerilim değişimini göstermektedir. ($V_{DA}=30V$)



Şekil 71. STATCOM'un çıkışının gerilim değişimi (faz-nötr)

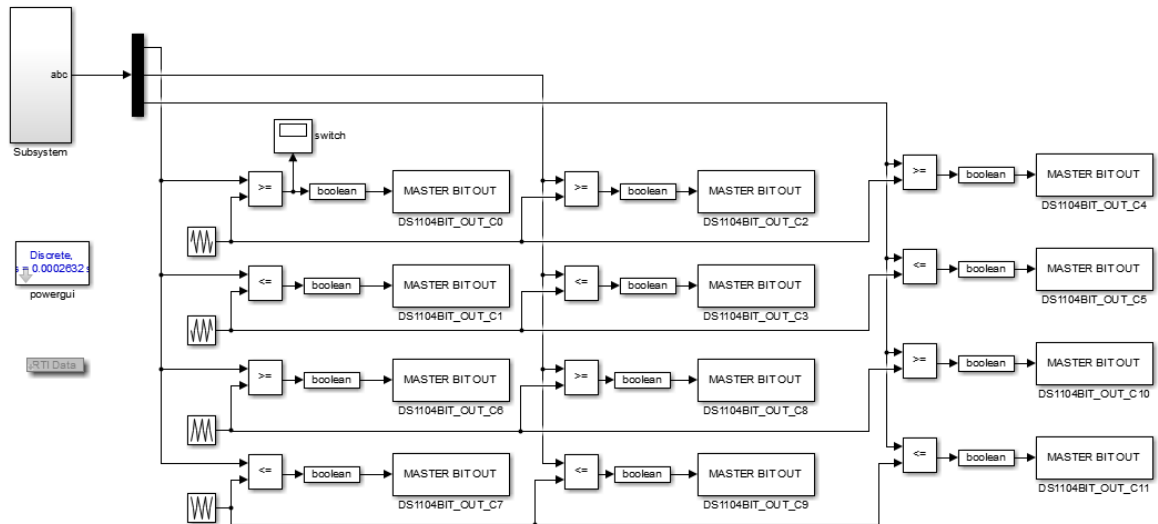
Sistemin genel görünümü Şekil 72'de görülmektedir. Şekil 72'deki deneysel sistem çalıştırılmış ve ilk etap için bazı sonuçlar alınmıştır. Sistemin ilk çalıştırılması aşamasında kaynak olarak üç faz şebeke kullanılmıştır. Şebekeden alınan üç faz gerilim bilgisi tasarlanmış olan gerilim sensör kartı ile ölçülerek anlık olarak bilgisayar ortamına DS1104 kartının ADC kanalları aracılığı ile aktarılmaktadır. Bu gerilim bilgisi ile kontrol devresindeki faz kilitlemeli çevrim (PLL) bloğu, şebeke ile STATCOM çıkış gerilimini senkronize etmektedir. STATCOM'un çıkış akımı tasarlanan akım sensör kartı ile ölçülerek DS1104 kartının ADC kanalları aracılığı ile anlık olarak kontrol devresine aktarılmaktadır.

STATCOM bünyesinde bulunan beş seviyeli gerilim kontrollü H-köprü eviricinin her bir H-köprüsüne bağlı olan altı adet kondansatörün her birinin gerilimleri yine aynı şekilde gerilim ölçüm sensör kartı ile kontrol devresine aktarılmaktadır.



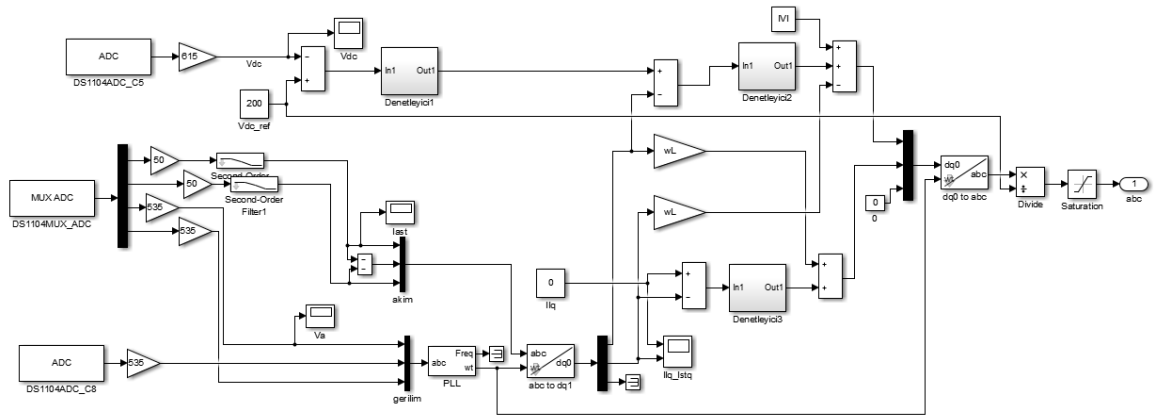
Şekil 72. STATCOM'lu sistemin genel görünümü

Şekil 73'te deneysel çalışma için hazırlanan Matlab/Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 73. Deneysel çalışma için hazırlanan sistemin Simulink modeli

Şekil 74'te Matlab/Simulink ortamında hazırlanan STATCOM kontrol devresi görülmektedir. dSPACE DS1104 kontrol kartının ADC blokları tarafından anlık olarak alınan veriler kontrol sistemine gönderilmektedir. Burada kondansatör gerilimlerinin ortalaması alınarak referans gerilim ile kıyaslanır ve DA gerilim denetleyicisine gönderilir. STATCOM akım bilgisi abc-dq dönüşüm bloğu yardımıyla d ve q bileşenlerine ayrılır. DA gerilim denetleyicisi çıkışında elde edilen sinyal STATCOM akımının d bileşeni ile kıyaslanarak d bileşen akımı denetim bloğuna gönderilir. Akımın q bileşeni referans bileşenle kıyaslanarak q bileşen akımı denetim bloğuna gönderilir. Daha sonra elde edilen d ve q bileşen sinyalleri dq-abc dönüşüm bloğu ile dönüştürülür. Elde edilen çıkış sinyali IGBT elemanlarının anahtarlanmaları için Şekil 73'deki PWM bloğuna gönderilir. Üretilen bu PWM anahtarlama sinyalleri DS1104 kartının dijital çıkış portları yardımıyla deneysel sistemdeki IGBT elemanlarının kapı sürme devrelerine gönderilir.

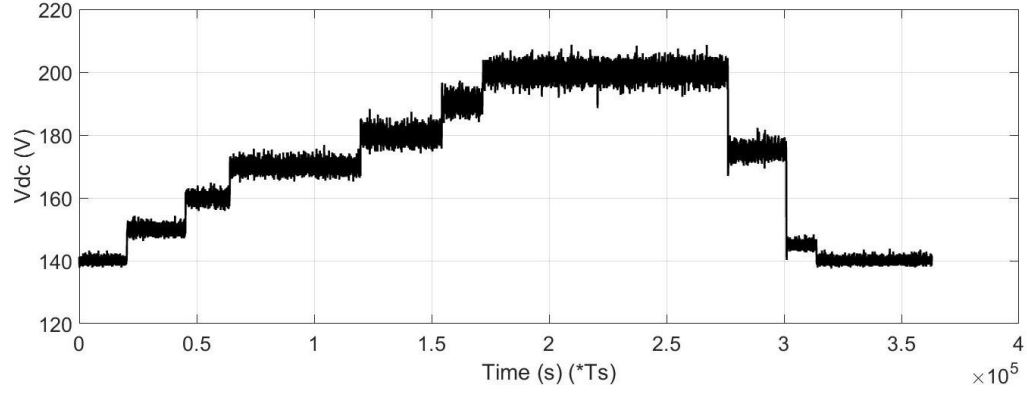


Şekil 74. STATCOM kontrol sistemi

Bu tez çalışmasında tasarlanan beş seviyeli H-köprü eviricili STATCOM cihazı 24 adet IGBT elemanlarından oluşmaktadır. Bu 24 adet IGBT için ayrı ayrı 24 adet anahtarlama sinyali gönderilmesi gerekmektedir. Kullanılan dSPACE DS1104 kartında bulunan 20 adet dijital giriş / çıkış kanallarının 12 tanesi IGBT elemanlarının anahtarlanması için kullanılmış ve 8 adet ADC kanallarının tamamı da akım gerilim ölçüm kartlarından gelen bilgileri bilgisayara aktarmak için kullanılmıştır. Bu durum DS1104 kartının bant genişliğinin ve bu nedenle anahtarlama sinyallerinin frekansının azalmasına neden olmuştur. Yani deneysel sistem için kullanılan örnekleme frekansı ile anahtarlama frekansı çok azaltılmak zorunda kalmıştır. Bu da denetleyicilerin çalışma hızına etki etmiştir.

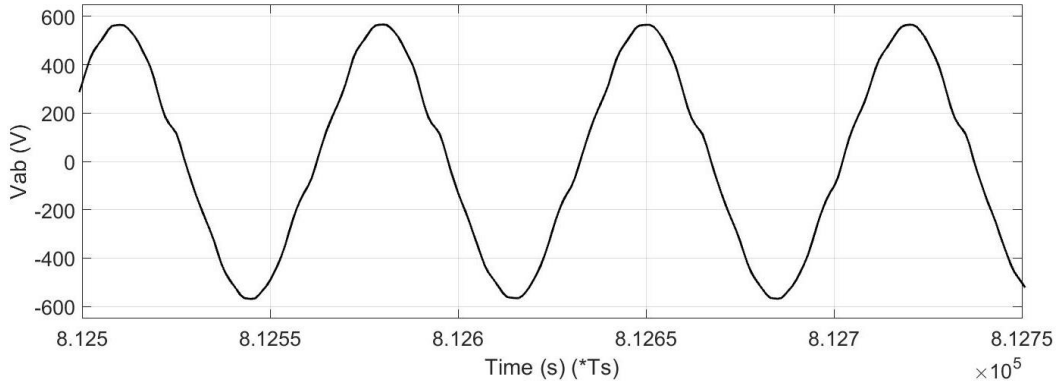
2.2.1. Deneysel Çalışma 1

Bu denemede örnekleme zamanı $T_s=256\mu s$ ve anahtarlama frekansı $f_s=625Hz$ olarak seçilmiştir. Denetleyici olarak PI türü denetleyiciler kullanılmıştır. Hem STATCOM akımlarının denetimi için hem de kondansatörlerin gerilimlerinin denetimi için PI denetleyiciler kullanılmıştır. Kondansatör gerilimi dSPACE ControlDesk yazılımı üzerinden değiştirildiği anda deneysel sistemdeki kondansatörlerin değerlerinin anında cevap verdiği net bir şekilde görülmektedir. Referans kondansatör gerilim değeri Şekil 75’de görüldüğü gibi başlangıçta $V_{DA}=140V$ olarak alınmıştır. Sonra kademeli olarak 10V arttırılarak 200V değerine kadar yükseltilmiş sonrada düşürülmüştür. Grafikleri aşağıdaki gibidir.



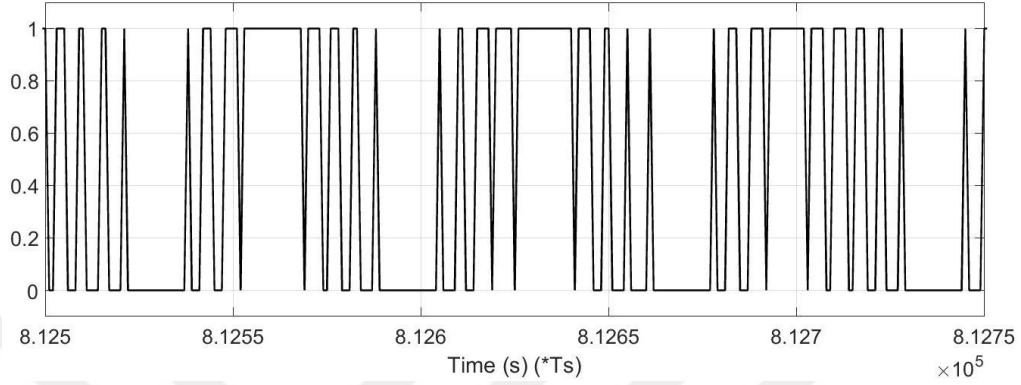
Şekil 75. DA-hat geriliminin değişimi

Şekil 76’da yük üzerindeki gerilimin dalga şekli görülmektedir.

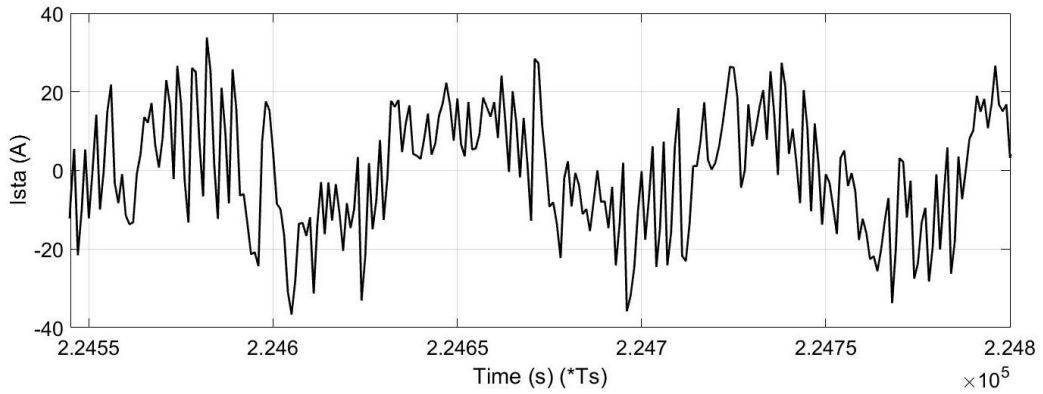


Şekil 76. Yük üzerindeki gerilimin değişimi

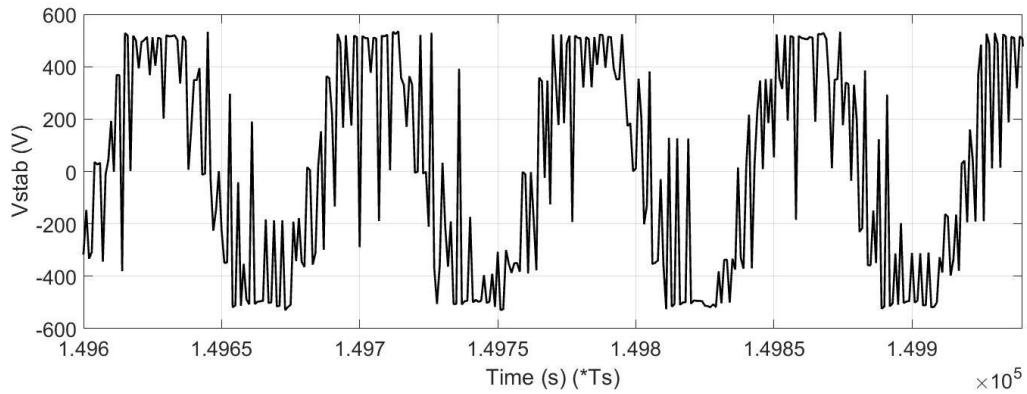
Şekil 77’de kontrol sisteminin çıkışından üretilen PWM sinyallerinin açık bir şekli görülmektedir. Şekil 78’de STATCOM çıkış akımının bir fazının değişimi görülmektedir. Şekil 79’de STATCOM çıkış faz-faz geriliminin değişimi görülmektedir.



Şekil 77. Anahtarlama sinyalleri



Şekil 78. STATCOM çıkış akımının bir fazının değişimi

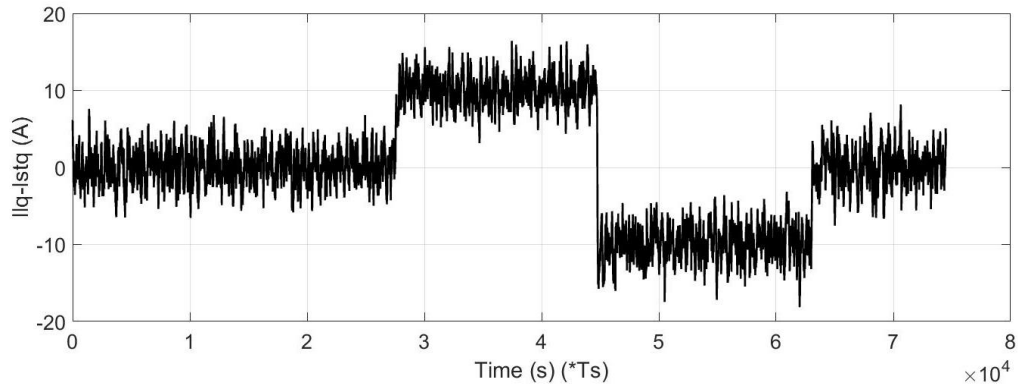


Şekil 79. STATCOM çıkış faz-faz geriliminin değişimi

2.2.2. Deneysel Çalışma 2

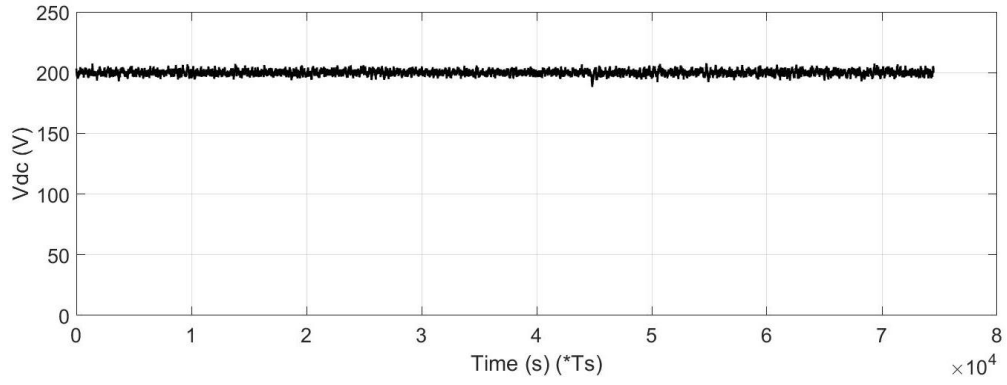
Bu denemede örnekleme zamanı $T_s=263\mu s$ ve anahtarlama frekansı $f_s=625Hz$ olarak seçilmiştir. Denetleyici olarak MBMD-PI türü denetleyici ile klasik PI denetleyici karma olarak kullanılmıştır. STATCOM akımlarının denetimi için klasik PI denetleyici ile kondansatörlerin gerilimlerinin kontrolü için ise MBMD-PI denetleyici kullanılmıştır. Referans kondansatör gerilim değeri $V_{DA}=200V$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Aşağıda görülen grafikler deneysel sistemden dSPACE ControlDesk yazılımı aracılığı ile bilgisayar ortamına gerçek zamanlı alınmış ve çizdirilmiştir.

Şekil 80’de yük tarafındaki akımın reaktif bileşeni 0’den +10A seviyesine (sisteme kapasitif reaktif yük eklenmiştir) ve daha sonra da -10A seviyesine (sisteme endüktif reaktif yük eklenmiştir.) çekildiğinde STATCOM akımının q bileşeni de bu referans akımı başarılı bir şekilde izlemektedir.

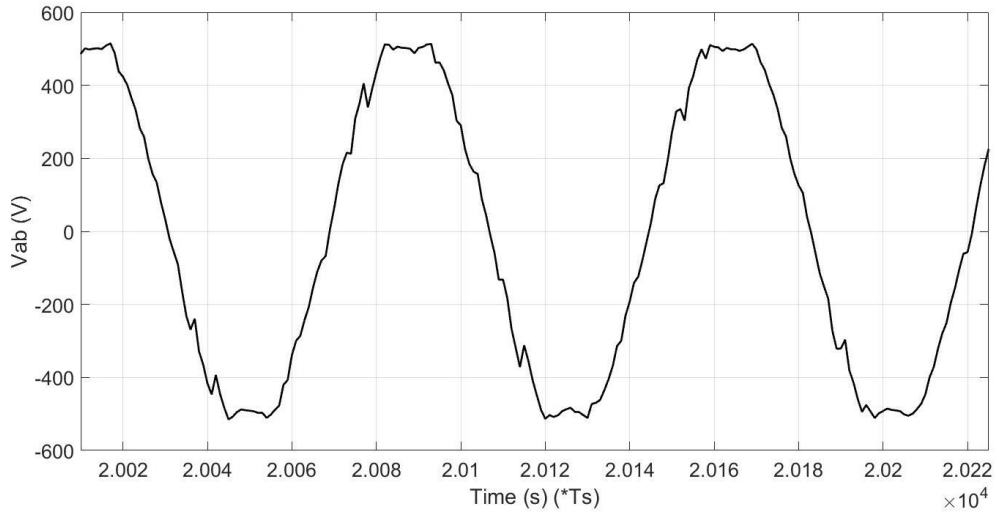


Şekil 80. STATCOM’un akımının q bileşeni ile yük akımının q bileşeni

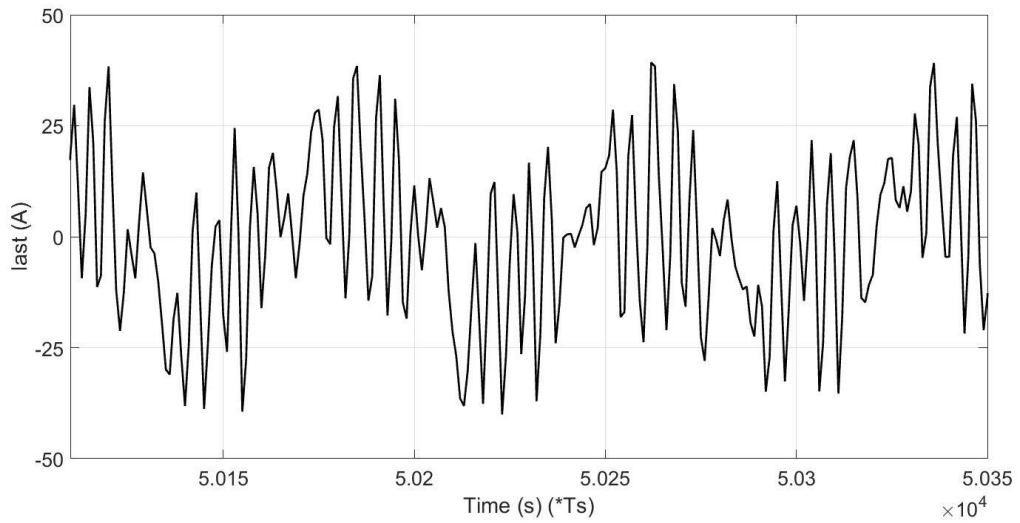
Şekil 80’deki gibi yük tarafında değişimler yapıldığı sırada STATCOM DA-hat gerilimi Şekil 81’de görüldüğü gibi referans değer olan 200 V seviyesinde sabit kalmayı başarmıştır. Şekil 82’de ortak bağlantı noktasındaki gerilim değişimi görülmektedir. Şekil 83’te STATCOM çıkış akımının değişimi görülmektedir. STATCOM çıkış akımı düşük anahtarlama frekansı kullanılması ve filtre kullanılmaması gibi nedenlerden dolayı biraz bozuk bir görünüme sahiptir. Burada reaktif 10A’lik yük akımı bulunmaktadır.



Şekil 81. DA-hat gerilimi değişimi



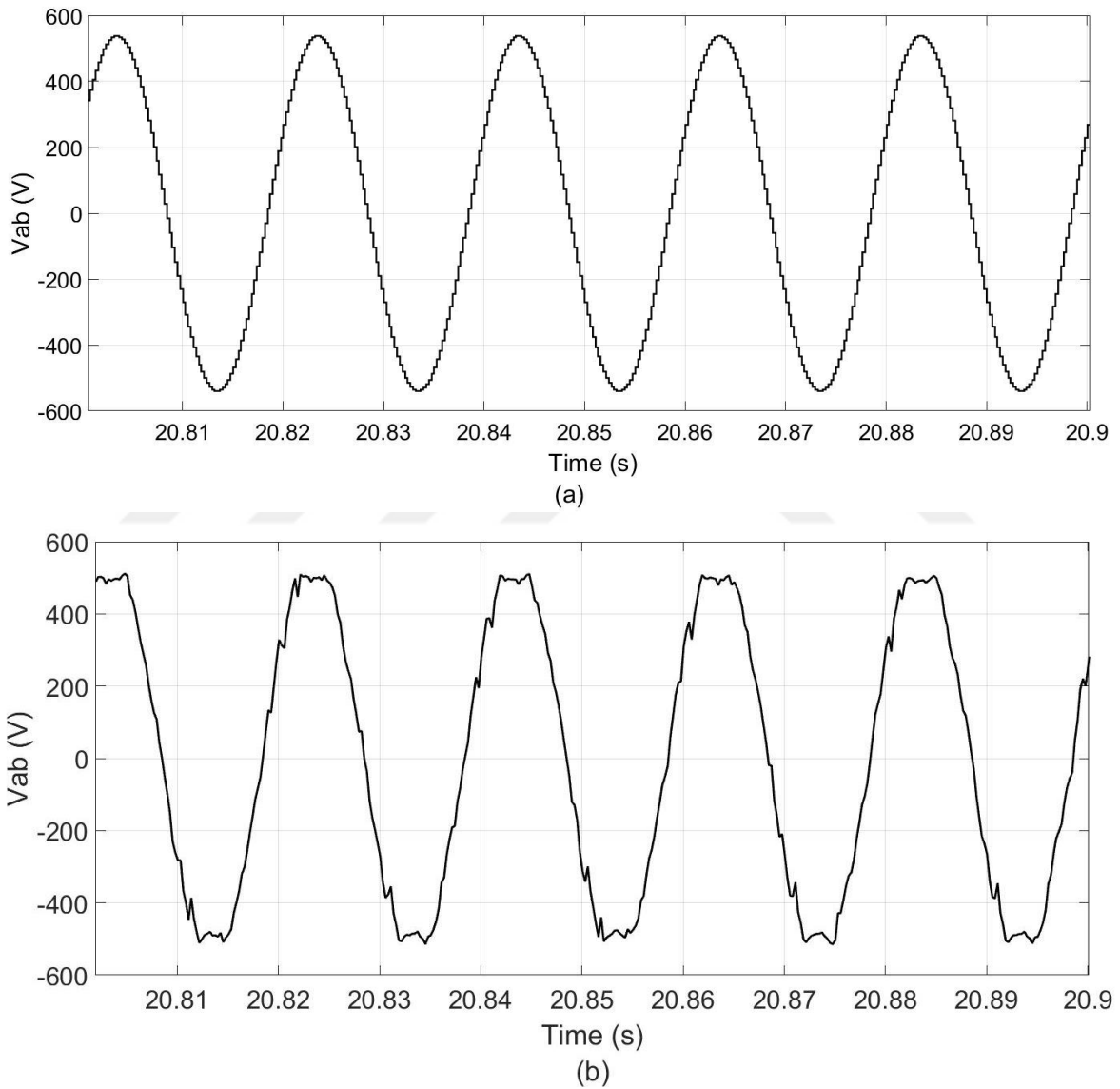
Şekil 82. Ortak bağlantı noktasındaki gerilim değişimi



Şekil 83. STATCOM çıkış akımının değişimi

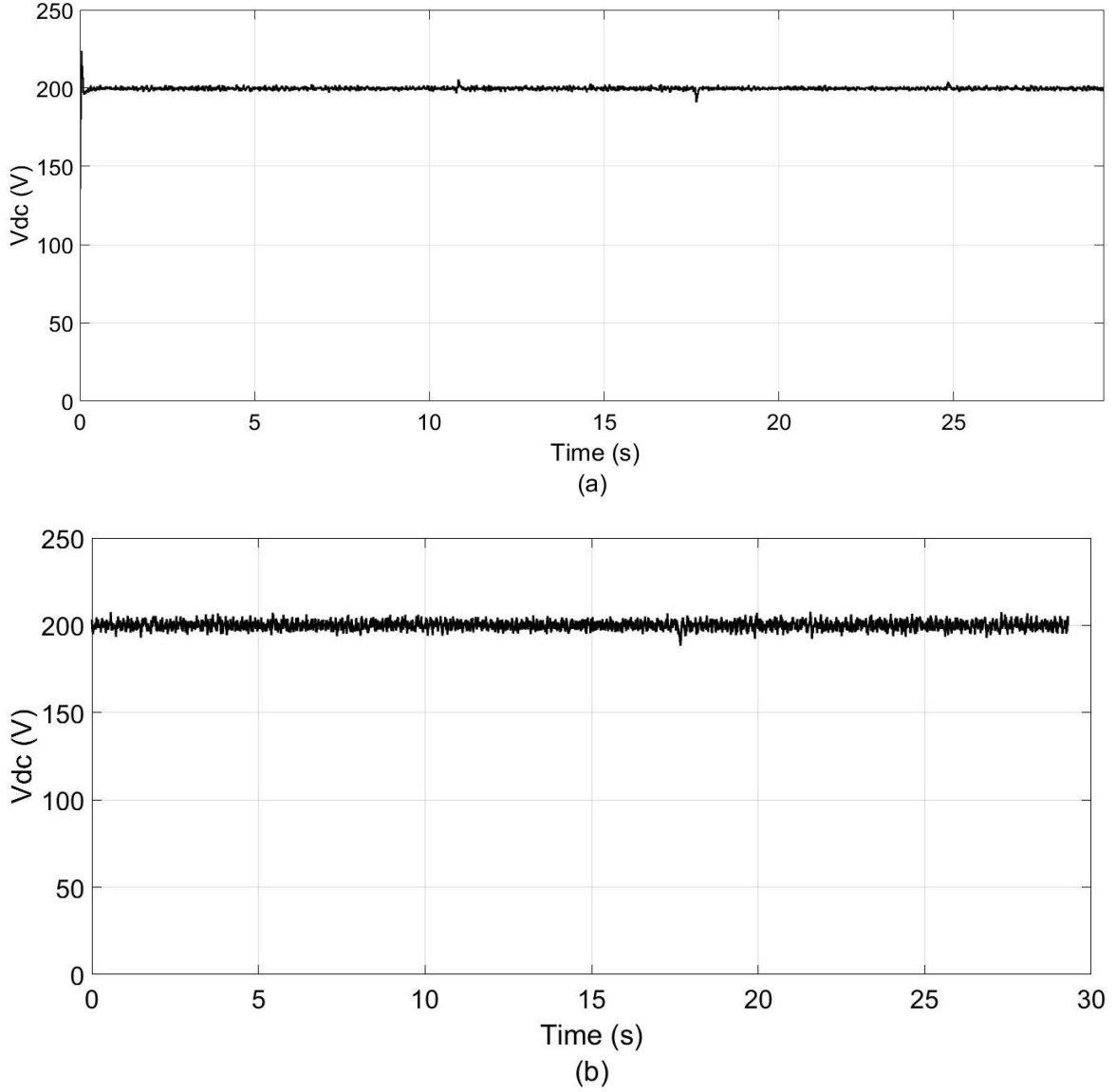
Bu bölümde deneysel sonuçlarla benzetim sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmadaki sonuçların benzetim sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için benzetim çalışmasında da aynı değerler kullanılarak çalıştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 84, STATCOM'un ana hatta bağlandığı ortak bağlantı noktasındaki gerilim cevabını göstermektedir.



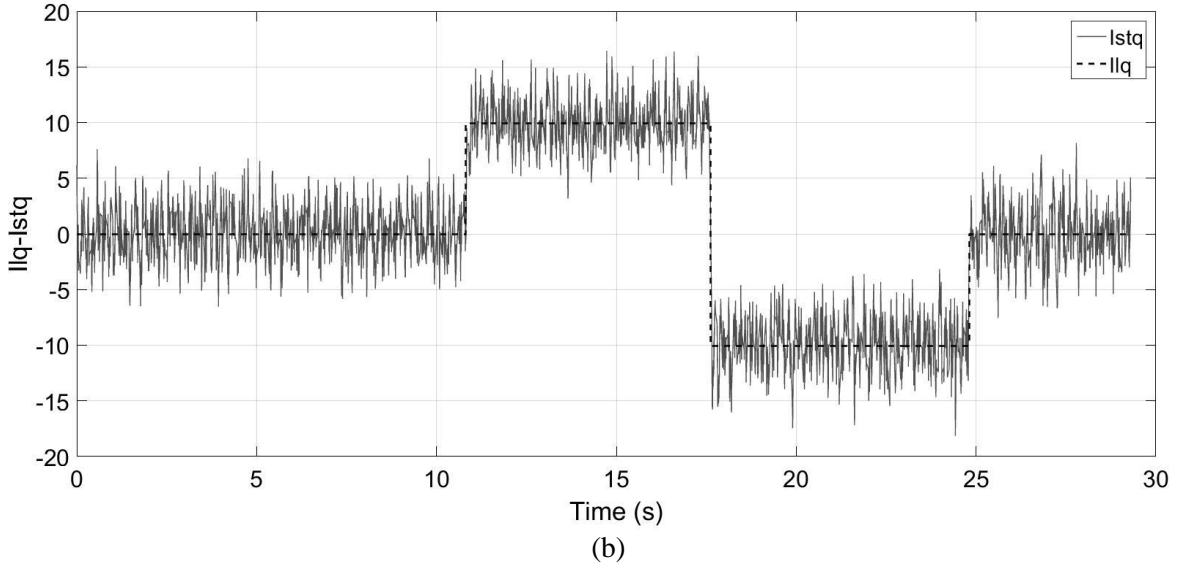
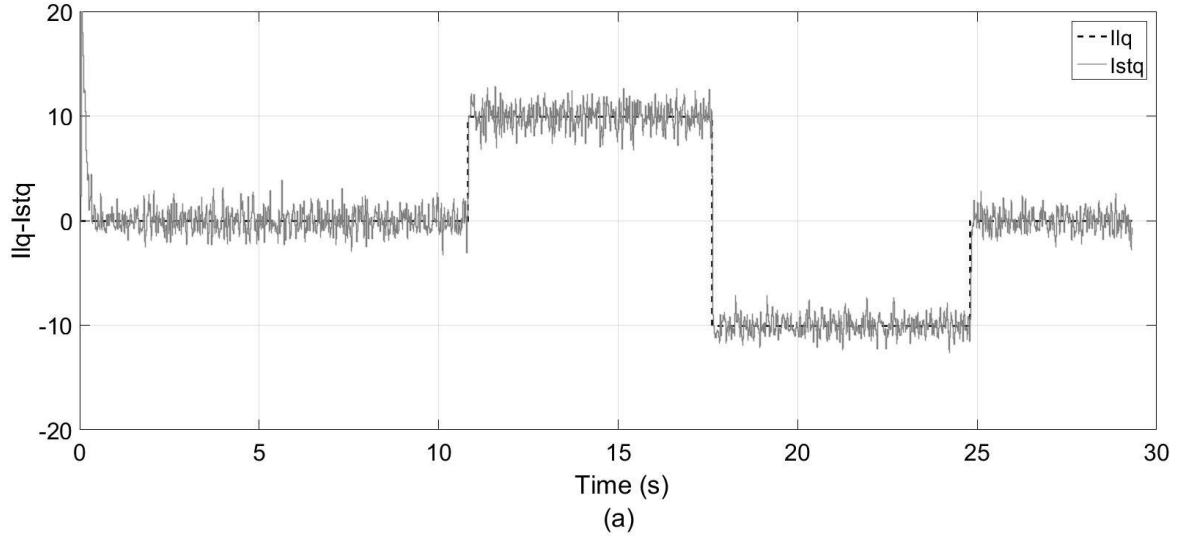
Şekil 84. Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin bir fazının dalga şekli (a) benzetim çalışması (b) deneysel çalışma

Şekil 85'te her bir H-köprü evirici için DA-hat kapasite gerilimi dalga şekli görülmektedir.



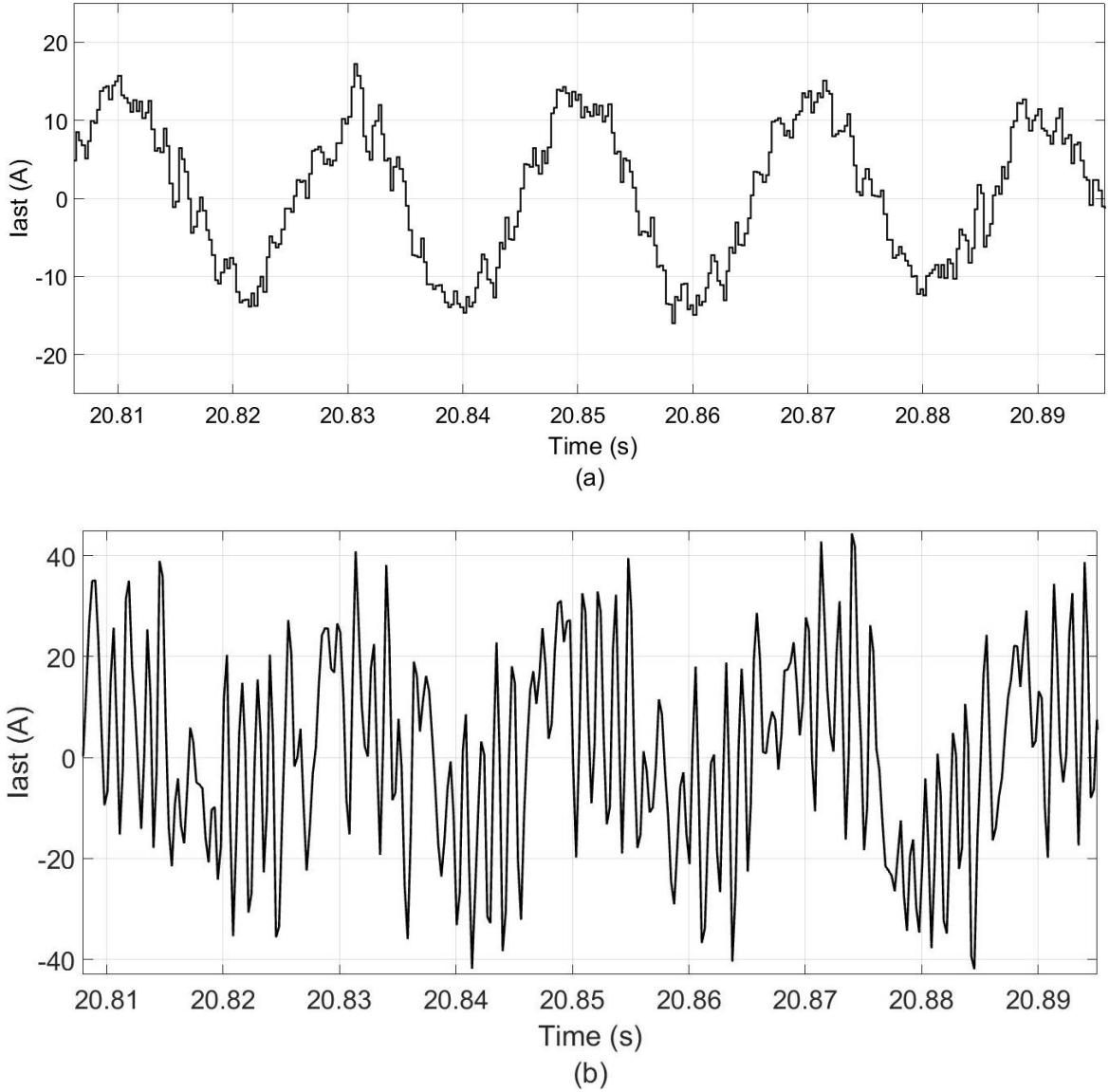
Şekil 85. DA-hat gerilimi değişimi (a) benzetim çalışması (b) deneysel çalışma

Şekil 86'da görüldüğü gibi, yükün referans reaktif akım bileşeni (ilq) 0 A değerinden 10 A değerine gelecek şekilde yüklenmiştir (kapasitif reaktif yük ile). Daha sonra 10 A değerinden -10 A değerine gelecek şekilde yüklenmiştir (endüktif reaktif yük ile). Ve son olarak -10 A değerinden 0 A değerine gelecek şekilde yükler devre dışı bırakılmıştır. Bu durumda STATCOM'un q eksen akımının (istq), ilq akımını başarılı bir şekilde izlediği görülmektedir.



Şekil 86. STATCOM'un akımının q bileşeni ile yük akımının q bileşeni (a) benzetim çalışması (b) deneysel çalışma

Şekil 87'de STATCOM çıkış akımının bir fazının dalga şekli görülmektedir.



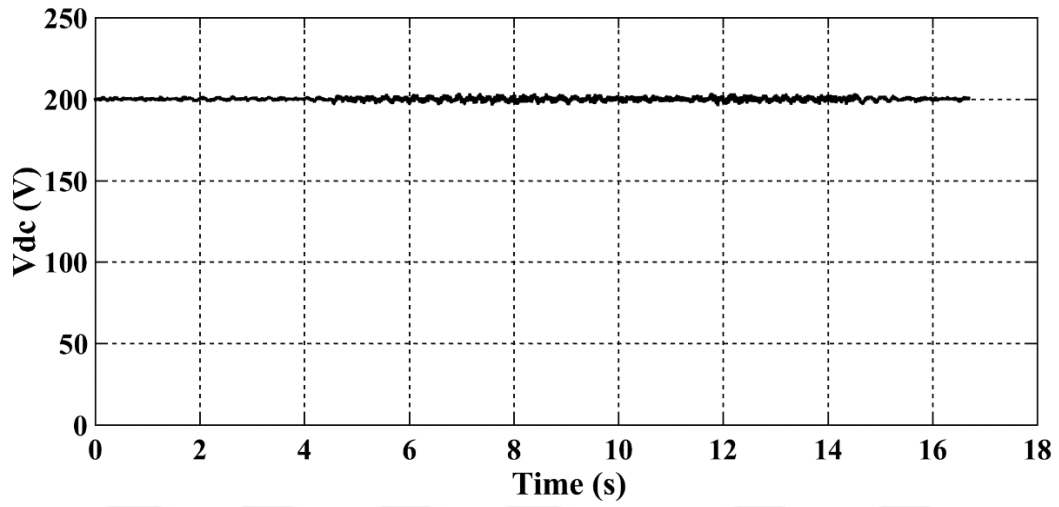
Şekil 87. STATCOM çıkış akımının değişimi (a) benzetim (b) deneysel

2.2.3. Deneysel Çalışma 3

Bu denemede kontrol sistemi için örnekleme zamanı $T_s=300\mu s$ ve anahtarlama frekansı $f_s=833\text{Hz}$ olarak seçilmiştir. STATCOM'un gerilim kaynaklı evirici yapısında modülasyon tekniği olarak 833Hz frekansa sahip bir POD-SPWM kullanılmıştır. Denetleyici olarak MBMD-PI türü denetleyici ile klasik PI denetleyici karma olarak kullanılmıştır. STATCOM akımlarının denetimi için klasik PI denetleyici ile kondansatörlerin gerilimlerinin kontrolü için ise MBMD-PI denetleyici kullanılmıştır. Referans kondansatör gerilim değeri $V_{DA}=200\text{V}$ olarak alınmıştır. STATCOM'un ortak

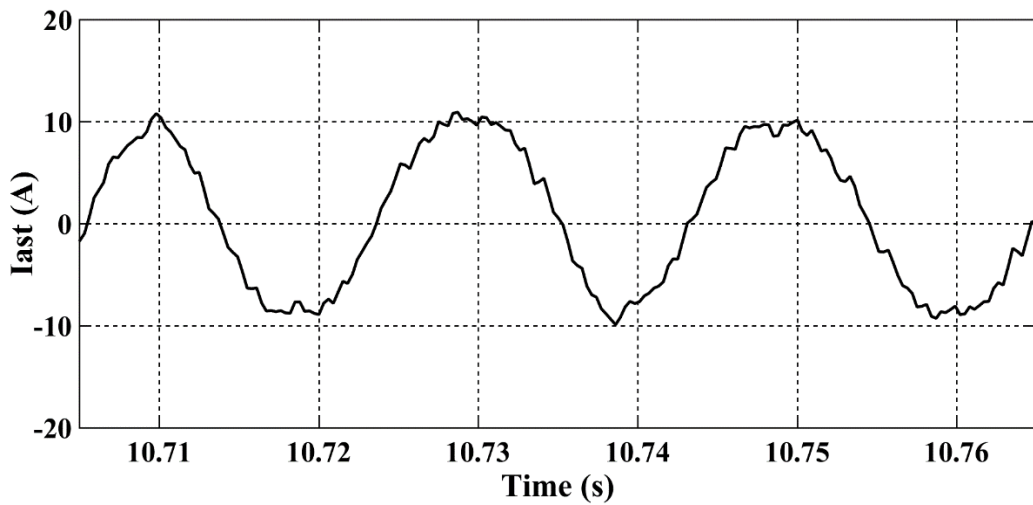
bağlantı noktasına bağlanması için gerekli olan bağlantı endüktansının değeri ise 20mH olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Aşağıda görülen grafikler dSPACE ControlDesk yazılımı aracılığı ile bilgisayar ortamına gerçek zamanlı alınmış ve çizdirilmiştir.

Şekil 88’de her bir H-köprü evirici için DA-hat kapasite gerilimi dalga şekli görülmektedir.



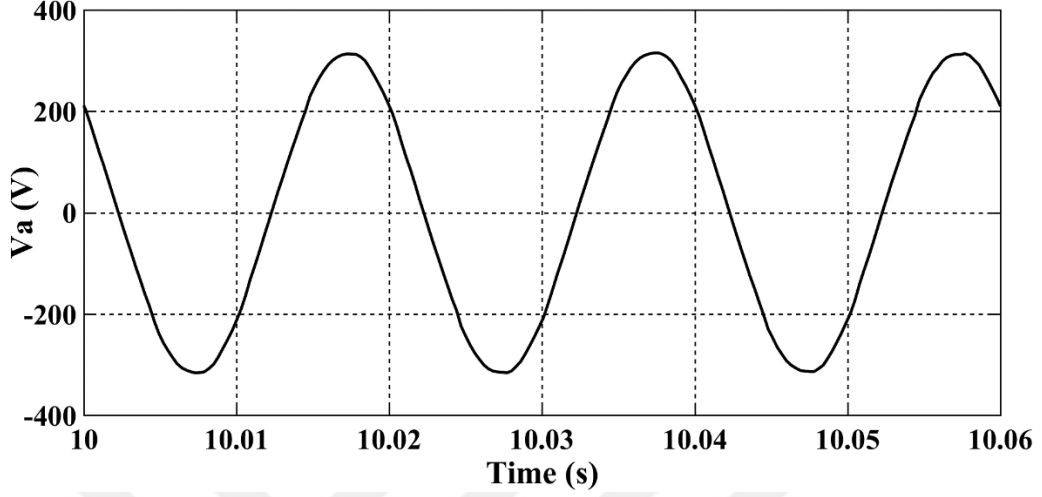
Şekil 88. DA-hat gerilimi değişiminin deneysel dalga şekli

Şekil 89’de STATCOM çıkış akımının bir fazının dalga şekli görülmektedir.



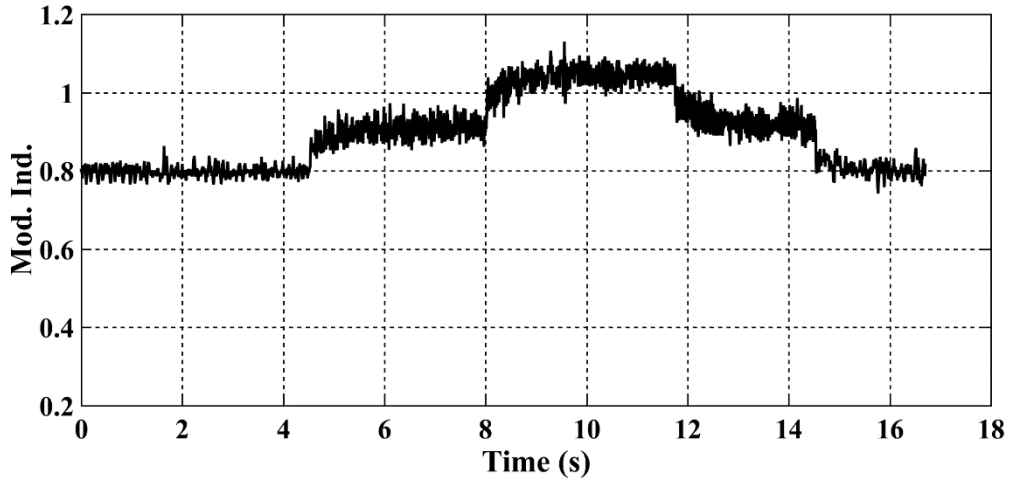
Şekil 89. STATCOM çıkış akımının değişimi

Şekil 90, STATCOM'un ana hatta bağlandığı ortak bağlantı noktasındaki gerilim cevabını göstermektedir.



Şekil 90. Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin bir fazının dalga şekli

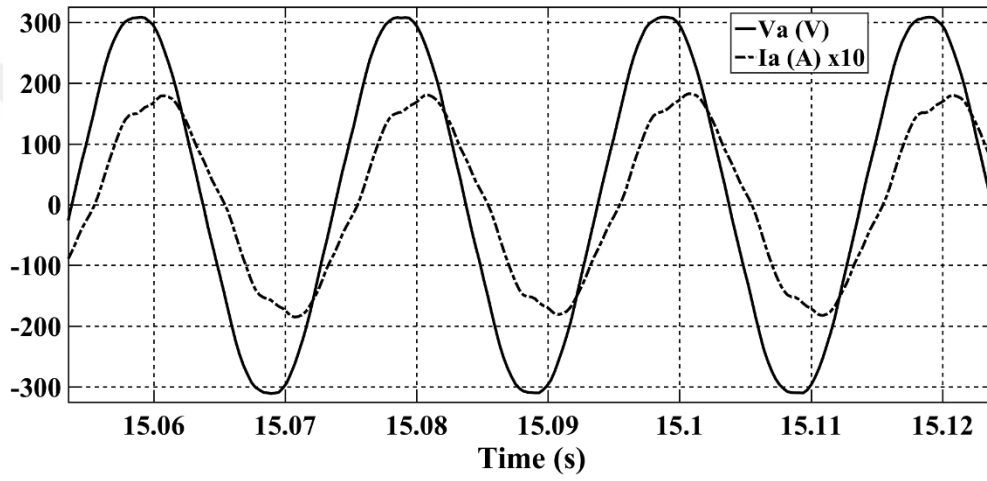
Şekil 91'de görüldüğü gibi beşinci saniyede 1.5kVAr reaktif güç değerine sahip bir asenkron motor yükü, sekizinci saniyede ise 1kVAr reaktif güç değerine sahip başka bir asenkron motor yükü devreye alınmıştır. Sekizinci saniyede modülasyon indeksi 0.9 değerinden 1.05 değerine yükselmiştir.



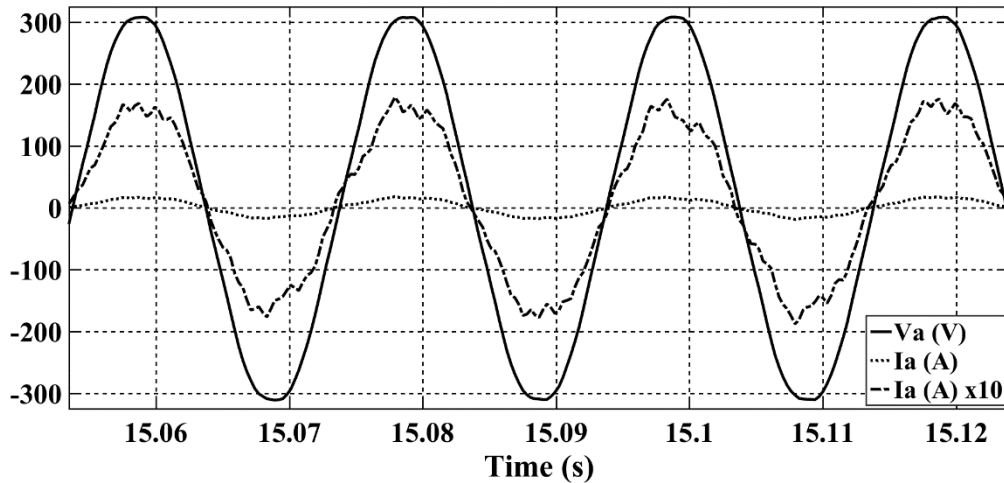
Şekil 91. Modülasyon indeksinin dalga şekli

2.2.4. Deneysel Çalışma 4

Deneysel çalışma 4'te kullanılan değerler burada da kullanılmıştır. Sadece yük olarak sisteme harici gerçek yük bağlanarak sonuçlar çizdirilmiştir. Şekil 92, STATCOM'suz sistemde ortak bağlantı noktasındaki gerilim ve akım değişimlerini göstermektedir. Şekil 93 ise STATCOM'lu sistemde ortak bağlantı noktasındaki gerilim ve akım değişimlerini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi güç faktörü açısından analiz edildiğinde STATCOM sayesinde gerilim ile akım arasındaki faz farkı ortadan kaldırılmıştır.

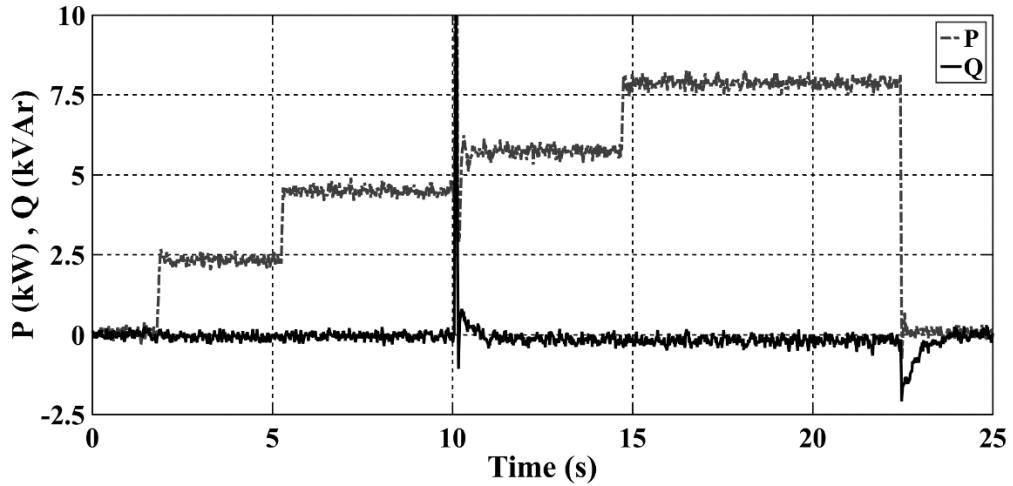


Şekil 92. Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin ve akımın dalga şekli (STATCOM'suz)



Şekil 93. Ortak bağlantı noktasındaki gerilimin ve akımın dalga şekli (STATCOM'lu)

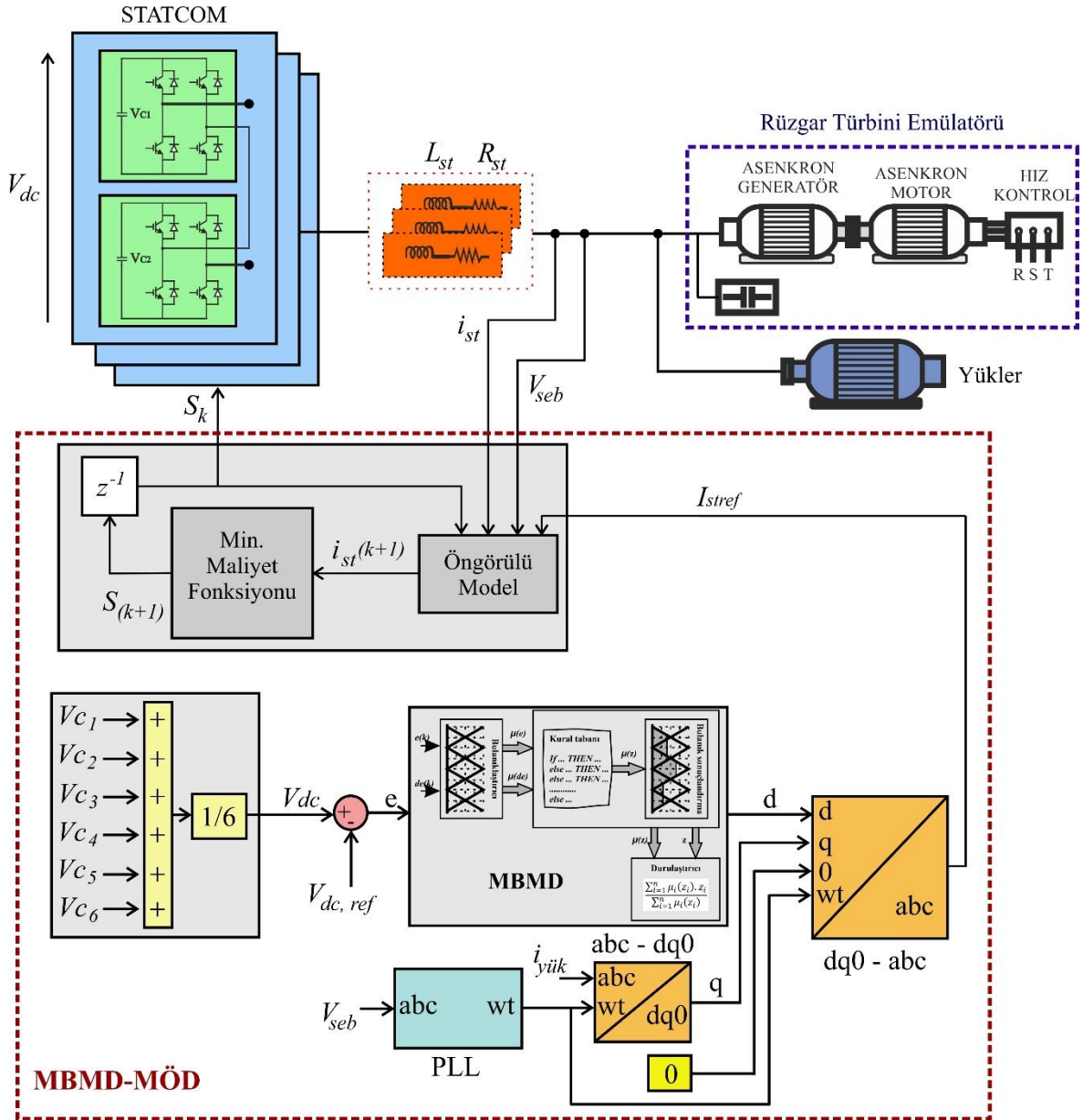
Şekil 94'te STATCOM'lu sistemde ortak bağlantı noktasındaki aktif ve reaktif güç değişimleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi 1.8. saniyede 2kW güç değerine sahip bir direnç yükü, 5.25. saniyede 2kW güç değerine sahip bir direnç yükü daha, 10.05. saniyede 5kW güç değerine sahip bir asenkron motor yükü ve son olarak 14.7. saniyede ise 2kW güç değerine sahip bir direnç yükü daha devreye alınmıştır. Reaktif gücün beklendiği gibi 0Var seviyesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 94. Ortak bağlantı noktasındaki aktif ve reaktif güç değişimi (STATCOM'lu)

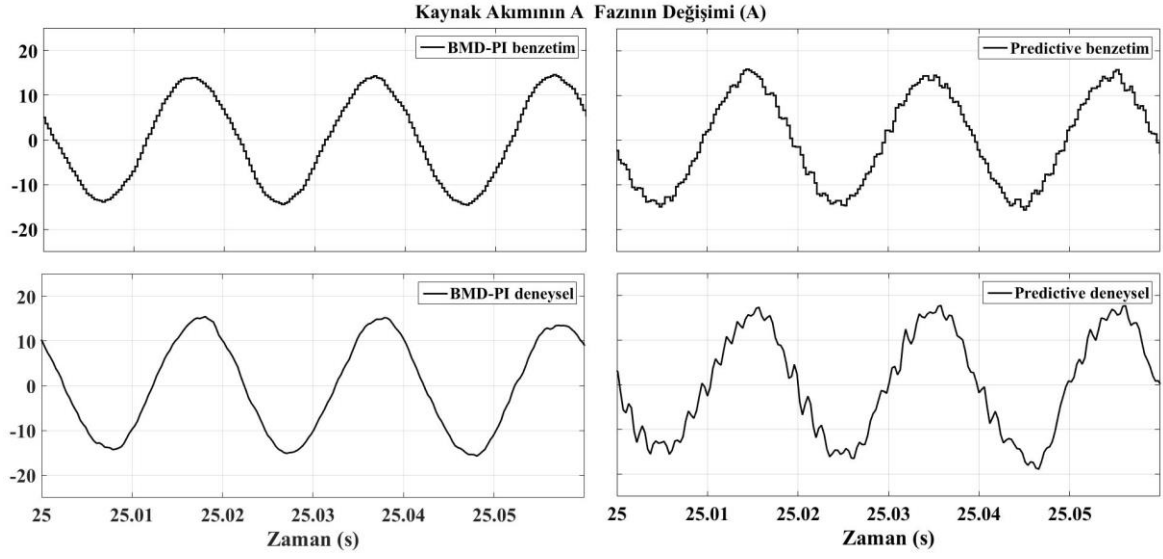
2.2.5. Deneysel Çalışma 5

Bu deneysel çalışma için örnekleme zamanı $T_s=300\mu s$ ve anahtarlama frekansı $f_s=833\text{Hz}$ olarak seçilmiştir. Anahtarlama sinyalleri için PD-SPWM yöntemi kullanılmıştır. Denetleyici olarak hem MBMD-PI ile PI türü denetleyiciler hem de MBMD-MÖD yapıları kullanılmıştır. Referans DA-hat gerilimi 200V ve bağlantı endüktansı 25mH'dir. Sisteme harici olarak gerçek yükler bağlanmıştır. Bu deneysel çalışma için kullanılan MBMD-MÖD denetimli sistemin blok diyagramı Şekil 95'te görülmektedir.



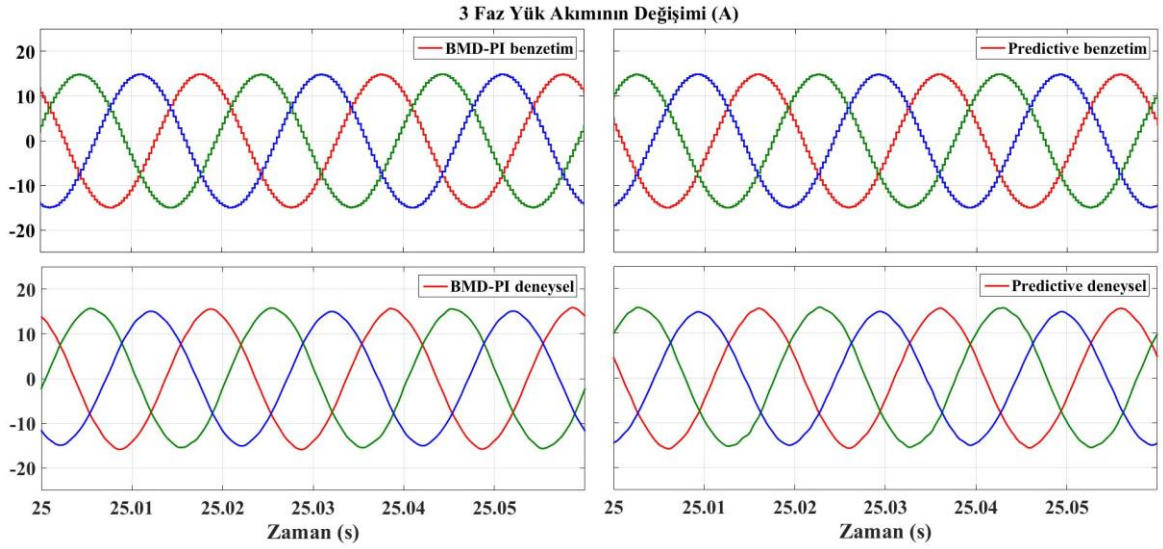
Şekil 95. MBMD-MÖD denetimli sistem yapısı

Şekil 96'dan Şekil 100'e kadar olan grafiklerde STATCOM denetim sisteminde kullanılan her iki denetleyici yapıları için (şeklin sol yanındaki grafikler MBMD-PI ile şeklin sağ yanındaki grafikler MBMD-MÖD) hem benzetim sonuçları (şeklin üst tarafındaki grafikler) hem de deneysel sonuçlar (şeklin alt tarafındaki grafikler) gösterilmektedir. Şekil 96'da sistemin kaynak tarafındaki akımın bir fazının değişimi görünmektedir.



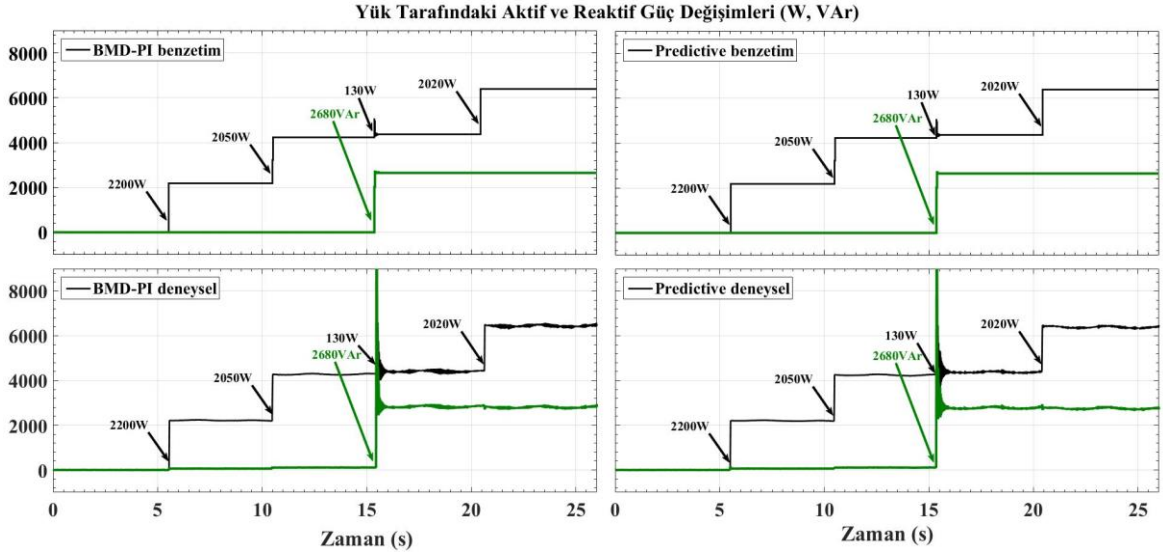
Şekil 96. Kaynak akımının bir fazının değişimi

Şekil 97’de yük tarafındaki akımın 3 fazının değişimleri görülmektedir.



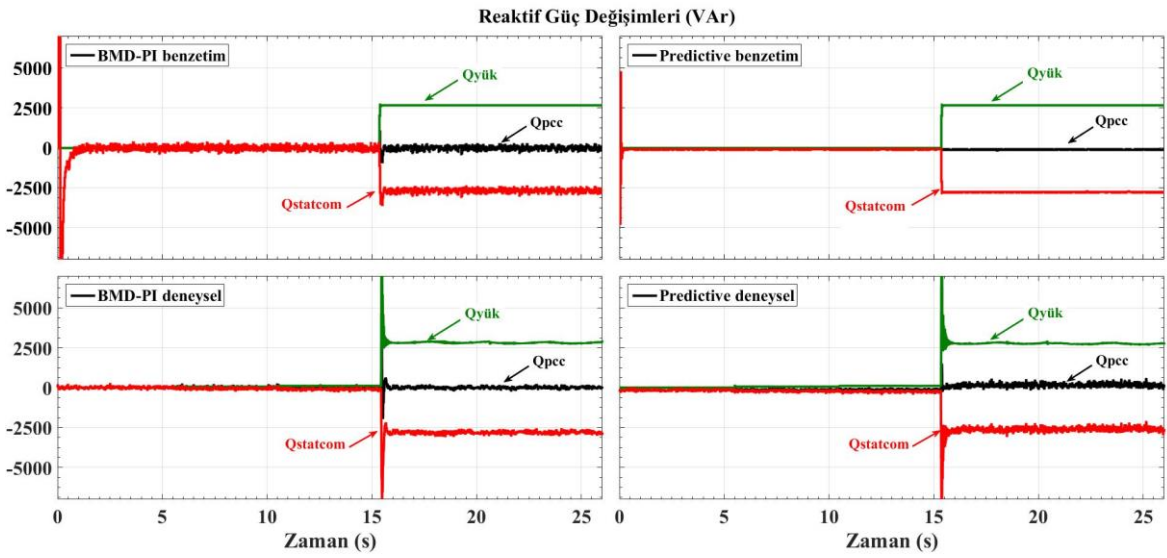
Şekil 97. Yük akımının değişimi

Şekil 98’de yük tarafındaki aktif güç ile reaktif güç değişimleri görülmektedir. Bu şekilde hangi yükün ne zaman devreye alındığı net bir şekilde görülmektedir.



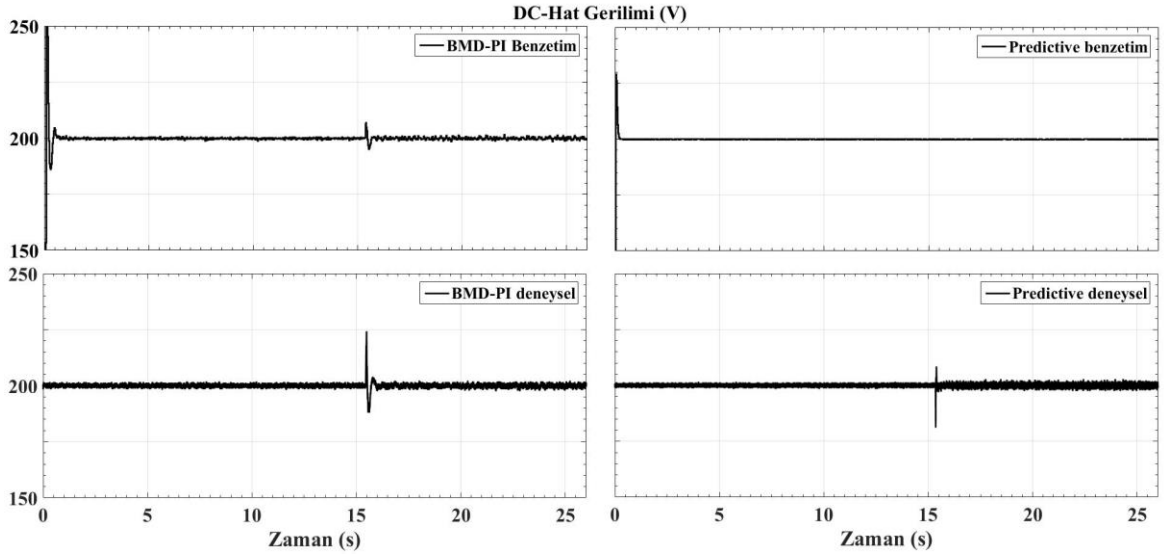
Şekil 98. Yükün aktif reaktif güç değişimleri

Şekil 99’da sistemin yük tarafındaki, kaynak tarafındaki ve STATCOM tarafındaki reaktif güç değişimleri aynı grafik üzerinde görülmektedir.



Şekil 99. Reaktif güç değişimleri

Şekil 100’de STATCOM DA-hat gerilimi değişimi görülmektedir.

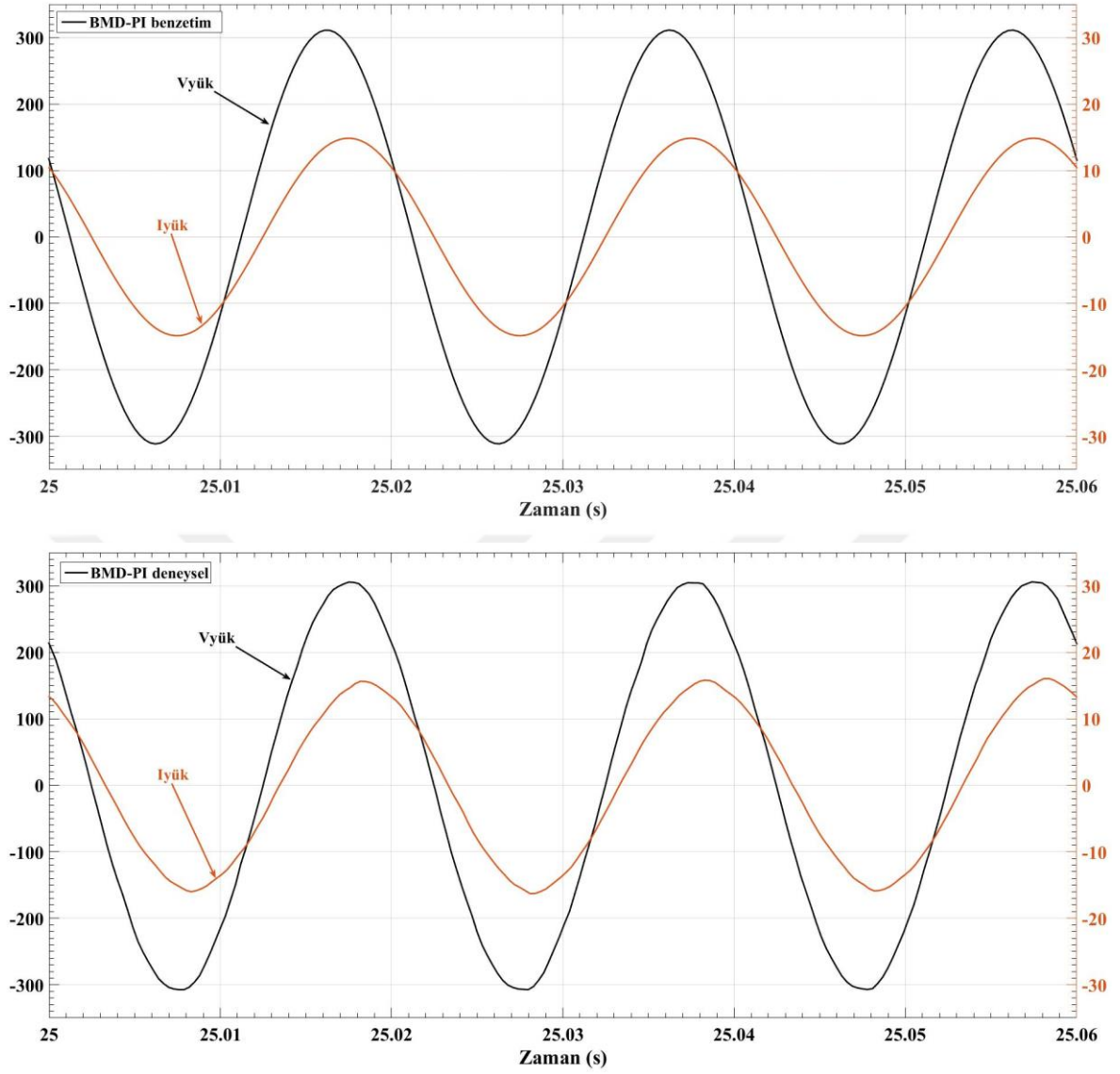


Şekil 100. STATCOM DA-hat gerilimi değişimi

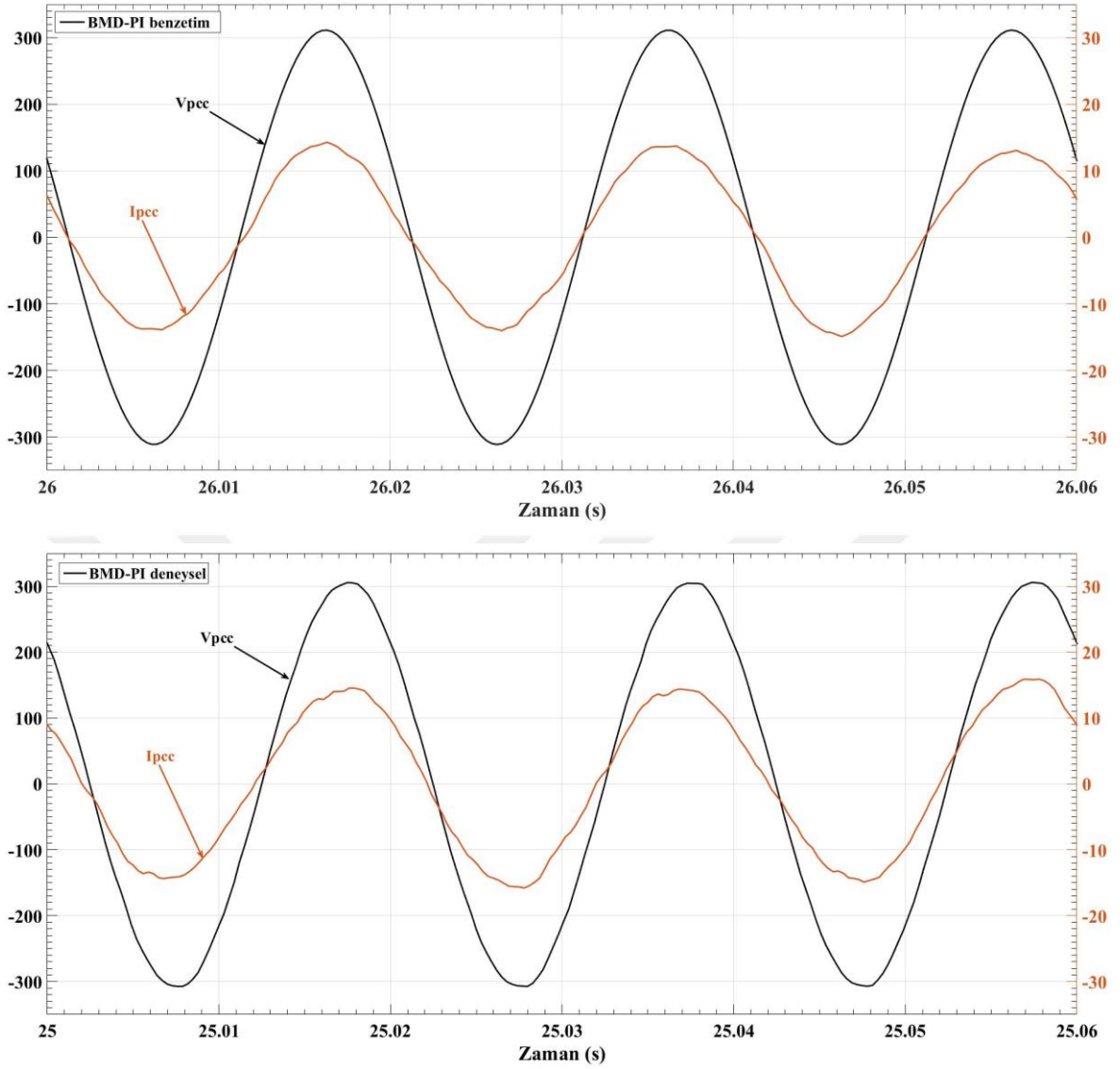
Şekil 101’de ve Şekil 102’de, MBMD-PI ve PI’lı dolaylı akım denetim yöntemini kullanan STATCOM’lu sistem için yük ve kaynak tarafındaki gerilim ve akım grafikleri görülmektedir.

Şekil 101’de Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışması için yük tarafındaki akım ve gerilim grafikleri üst üste çizdirilmiştir. Aynı şeklin alt tarafında ise Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışması ile aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışma için yük tarafındaki akım ve gerilim grafikleri üst üste çizdirilmiştir.

Şekil 102’de Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışması için kaynak tarafındaki akım ve gerilim grafikleri üst üste çizdirilmiştir. Aynı şeklin alt tarafında ise Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışması ile aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışma için kaynak tarafındaki akım ve gerilim grafikleri üst üste çizdirilmiştir.

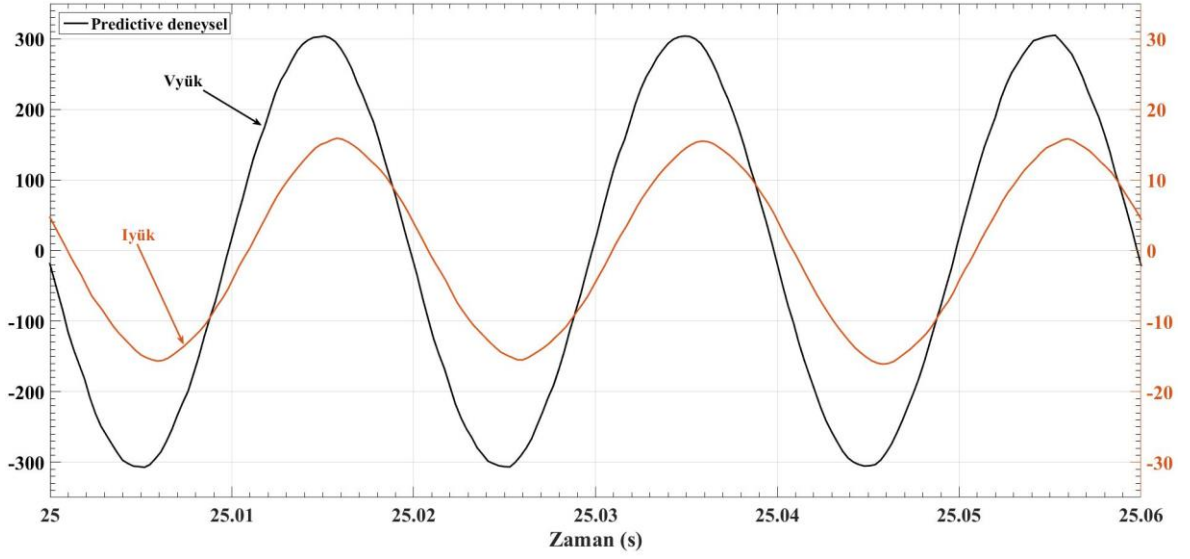
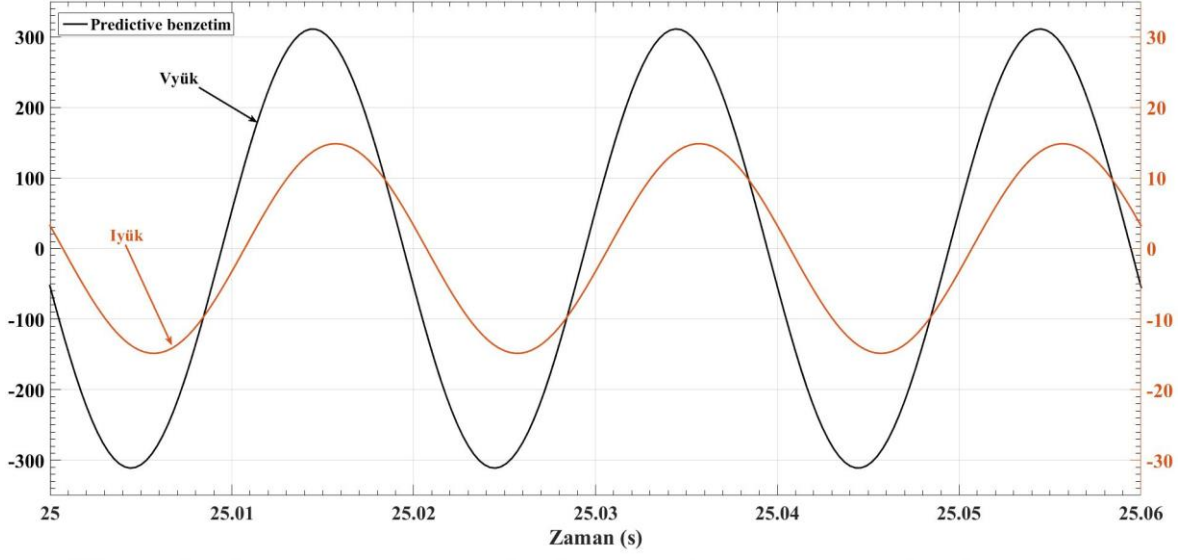


Şekil 101. MBMD-PI denetimli yük gerilimi ve akımı grafikleri

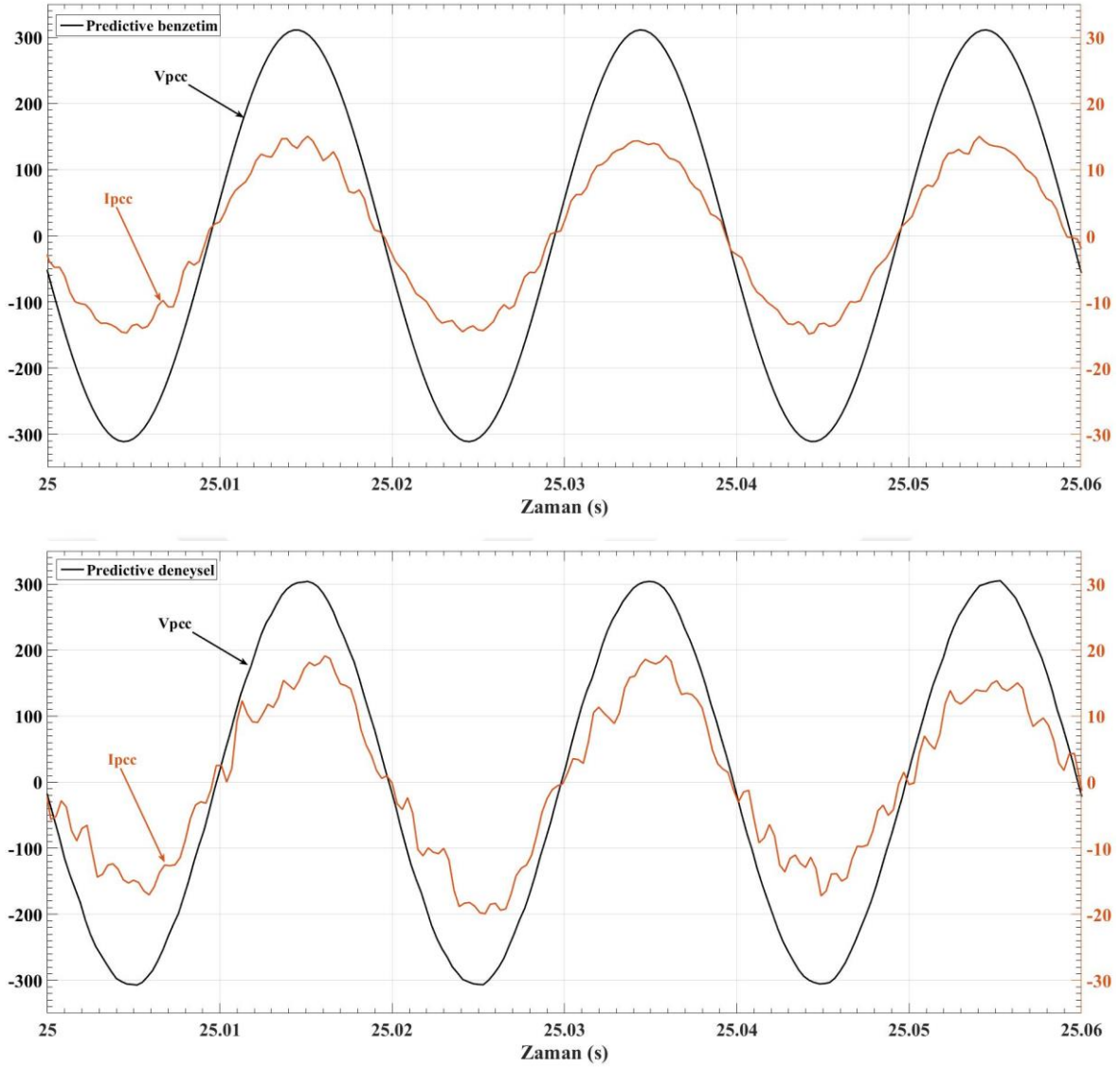


Şekil 102. MBMD-PI denetimli kaynak gerilimi ve akımı grafikleri

Şekil 103'te ve Şekil 104'te MBMD-MÖD'li denetim yöntemini kullanan STATCOM'lu sistem için yük ve kaynak tarafındaki gerilim ve akım grafikleri görülmektedir.

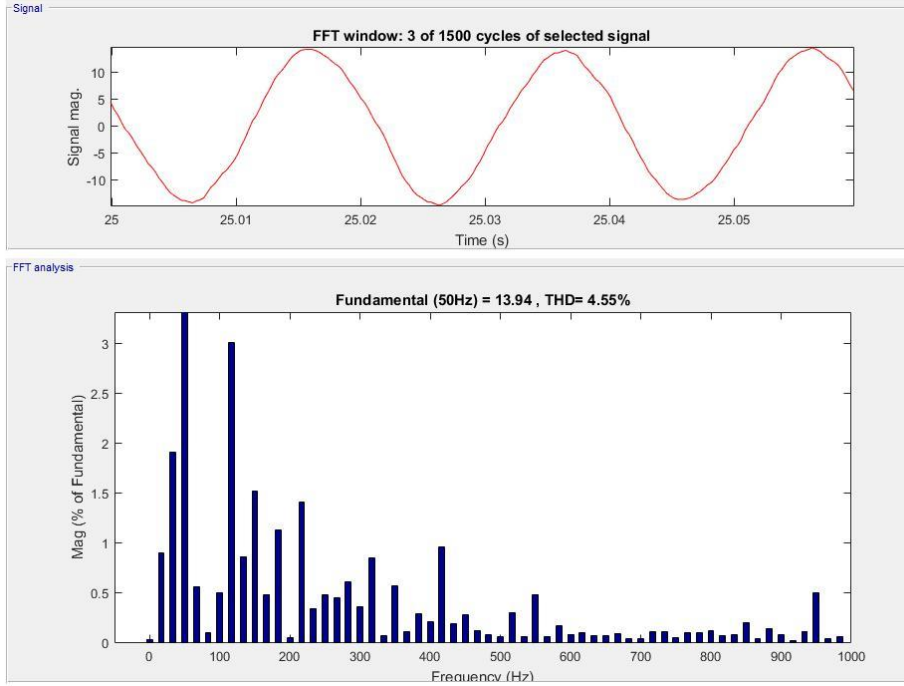


Şekil 103. MBMD-MÖD denetimli yük gerilimi ve akımı grafikleri

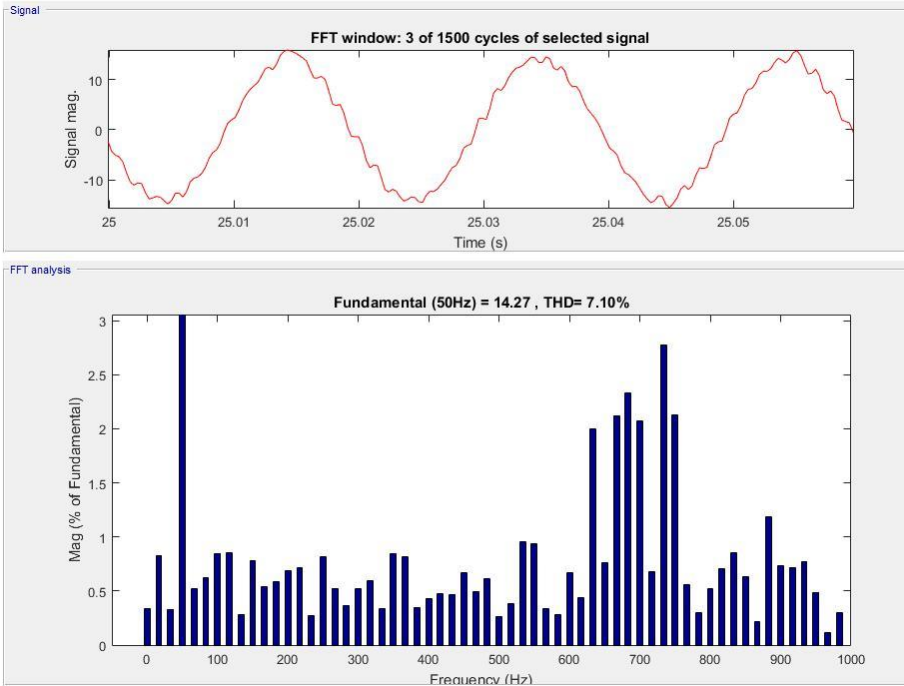


Şekil 104. MBMD-MÖD denetimli kaynak gerilimi ve akımı grafikleri

Şekil 105'te ve Şekil 106'da her iki denetim sistemi için sistemin kaynak tarafındaki akımın FFT analizleri görülmektedir. Şekil 105'te MBMD-PI denetimli sistem için kaynak tarafındaki akımın THD değeri %4,55 olarak bulunmuştur. Şekil 106'da ise MBMD-MÖD denetimli sistem için kaynak tarafındaki akımın THD değeri %7,1 olarak bulunmuştur.



Şekil 105. MBMD-PI denetimli sistemde kaynak akımının FFT analizi



Şekil 106. MBMD-MÖD denetimli sistemde kaynak akımının FFT analizi

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında rüzgar enerji sistemleri için beş seviyeli kaskad H-köprü eviricili STATCOM cihazı tasarlanmıştır ve başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Tasarlanan bu STATCOM cihazının kontrolü için yeni kontrol teknikleri önerilmiştir. Önerilen kontrol yöntemlerinden ilki olan d-q referans yapı teorili dolaylı akım denetim yöntemi, akım kontrolü, DA-hat gerilim kontrolü ve ortak bağlantı noktası gerilimi kontrolü olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. STATCOM cihazının DA tarafının kontrolü için MBMD-PI denetleyici, STATCOM çıkış akımının d ve q bileşenlerinin kontrolü için ise klasik PI denetleyici yapısı kullanılmıştır. Önerilen bu MBMD-PI'lı denetim yönteminin dışında MBMD-MÖD'li denetim yöntemi de önerilmiştir ve hem benzetim hem de deneysel çalışmalarda başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar için laboratuvar ortamında rüzgar türbin emülatörü oluşturulmuştur. Oluşturulan bu rüzgar türbin emülatörü şebekeden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Kaynak olarak kullanılan bu rüzgar türbini emülatörü ile STATCOM cihazının bağlantısı laboratuvar ortamında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Beş seviyeli kaskad H-köprü eviricili STATCOM cihazı ile farklı yük koşullarında reaktif güç kontrolü, gerilim düzenlemesi ve güç faktörünün iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir. Deneysel çalışma ile benzetim çalışmaları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Farklı deneysel denemelerin sonuçları da paylaşılmıştır.

4. ÖNERİLER

Bu çalışmada rüzgar enerji sistemlerinde kullanılmak üzere beş seviyeli kaskad H-köprü eviricili STATCOM cihazı tasarlanmıştır. Bu STATCOM cihazının denetimi için tasarlanan kontrol sistemi MBMD, PI denetleyici ve öngörülü denetleyici yapılarını içermektedir. Denetleyicilerin karmaşık yapılarından dolayı, deneysel gerçek zamanlı çalışma için bu çalışmada veri aktarımı için kullanılan dSPACE DS1104 kontrol kartı ile ancak düşük anahtarlama hızlarında çalışmak zorunda kalınmıştır. Bu durumu düzeltmek için daha hızlı bir kontrol kartı ihtiyacı duyulmuştur. Veri aktarım kartının daha hızlı olması ve daha fazla giriş çıkışa sahip olması durumunda daha etkin denetim gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında sabit hızlı rüzgar türbini emülatörü kullanılmıştır. Değişken hızlı rüzgar türbinleri kullanılması durumu ayrıca çalışılabilir.

STATCOM yapısında bulunan evirici seviye sayısı arttırılarak STATCOM'un etkinliği iyileştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdelsalam, A., A. ve Sharaf, A., M., 2012. A Novel FACTS Compensation Scheme for Power Quality Improvement in Wind Smart Grid, 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Nisan, Kanada, Bildiriler Kitabı: 1-4.
- Akagi, H., Watanabe, E., H. ve Aredes, M., 2007. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Wiley-IEEE Press.
- Altaş, İ., H., 2017. Fuzzy Logic Control in Energy Systems with Design Applications in Matlab/Simulink, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom.
- Beccuti, A., Mariethoz, S., Cliquennois, S., Wang, S. ve Morari, M., 2009. Explicit Model Predictive Control of DC-DC Switched-mode Power Supplies with Extended Kalman Filtering, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56,6, 1864-1874.
- Bordons, C., ve Camacho, E., 1998. A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 6,3, 372-387.
- Carrara, G., Gardella, S., Marchesoni, M., Salutari, R. ve Sciutto, G., 1992. A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis, IEEE Transactions on Power Electronics, 7,3, 497-505.
- Cengelci, E., Sulistijo, S., U., Woo, B., O., Enjeti, P., Teoderescu, R. ve Blaabjerg, F., 1999. A New Medium-Voltage PWM Inverter Topology for Adjustable-Speed Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, 35,3, 628-637.
- Chong, H., 2006. Power System Dynamic Voltage Management with Advanced STATCOM and Energy Storage System, Ph.D. Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University.
- Clarke, D., W., Mohtadi, C. ve Tuffs, P., S., 1987. Generalized Predictive Control – Part I. The Basic Algorithm”, Automatica, 23,2, 137-148.
- Corzine, K. ve Familiant, Y., 2002. A New Cascaded Multilevel H-bridge Drive, IEEE Transactions on Power Electronics, 17,1, 125-131.
- Çetin, A., 2007. Design and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering, Ph.D. Thesis, METU Electrical and Electronic Engineering Department, Ankara.
- Çöteli, R., 2010. Üç Seviyeli H-köprü Evirici Tabanlı D-STATKOM’un Sinirsel Bulanık Ağ ile Denetimi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Danayiyen, Y., Altaş, İ., H. ve Şahin, E., 2017. Model Predictive Control of a DC-DC Buck Converter, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 8,2, 91-97.
- Dixon, J. ve Moran, L., 2002. Multilevel Inverter, based on Multi-Stage Connection of Three-Level Converters Scaled in Power of Three, IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Kasım, İspanya, Bildiriler Kitabı: 886-891.
- Dong, L., Crow, M., L., Yang, Z., Shen, C., Zhang, L. ve Atcitty, S., 2004. A Reconfigurable FACTS System for University Laboratories, IEEE Trans. Power Systems, 19,1, 120-128.
- Effler, S., Kelly, A., Halton, M. ve Rinne, K., 2008. Automated Optimization of Generalized Model Predictive Control for DC-DC Converters, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Haziran, Yunanistan, Bildiriler Kitabı: 134-139.
- Egiguren, P., Caramazana, O., Garrido Hernandez, A. ve Garrido Hernandez, I., 2008. SVPWM Linear Generalized Predictive Control of Induction Motor Drives, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Haziran, İngiltere, Bildiriler Kitabı: 588-593.
- El-Kholy, E., 2005. Generalized Predictive Controller for A Boost AC to DC Converter Fed DC Motor, International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Kasım, Malezya, Bildiriler Kitabı: 1090-1095.
- Feltes, J., W., Gemmell, B., D. ve Retzmann, D., 2011. From Smart Grid to Super Grid Solutions with HVDC and FACTS for Grid Access of Renewable Energy Sources, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Temmuz, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 1-6.
- Gupta, R., Ghosh, A. ve Joshi, A., 2006. Cascaded Multilevel Control of DSTATCOM using Multiband Hysteresis Modulation, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Haziran, Kanada, Bildiriler Kitabı: 1-6.
- Gyugyi, L., 1994. Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid State Synchronous Voltage Sources, IEEE Transactions on Power Delivery, 9,2, 904-911.
- Hammond, P., W., 1997. A New Approach to Enhance Power Quality for Medium Voltage AC Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, 33,1, 202-208.
- Han, J., Zhao, M., Peng, D. ve Tang, T., 2013. Improved Model Predictive Current Control of Cascaded H-Bridge Multilevel Converter, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Mayıs, Tayvan, Bildiriler Kitabı: 28-31.
- Hassaine, S., Moreau, S., Ogab, C. ve Mazari, B., 2007. Robust Speed Control of PMSM using Generalized Predictive and Direct Torque Control Techniques, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Haziran, İspanya, Bildiriler Kitabı: 1213-1218.

- Hill, W., A. ve Harbourt, C., D., 1999. Performance of Medium Voltage Multi-Level Inverters, IEEE Industry Applications Conference Annual Meeting, Ekim, Amerika, Bildiriler Kitabı: 1186-1192.
- Hochgraf, C., Lasseter, R., Divan, D. ve Lipo, T., A., 1994. Comparison of Multilevel Inverters for Static Var Compensation, Conference Record of the 1994 IEEE-IAS Industry Applications Society Annual Meeting, Ekim, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 921-928.
- Joos, G., Huang, X. ve Ooi, B., T., 1997. Direct-Coupled Multilevel Cascaded Series Var Compensators, IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97, Ekim, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 1608-1615.
- Kara, A. ve Yalçınöz, T., 2005. Aç-Kapa Kontrollü FACTS Cihazları ile Yük Kompanzasyonu, III. Otomasyon Sempozyumu, Kasım, Denizli, Bildiriler Kitabı: 68-72.
- Ye, Y., Kazerani, M. ve Quintana, V., H., 2005. Current-Source Converter based STATCOM: Modeling and Control, IEEE Trans. Power Delivery, 20,2, 795-800.
- Kennel, R., Linder, A. ve Linke, M., 2001. Generalized Predictive Control (GPC): Ready for use in Drive Applications?, IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Haziran, Kanada, Bildiriler Kitabı: 1839-1844.
- Kim, H., S. ve Lu, D., D.-C., 2010. Wind Energy Conversion System from Electrical Perspective —A Survey, Smart Grid and Renewable Energy, 1, 119-131.
- Lai, J.-S. ve Peng, F., Z., 1996. Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 32,3, 509-517.
- Lai, Y.-S. ve Shyu, F.-S., 2002. Topology for Hybrid Multilevel Inverter, IEE Proceedings Electric Power Applications, 149,6, 449-458.
- Landsteiner, C., Andren, F. ve Strasser, T., 2011. Evaluation and Test Environment for Automation Concepts in Smart Grids Applications, IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation, Ekim, Belçika, Bildiriler Kitabı: 67-72.
- Larsson, A., 2002. Flicker Emission of Wind Turbines during Continuous Operation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17,1, 114-118.
- Lee, C., K., Ron Hui, S., Y. ve Chung, H., S.-H., 2002. A 31-level Cascade Inverter for Power Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49,3, 613-617.
- Liu, Y. ve Luo, F., 2005. Trinary Hybrid Multilevel Inverter used in STATCOM with Unbalanced Voltages, IEE Proceedings Electric Power Applications, 152,5, 1203-1222.
- Low, K., 1998. A Digital Control Technique for a Single-phase PWM Inverter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45,4, 672-674.

- Mamdani, E., H., 1974. Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plants, Proc. IEE, 121,12, 1585-1588.
- Marei, M., I., El-Saadany, E., F. ve Salama, M., M., A., 2004. A Novel Control Scheme for STATCOM using Space Vector Modulation based Hysteresis Current Controller, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Eylül, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 58-65.
- Mariethoz, S. ve Morari, M., 2009. Explicit Model-Predictive Control of a PWM Inverter with an LCL Filter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56,2, 389-399.
- Mariethoz, S., Domahidi, A. ve Morari, M., 2009. Sensorless Explicit Model Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motors, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Mayıs, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 1250-1257.
- Masand, D., Jin, S. ve Agnihotri, G., 2006. Control Algorithms for Distribution Static Compensator, Internal Symposium on Industrial Electronics, Temmuz, Kanada, Bildiriler Kitabı: 1830-1834.
- Massoud, A., M., Finney, S., J. ve Williams, B., W., 2004. Seven-Level Shunt Active Power Filter, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Eylül, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 136-141.
- Melin, P., E., Espinoza, J., R., Baier, C., R., Guzman, J., I. ve Espinosa, E., E., 2011. Unified Power Quality Conditioner based on Current Source Converters for Harmonic Mitigation using a Decoupled Control Strategy, 37th Annual Conference on IEEE industrial Electronics Society, Kasım, Avustralya, Bildiriler Kitabı: 4152-4157.
- Menzies, R. and Zhuang, Y., 1995. Advanced Static Compensation using a Multilevel GTO Thyristor Inverter, IEEE Transactions on Power Delivery, 10,2, 732-738.
- Mohaddes, M., Gole, A., M. ve McLaren, P., G., 1999. A Neural Network Controlled Optimal Pulse-Width Modulated STATCOM, IEEE Transactions on Power Delivery, 14,2, 481-488.
- Moran, L., T., Ziogas, P., D. ve Joos, G., 1989. Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State VAr Compensator, IEEE Transactions on Industry Applications, 25,4, 598-608.
- Morris, S., Dash, P., K. ve Basu, K., P., 2003. A Fuzzy Variable Structure Controller for STATCOM, Electric Power System Research, 65, 23-24.
- Muni, B., P., Rao, S., E., Vithal, J., V., R., Saxena, S., N., Lakshminarayana, S., Das, R., L., Lal, G. ve Arunachalam, M., 2003. Development of ± 500 kVar D-STATCOM for Distribution Utility and Industrial Applications, TENCON 2003 Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, Ekim, Hindistan, Bildiriler Kitabı: 278-282.

- Munoz, J., Mendoza, P., Cotos, J. ve Palma, R., 2007. Lab-Scale Three-Phase TCR-based SVC System for Educational Purpose in Dynamic and Steady-State Analysis, IEEE 39th North American Power Symposium NAPS, Eylül, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 636-643.
- Mwinyiwiwa, B., Wolanski, Z. ve Ooi, B., T., 1999. Current Equalization in SPWM FACTS Controllers at Lowest Switching Rates, IEEE Transactions on Power Electronics, 14,5, 900-905.
- Nabae, A., Takahashi, I. ve Akagi, H., 1981. A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-17,5, 518-523.
- Naderi, R. ve Rahmati, A., 2008. Phase-Shifted Carrier PWM Technique for General Cascaded Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, 23,3, 1257-1269.
- Narimani, M., Wu, B., Yaramasu, V., Cheng, Z. ve Zargari, N., R., 2015. Finite Control-Set Model Predictive Control (FCS-MPC) of Nested Neutral Point-Clamped (NNPC) Converter, IEEE Transactions on Power Electronics, 30,12, 7262-7269.
- Ortiz, A., Aredes, M., Rolim, L., G., B., Bueno, E. ve Rodriguez, P., 2008. A New Current Control for the STATCOM based on Secondary Order Generalized Integrators. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Haziran, Yunanistan, Bildiriler Kitabı: 1378-1383.
- Peng, F., Z., Lai, J., S., McKeever, J., W. ve VanCoevering, J., A., 1996. Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation, IEEE Transactions on Industry Applications, 32,5, 1130-1138.
- Peng, F., Z., 2001. A Generalized Multilevel Inverter Topology with Self Voltage Balancing, IEEE Transactions on Industry Applications, 37,2, 611-618.
- Qu, Y., Tan, W. ve Yang, Y., 2007. A Fuzzy Adaptive Detecting Approach of Harmonic Currents for Active Power Filter, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Kasım, Tayland, Bildiriler Kitabı: 1695-1699.
- Rao, P., Crow, M., L. ve Yang, Z., 2000. STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications, IEEE Transaction on Power Delivery, 15,4, 1311-1317.
- Rebeiro, R., S. ve Uddin, M., N., 2012. Performance Analysis of an FLC-based Online Adaptation of both Hysteresis and PI Controllers for IPMSM Drive. IEEE Trans. Ind. Appl., 48,1, 12-19.
- Rodriguez, J. ve Cortes, P., 2012. Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. Wiley-IEEE Press.
- Schauder, C. ve Mehta, H., 1993. Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, IEE Proceedings-C, 140,4, 299-306.

- Sekoguchi, M., Konishi, H., Goto, M., Yokoyama, A. ve Lu, Q., 2002. Nonlinear Optimal Control Applied to STATCOM for Power System Stabilization, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia Pacific, Ekim, Japonya, Bildiriler Kitabı: 342-347.
- Sharaf, A., M. ve Abdelsalam, A., A., 2011. A Novel Facts Based Dynamic Voltage Compensation Scheme for Smart Electric Grid Stabilization and Efficient Utilization, 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Mayıs, Kanada, Bildiriler Kitabı: 42-47.
- Sharaf, A., M. ve Aktaibi, A., A., 2012. A Novel Hybrid Facts Based Renewable Energy Scheme For Village Electricity, International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Temmuz, Trabzon, Bildiriler Kitabı: 1-5.
- Shen, D., Linag, X. ve Yingduo, H., 2000. A Modified Per-Unit STATCOM Model and Analysis of Open Loop Response Time, Proceeding of the IEEE Power Engineering Winter Meeting, Ocak, Singapur, Bildiriler Kitabı: 2624-2629.
- Shukla, A., Ghosh, A. ve Joshi, A., 2011. Hysteresis Modulation of Multilevel Inverters, IEEE Trans. Power Electron., 26,5, 1396-1409.
- Song, B.-M., Kim, J., Lai, J.-S., Seong, K.-C., Kim, H.-J. ve Park, S.-S., 2001. A Multilevel Soft-Switching Inverter with Inductor Coupling, IEEE Transactions on Industry Applications, 37,2, 628-636.
- Sun, J., Czarkowski, D. ve Zabar, Z., 2004. Voltage Flicker Mitigation Using PWM-Based Distribution STATCOM, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Haziran, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 616-621.
- Sundararajan, K., Nachiappan, A. ve Veerapathiran, G., 2014. Model Predictive Current Control of a Five-level Cascaded H-Bridge Inverter with different Sampling Times, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 9,5, 8-18.
- Sundareswaran, K., Nayak, P., S., Durga Venkatesh, C. ve Hariharan, B., 2011. Optimal Placement of FACTS Devices using Probabilistic Particle Swarm Optimization, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Aralık, Hindistan, Bildiriler Kitabı: 53-58.
- Tolbert, L., M., Peng, F., Z., Cunyngham, T. ve Chiasson, J., N., 2002. Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49,5, 1058-1064.
- Venayagamoorthy, G., K., 2011. Innovative Smart Grid Control Technologies, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Temmuz, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 1-5.
- Voraphonpiput, N. ve Chatratana, S., 2005. STATCOM Analysis and Controller Design for Power System Voltage Regulation, Asia and Pacific 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Ağustos, Çin, Bildiriler Kitabı: 1-6.

- Wang, Q., Choi, S., S. ve Haque, M., H., 2006. Transfer Capability of Long Transmission Lines as Affected by Shunt Compensation, International Conference on Power System Technology PowerCon, Ekim, Çin, Bildiriler Kitabı: 1-8.
- Whaley, D., M., Ertasgin, G., Soong, W., L., Ertugrul, N., Darbyshire, J., Dehboeni, H. ve Nayar, C., V., 2006. Investigation of a Low-Cost Grid-Connected Inverter for Small-Scale Wind Turbines Based on a Constant-Current Source PM Generator, 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Kasım, Fransa, Bildiriler Kitabı: 4297-4302.
- Xia, C., Liu, T., Shi, T. ve Song, Z., 2014. A Simplified Finite-Control-Set Model-Predictive Control for Power Converters, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10,2, 991-1002.
- Yang, B., Wu, J., Lu, X. ve He, X., 2008. An Improved DSP-based Control Strategy with Predictive Current Control and Fuzzy Voltage Control for Grid-Connected Voltage Source Inverters, 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Kasım, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 2296-2300.
- Zadeh, L., A., 1965. Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353.
- Zare, F. ve Ledwich, G., 2002. A Hysteresis Current Control for Single-Phase Multilevel Voltage Source Inverters: PLD implementation, IEEE Trans. Power Electron., 17,5, 731-738.
- Zhang, X., P., 2008. A Framework for Operation and Control of Smart Grids with Distributed Generation, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Temmuz, Amerika Birleşik Devletleri, Bildiriler Kitabı: 1-5.

ÖZGEÇMİŞ

14.11.1980 tarihinde Polatlı'da doğdu. Liseyi Polatlı Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2003 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimi tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Aralık 2003'de Giresun Üniversitesi Giresun Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Bu görevine halen devam etmektedir. Evli ve bir çocuğu bulunmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

SCI/SCI-E indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., Five Level Cascaded H-Bridge D-STATCOM using a new Fuzzy and PI Controllers model for Wind Energy Systems, Advances in Electrical and Computer Engineering, 17, 4 (2017) 49-58.
2. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., A Novel Model Predictive-Fuzzy Logic Hybrid Controller Design for D-STATCOM in Wind Energy Distribution Systems, Global NEST Journal, (Kabul edildi).

E-SCI indeksine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., MFLC-PI Controlled Two Level Inverter Based D-STATCOM for Wind Energy Systems, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 8, 2 (2016) 161-168.

Diğer indekslere giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Mengi, O. O., Yanmaz, K. ve Altas, I. H., STATCOM Application with FLC and Voltage Control on the Load in the Hybrid Model of Fuel Cell/Solar Panels System, Mugla Journal of Science and Technology, 3, 1 (2017) 45-50.
2. Yanmaz, K., Mengi, O. O. ve Altas, I. H., Çok Seviyeli H-Köprü Temelli Gerilim Kaynaklı Eviricili STATCOM'un BMD'li Kontrolü ve Karşılaştırmalı Benzetimi, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 6, 14 (2016) 106-123.

3. Yanmaz, K., Mengi, O. O. ve Altas, I. H., Güneş Paneli ve Yakıt Pili Karma Temiz Enerji Sisteminde Beş Seviyeli BMD'li STATCOM, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 6, 14 (2016) 30-44.
4. Yanmaz, K. ve Altas, I. H., Yükler Üzerindeki Reaktif Gücün Bulanık Mantık Denetleyicili Statcom İle Kontrolü, Yenilenebilir Enerji Dergisi, 1, 1 (2009) 75-84.

Yerli/Yabancı hakemli sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Çok Seviyeli STATCOM Cihazının Dolaylı Akım Kontrol Sisteminde PD-PWM Yöntemi, II. International Conference on Advanced Engineering Technologies 2017 (ICADET 2017), 21-23 Eylül 2017, Bayburt, Türkiye, 1513-1514, ISBN: 978-605-9945-17-2.
2. Yanmaz, K., Mengi, O. O. ve Altas, I. H., D-STATCOM Cihazlarının Şebeke Bağlantısındaki Bağlantı Endüktansının Seçimi, II. International Conference on Advanced Engineering Technologies 2017 (ICADET 2017), 21-23 Eylül 2017, Bayburt, Türkiye, 1515-1516, ISBN: 978-605-9945-17-2.
3. Yanmaz, K., Mengi, O. O. ve Altas, I. H., Design and Implementation of a Smart D STATCOM in Small Scale Wind Turbines, International Black Sea Congress on Environmental Sciences 2016 (IBCESS'16), 31 Ağustos-3 Eylül 2016, Giresun, Türkiye, 543-553, ISBN: 978-975-01408-9-1.
4. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., Rüzgar Enerji Sistemlerinde MBMD PI Denetleyicili İki Seviyeli Evirici Temelli D STATCOM Çalışması, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu 2016 (ASYU 2016), 28 Eylül-1 Ekim, 2016 Düzce, Türkiye 144-148, ISBN: 978-605-60595-5-1.
5. Mengi, O. O., Yanmaz, K. ve Altas, I. H., Yakıt Pili ve Güneş Panellerinden Oluşan Karma Sistemde BMD'li STATCOM Uygulaması ve Yük Üzerinde Gerilim Kontrolü, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu 2016 (ASYU 2016), 28 Eylül-1 Ekim, 2016 Düzce, Türkiye 280-283, ISBN: 978-605-60595-5-1.
6. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Sharaf A. M., Application of Fuzzy Reasoning Based Power Filter and Dynamic Voltage Regulator for Single Phase Micro Wind Power Generation Systems, 2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2012), 2-4 Temmuz 2012, Trabzon, Türkiye, 1, 1-5, Doi: 10.1109/INISTA.2012.6247004.

7. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Sharaf A. M., Bir fazlı Mikro Rüzgar Güç Üretim Sistemlerinde Güç Kalitesinin Bulanık Mantık Denetleyicili Filtrelerle Sağlanması, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu 2010 (ASYU 2010), 173-177.
8. Yanmaz, K. ve Altas, I. H., STATCOM için Bulanık Mantık Denetleyici, Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, (ELECO2008), 51-54.
9. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., Çok Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün Bulanık Mantık Denetleyici İle Gerçekleştirilmesi, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu, (ASYU2008), 259-263.
10. Yanmaz, K., Altas, I. H. ve Mengi, O. O., Otomobiller İçin Bulanık Mantık Tabanlı Hız Sabitleyici Bir Sistem, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu, (ASYU2008), 317-320.
11. Yanmaz, K. ve Altas, I. H., Yükler Üzerindeki Reaktif Gücün Bulanık Mantık Denetleyicili Statcom İle Kontrolü, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, (UTES2008), 75-82.