

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

**GÜNEŞ ENERJİSİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE PV-STATCOM'UN**  
**ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Ayşenur OYMAK

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

**OCAK-2021**

## ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Güneş Enerjisi Dağıtım Sistemlerinde PV-STATCOM’un Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

**Ayşenur OYMAK**

**İmza**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GÜNEŞ ENERJİSİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE PV-STATCOM'UN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ayşenur OYMAK

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

XIII+ 84 Sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

Fosil yakıt kaynaklarının gittikçe azaltmakta olması ve çevreye olan zararlı etkilerinden dolayı, son yıllarda yenilenebilir enerji sistemlerine olan ilgi artmıştır. En çok kullanılan yenilenebilir enerji türleri rüzgar, güneş, hidroelektrik ve jeotermal enerji sistemleri tarafından üretilir. Türkiye’de son yıllarda rüzgar enerjisinden sonra en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinde kullanılan STATCOM, son zamanlarda tercih edilen reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kontrolü için sıkça kullanılan bir eleman olma yoluna girmiştir.

Bu çalışmada, bir güneş enerjisi santralinde STATCOM elemanından yararlanarak dağıtım hattında gerilim regülasyonu ve reaktif güç değişimi incelenmiştir. Güneş enerjisi santrali ve STATCOM içeren sistemin, MATLAB ortamında benzetimi yapılmıştır. STATCOM kontrolünde Bulanık Mantık ve PI denetleyici kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, STATCOM’un sistem performansını artırabileceği, gerilim düzenleyici olarak kullanılabilmesi ve reaktif gücü dengeleyebileceği belirlenmiştir. Ayrıca STATCOM’un aktif gücü kararlı bir şekilde sağlayabileceği ve reaktif güç kompanzasyonu için reaktif güç alışverişini oldukça kısa bir sürede gerçekleştirdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, PI Denetleyici, STATCOM, Bulanık Mantık

## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PV-STATCOM IN SOLAR ENERGY DISTRIBUTION SYSTEMS

Ayşenur OYMAK

Inönü University Institute Of Natural Sciences of Electrical And Electronics  
Engineering Department

XIII+84 Page

2021

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

Interest in renewable energy systems has increased in recent years due to the decreasing of fossil fuel resources and their harmful effects on the environment. The most used renewable energy types are produced by wind, solar, hydroelectric, and geothermal energy systems. Solar energy is the most preferred type of energy after wind energy in Turkey. In recent years, many studies on solar energy have been conducted in Turkey. STATCOM, which is used in solar and wind energy systems, has recently become a frequent element for reactive power compensation and voltage control of choice.

In this study, voltage regulation and reactive power change were examined on the distribution line using the STATCOM element in a solar power plant. The system, which includes a solar power plant and STATCOM, was simulated in the MATLAB environment. Fuzzy Logic and PI controller were used in STATCOM control. As a result of the study, it was determined that STATCOM could improve system performance, be used as a voltage regulator, and balance reactive power. It has also been observed that STATCOM can provide active power stably and perform reactive power exchange for reactive power compensation in a fairly short period of time.

Keywords: Solar Energy, PI Controller, STATCOM, Fuzzy Logic

## TEŞEKKÜR

Tez konumun tespitinde ve tez çalışmam esnasında engin bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, çalışmamın her aşamasında yardım ve desteklerini esirgemeyen, beni her zaman cesaretlendiren danışman Hocam Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana destek olan ve beni yönlendiren Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Müh. Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Beşir DANDIL'a, yine F. Ü. Teknoloji Fak. Enerji Sistemleri Müh. Böl. Öğretim Üyesi Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ hocama ve İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Ömer Faruk ÖZGÜVEN hocama Fuzzy Logic konusunda yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni yetiştiren, öğretim hayatımda büyük katkıları olan ve hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

<b>ONUR SÖZÜ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Literatür Özeti .....	3
1.2. Tezin Amacı .....	5
<b>2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ SİSTEMLERİ</b> .....	<b>7</b>
2.1. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı .....	7
2.2. Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi .....	8
2.2.1. İki Diyotlu PV Hücre Elektriksel Eşdeğer Devre Modeli.....	10
2.3. Akım Gerilim Güç Özellikleri .....	10
2.4. PV Hücre Karakteristiği.....	12
<b>3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU</b> .....	<b>13</b>
3.1. Kompanzasyon için Gerekli Kondansatör Gücünün Hesaplanması ....	14
3.2. Dinamik Faz Kaydırıcılar .....	15
3.3. Statik Faz Kaydırıcı .....	15
3.4. Şönt Kompanzasyonu .....	15
3.5. Seri Kompanzasyon .....	16
3.6. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR).....	18
3.7. Statik VAR kompanzatör (SVC) .....	19
<b>4. STATCOM</b> .....	<b>21</b>
4.1. STATCOM'un Matematiksel Modeli.....	23
4.2. STATCOM'da Kullanılan Evirici Yapılar .....	25
4.2.1. İki Seviyeli Eviriciler .....	25
4.2.2. Çok Seviyeli Eviriciler .....	27

4.2.2.1. Diyot Kenetlemeli Eviriciler .....	28
4.2.2.2. Kapasitör Kenetlemeli Evirici .....	29
4.2.3. Çok Seviyeli Kaskat Evirici ( ÇSKE) .....	31
4.2.3.1. Kaskad H-köprü Çok Seviyeli Evirici .....	31
4.2.3.2. Modüler Çok Seviyeli Eviriciler (MÇSE).....	33
4.3. Anahtarlama Yöntemleri.....	34
4.3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu .....	34
4.3.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu .....	34
4.3.3. Uzak Vektör PWM.....	36
4.4. Statcom Denetim Yöntemleri .....	37
4.4.1. Faz Açık Denetim Yöntemi .....	38
4.4.2. Doğrudan Akım Denetim Yöntemi.....	39
4.4.3. Sabit DA-Hat Gerilim Yöntemi .....	40
4.4.4. Dolaylı Akım Denetim Yöntemi.....	41
4.4.5. Bulanık Mantık Kontrolörü.....	43
4.4.5.1. Eski Dönemde Mantık.....	43
4.4.5.2. Modern Dönemde Mantık .....	44
4.4.5.3. Bulanık Mantık Dönemi.....	44
4.4.5.4. Bulanık Mantığın Avantajları.....	45
4.4.6. Bulanık Küme .....	45
4.4.6.1. Üyelik Fonksiyonları .....	45
4.4.6.2. Küme İşlemleri .....	47
4.4.6.3. Bulanık Mantık Kural Tabanı.....	48
4.4.7. Bulanık Mantık Kuramı .....	48
4.4.7.1. Mamdani Çıkarım Yöntemi.....	49
4.4.7.2 Takagi-Sugeno Yöntemi.....	51
4.4.7.3. Larsen Çıkarım Yöntemi .....	51
<b>5. SİSTEM MODELLEMESİ .....</b>	<b>54</b>
5.1. LCL Filtre Hesabı .....	57
5.2. PI Kontrolör ile Yapılan Sistem Grafikleri.....	59
5.3. FUZZY ile Kontrol Sistemi ve Aşamaları .....	65
5.3.1. Bulanık Mantık Kontrolü ve Grafikler.....	71

<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>76</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>78</b>
<b>YAYINLAR.....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>84</b>





## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	PV hücrenin çalışma tekniği.....	8
Şekil 2.2.	PV hücrenin eşdeğer devresi .....	8
Şekil 2.3.	İki diyotlu PV hücre elektriksel eşdeğer devre modeli.....	10
Şekil 2.4.	PV hücre akım-gerilim karakteristiği ve PV hücrenin güç gerilim karakteristiği.....	12
Şekil 3.1.	Şönt kompanzasyonu devre şeması ve fazör diyagram .....	16
Şekil 3.2.	Bir gerilim kaynağıyla seri kompanzasyon şeması ve fazör diyagramı [27]	17
Şekil 3.3.	Tristör kontrollü reaktör devre şeması.....	18
Şekil 3.4.	Statik VAR kompanzator şeması.....	19
Şekil 4.1.	STATCOM devre yapısı.....	21
Şekil 4.2.	STATCOM'un sürekli durumda V–I karakteristiği. ....	22
Şekil 4.3.	STATCOM'un eşdeğer devresi .....	23
Şekil 4.4.	İki seviyeli evirici yapısı .....	26
Şekil 4.5.	PWM denetimli iki seviyeli evirici yapısı .....	26
Şekil 4.6.	a) İki seviyeli evirici, b) Üç seviyeli evirici, c) m seviyeli eviricinin bir fazına ait devre .....	27
Şekil 4.7.	Üç-seviyeli diyot kenetlemeli evirici tek hat devre şeması .....	29
Şekil 4.8.	Üç seviyeli kapasitör kenetlemeli evirici devre şeması.....	30
Şekil 4.9.	Kaskad H-köprü çok seviyeli evirici .....	32
Şekil 4.10.	Beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısı.....	32
Şekil 4.11.	Modüler çok seviyeli dönüştürücü yapısı.....	33
Şekil 4.12.	Sinüs darbe genişlik modülasyonu .....	35
Şekil 4.13.	Faz açısı denetim blog diyagramı .....	39
Şekil 4.14.	Doğrudan akım denetim bloğu .....	40
Şekil 4.15.	Sabit DA-Hat gerilim blog diyagramı .....	41
Şekil 4.16.	Dolaylı akım denetim yöntemi .....	43
Şekil 4.17.	Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla minimum ve maksimumunu gösteren Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi .....	50
Şekil 4.18.	Larsen Çıkarım yöntemi başlangıç gösterimi.....	52
Şekil 4.19.	Fuzzy toplamsal denetleme modeli .....	53
Şekil 5.1.	PV sistemin MATLAB'da modellenmesi .....	54
Şekil 5.2.	PV array ayarları .....	55
Şekil 5.3.	STATCOM kontrol kısmı.....	56

<b>Şekil 5.4.</b>	MATLAB/SIMULINK endüktans bloğu .....	58
<b>Şekil 5.5.</b>	MATLAB/SIMULINK kapasitans bloğu .....	59
<b>Şekil 5.6.</b>	Sistemin gerilim, akım ve güç değişimleri .....	60
<b>Şekil 5.7.</b>	Referans gücün değiştirilmesi durumundaki değişim .....	60
<b>Şekil 5.8.</b>	Sistemin parlaklık oranının değişimi durumunda gözlenen değişim .....	61
<b>Şekil 5.9.</b>	RL yükü eklendiğinde MATLAB modeli .....	62
<b>Şekil 5.10.</b>	RL yükü eklendiğinde görülen gerilim, akım ve güç değişimleri .....	62
<b>Şekil 5.11.</b>	Frekans değişikliğinde elde edilen gerilim, akım, güç değerleri gösterimi ..	63
<b>Şekil 5.12</b>	$\cos(\theta)$ 'nin değişiminde elde edilen 1.si $V_{abc}$ ve 2.si $I_{abc}$ değişimi .....	64
<b>Şekil 5.13.</b>	$P_{error}$ giriş üyelik fonksiyonu .....	65
<b>Şekil 5.14.</b>	$dP_{error}/dt$ değişiminin giriş üyelik fonksiyonu .....	66
<b>Şekil 5.15.</b>	$P_{error}$ 'un çıkış üyelik fonksiyonu .....	66
<b>Şekil 5.16.</b>	Kural tablosunun MATLAB'daki durumu .....	68
<b>Şekil 5.17.</b>	$P_{error}$ için bulanık mantık yüzeysel görünümü .....	68
<b>Şekil 5.18.</b>	$Q_{error}$ üyelik fonksiyonu .....	69
<b>Şekil 5.19.</b>	$dQ_{error}$ : $Q_{error}$ 'un değişiminin üyelik fonksiyonu değişimi .....	69
<b>Şekil 5.20.</b>	$Q_{error}$ çıkış üyelik fonksiyonu .....	70
<b>Şekil 5.21.</b>	$Q_{error}$ için oluşturulan fuzzy bulanık mantığın yüzeysel görünümü .....	71
<b>Şekil 5.22.</b>	Bulanık mantık kontrollörün yapısı .....	72
<b>Şekil 5.23.</b>	Bulanık mantık kontrolörlü sistemin 1. grafik $V_{abc}$ , 1. grafik $I_{abc}$ ve 3. grafik aktif güç ve 4. grafik reaktif güç değişimi .....	73
<b>Şekil 5.24.</b>	R ve RL yükü eklendiğinde oluşan 1. grafik $V_{abc}$ , 2. grafik $I_{abc}$ , 3. grafik aktif güç 4. grafik reaktif güç değişimleri .....	74
<b>Şekil 5.25.</b>	Bulanık mantık kontrolörü ile yapılan sistemde frekans değişikliğinde 1.si $V_{abc}$ , 2.si $I_{abc}$ , 3.sü aktif güç ve 4. ise reaktif güç değişimi .....	74
<b>Şekil 5.26.</b>	Bulanık mantık kontrolörü ile $\cos(\theta)$ değişimi sonucunda elde edilen 1. grafik $V_{abc}$ , 2. Grafik $I_{abc}$ ve 3.sü aktif gücü 4.sü reaktif güç değişimi .....	75

## TABLULAR DİZİNİ

**Tablo 1.** Perror/dPerror üyelik girdilerinin çıkış kural tablosu.....67

**Tablo 2.** Qerror/dQerror değişiminin kural tablosu .....70



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$I_{ph}$ :	Güneş hücresinin akımı
$I_s$ :	Diyotun ters doyma akımı
$k$ :	Boltzmann sabiti
$T$ :	Birleşme sıcaklığı
$N_s$ :	Hücre katsayısı
$P_{pv}$ :	Güneş pili çıkış gücü
$S$ :	Görünür güç
$Q$ :	Reaktif güç
$I_q$ :	Yük akımının reaktif bileşeni
$I_d$ :	Yük akımının aktif bileşeni
$B$ :	Süseptans değeri
$I_d$ :	Yük akımının aktif bileşeni
$\sigma$ :	Tetikleme açısı
$X$ :	Bağlantı transformatörün kaçak reaktansı
$V_0$ :	STATCOM'un çıkış gerilimi
$V_{COMP}$ :	Kompanze gerilimi
$C_a$ :	Kenetleme kapasitörü
$m_a$ :	Modülasyon indeksi
$\theta$ :	Faz kayma açısı
$V_s$ :	Şebeke geriliminin etkin değeri
$V_{dc}$ :	Evirici girişine bağlı DC gerilim
$i_d'$ :	Güç sisteminden çekilen d bileşeni referans değeri
$i_q'$ :	Güç sisteminden çekilen q bileşeni referans değeri
$P_{min}$ :	Minimum çekilen aktif güç

$P_{ref}$ :	Referans aktif güç miktarı
$f$ :	Frekans
$L_f$ :	Filtre endüktansı
$R_f$ :	Filtre direnci
$C_b$ :	Baz kapasite
$Z_b$ :	Baz empedans
$X_L$ :	Endüktör
$X_c$ :	Kapasitör
$I_h$ :	Hat akımı
$V_h$ :	Hat gerilimi

### **Kısaltmalar**

PV	: Fotovoltaik Güneş Hücresi
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru akım
SVC	: Statik VAR kompanzatör
FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
GBD	: Gerilim Bölücü Devre
IGBT	: İzoleli Kapı Bipolar Transistör
IGCT	: Kapı Devresi ile Söndürülen Tristör
PWM	: Sinyal Genişlik Modülasyonu
FKD	: Faz Kitleme Devresi
THD	: Toplam Harmonik Bozulma
TOV	: Geçici Aşırı Gerilim
POD	: Güç Salınım Sönümlenme

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artışı, küreselleşme ve sanayileşmenin artmasıyla enerjinin çok hızlı bir şekilde tüketildiği ve bu tüketim sonucunda da enerji kaynaklarında büyük oranda azalmalar olduğu görülmektedir. Enerji, zorunlu bir ihtiyaç olup ülkenin kalkınmasını ve sosyal durumları hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. Enerji kaynakları kullanımına göre; yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak sınıflandırılır [1].

Günümüzde elektrik enerjisi üretimi genellikle kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlarından elde edilen ısı enerjisinden yararlanarak gerçekleştirilmektedir. Fosil yakıtların atmosfere saldığı SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> gibi zararlı bileşenler; sera etkisi yaratarak küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi etkilerle çevreye zarar vermektedir [2]. Ayrıca yenilenemez enerji kaynaklarının zamanla tükenmesi sebebiyle, yeni enerji kaynakları incelenerek, bu enerji ihtiyacını karşılamak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür çalışmaların içerisinde, yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar artmıştır [3]. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye zarar vermemesi ve sürekli bir enerji sağlamasından dolayı giderek kullanımını artan bir enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını sıralayacak olursak;

- Güneş Enerjisi
- Rüzgar Enerjisi
- Jeotermal Enerji
- Hidrolik Enerji
- Biyokütle Enerjisi
- Hidrojen Enerjisi
- Gel-git Enerjisi
- Okyanus Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok kullanılanları hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjisidir [4]. Birçok kullanım alanı bulunan güneş enerjisi genellikle ısıtma ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Güneş ışığından elektrik enerjisi üretmeyi sağlayan fotovoltaik sistem, güneşin yaydığı ve yeryüzüne gelen ışınların

değerlendirilmesini sağlar. Fotovoltaik sistemler ile ilgili olarak güneş görme süresi ve gün ışığı miktarı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması ve bu sistemi verimli bir şekilde kullanabilmesi için güneşe maruz kalması gerekmektedir [5]. Güneş ışığından gelen ışınların elektrik enerjisine dönüşümünde doğrudan DC gerilim olarak ürettiğinden, şebekeye AC gerilim olarak aktarımı için PV inverter gerekmektedir. PV inverterlerin temel işlevi, PV dizisinin maksimum çıkışını takip etmek ve şebekeye minimum enerji tüketimi ve maksimum güç kalitesi sağlamaktır [6].

Bir dağıtım sisteminde aşırı gerilim, geçici gerilim ve harmonik bozulmalar gibi olumsuz durumlar görülebilmektedir. Gerilim bozulması şebekede problemlere sebep olmaktadır. Geleneksel olarak şönt kapasitör yuvaları (SC-Super Capacitor), yük kademe değiştiricileri (OLTC- On-Load Tap Changers) ve adım tipi gerilim düzenleyicileri (SVR-Step-type Voltage Regulator) dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü için kullanılır. Bu cihazların teorik çalışması tek yönlü güç akışı ve yük değişimlerine dayanmaktadır. Güneş santrallerinde bu cihazlar ters güç akışına sebep olduğundan, geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle Statik senkron kompanzator (STATCOM- Static Synchronous Compensator) gibi esnek iletim sistem (FACTS- Flexible Alternating Current Transmission Systems) cihazlarıyla, güneş santrallerinin bağlı olduğu besleyicide reaktif gücün dinamik olarak değiştirilmesiyle kontrol edilebilir [7]. STATCOM, güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve bir DC enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bir inverter bağlanarak yapılan FACTS kontrolörüdür [8]. Bağlanan üç fazlı inverterler: Metal Oksitli Yarı İletken Alan Etkili Transistörler (MOSFET) veya İzoleli Kapı Bipolar Transistörleri (IGBT) ve bu inverter için DC gerilimi sağlayan STATCOM; gerilim bozulmasını, geçici aşırı gerilimi (TOV- Temporary Overvoltage) kontrol ederek ve güç faktörü düzeltmesini sağlayarak dağıtım performansını artırabilir. STATCOM, reaktif güç alışverişinde kullanılan bir cihazdır. PV sistem ise aktif güç üretir. PV sistem ile STATCOM'un birleşimi olan PV-STATCOM ile sistemin hem aktif hem de reaktif güç alışverişi sağlanmış olur [7].

## 1.1. Literatür Özeti

Tezin konusu kapsamında literatür özeti: fotovoltaik güneş sisteminde invertere bağlı olan STATCOM'un sistemin verimini, güç faktörünü, reaktif güç kontrolünü ve gerilim kontrolü gibi kontrollerin yapıldığı benzer çalışmalar son zamanlarda çok tercih edilen bir araştırma alanı olmuştur.

Varma ve Maleki [9] çalışmalarında, iletim sistemlerinde güç salınımı sönümleme (POD-Power Oscillation Damping) için PV-STATCOM ile güneş sisteminin yeni bir kontrolü sunulmuştur. Önerilen kontrolde, bir sistem arızası nedeniyle elektrik salınımları algılandığında, güneş enerjisi santralının gerçek elektrik üretim fonksiyonunu çok kısa bir süre için durdurabileceğini ve tüm inverter kapasitesinin güç salınım sönümlemesi için bir STATCOM olarak çalışması ile sağlanabileceği görülmüştür. EMTDC / PSCAD da yapılan çizimde önerilen kontrolün, hem yerel atalet hem de bölgeler arası salınım modları gösteren sistemlerde, 7/24 bazında güç aktarım kapasitesinde önemli bir artış sağladığı gösterilmiştir.

Li ve diğ. [10] yaptıkları çalışmada, yerel yüklerin reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmek ve DC link gerilimini dengelemek için gerilim kaynağı dönüştürücüsünün (VSC-Voltage Source Converter) kontrol stratejisi (D-STATCOM) kullanılmıştır. Bulanık-PI kullanılarak, DC link geriliminin daha yumuşak ve sabit hale getirildiği gözlenmiştir. Yaptıkları benzetimler sonucunda, D-STATCOM'lu şebekeye bağlı PV sisteminin yerel yükleri reaktif gücü dengeleyebileceğini, aktif gücü kararlı bir şekilde verebileceğini ve şebekeye bağlı gerilimi sabit tutabildiği gösterilmiştir.

Rode ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada, iletim hattının gerilim kararlılığını geri kazanan ortak bağlantı noktasında, gerilimin düzenlenmesi için PV-STATCOM olarak bilinen yeni büyük ölçekli fotovoltaik güneş enerjisi santrali inverter yaklaşımı sunulmuştur. Sunulan yaklaşım, güneş PV tesisi gündüz üreteç olarak çalışılmış ve şebekede gerçek güç sağlanmıştır. Akşam saatlerinde ve gece saatlerinde güneş santrali inverteri şönt kompanzasyonu sağlamış ve bara gerilimini ayarlamak için reaktif güç değişimi kontrol edilerek gerilim regülasyonu için kapalı



devre kontrol şemasının benzetim sonuçları PV-STATCOM konseptinde doğrulanmıştır.

Siavashi, yaptığı çalışmada [7] PV inverterin yeni bir kontrolü için yeni bir sistem sunulmuştur. Çalışmada STATCOM, kısmi STATCOM ve tam STATCOM olarak çalıştırılmıştır. Gerilim regülasyonu, geçici aşırı gerilim azaltma, güç faktörü düzeltilmesi ve reaktif güç kontrolü hedeflenmiş ve bu çalışmalar simülasyon ve uygulama şeklinde gösterilmiştir.

Varma ve Nagarajan'ın yaptıkları çalışmada [12], dinamik reaktif güç kompanzasyonu sağlamak amacıyla mevcut güneş panellerindeki inverterin STATCOM olarak kullanılması için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir.

Tharani ve Dahiya [13] tarafından yapılan çalışmada, beş farklı PV modülü seti ile STATCOM kullanılmış ve gerekli simülasyonlar simulink yazılımında yapılmıştır. Şebekeye bağlı bir STATCOM ile karşılaştırıldığında reaktif güç talebinin de yükü ve ana besleme kaynaklarını azaltmaya yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. Güneş panelinde DC-DC dönüştürücünün ortadan kaldırılması neticesinde, sistemin maliyetinde azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde STATCOM ile ilgili yapılan diğer çalışmalar özetlenecek olursa; Ermiş ve diğ. [14] yaptıkları çalışmada, reaktif güç kompanzasyonu için iki seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) ve Akım Kaynaklı Eviriciden (AKE) yararlanarak 1 KV düzeyinde DSTATCOM sistemleri geliştirilmiştir.

Saeedifard ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada, üç seviyeli bir diyot kaynaklı evirici (DKE) kullanılarak STATCOM'a ilişkin yük değişimi, reaktif güç değişimi gibi sistem durumlarında PSCAD yazılımı ortamında benzetimler yapılmış ve sistemdeki bozulmalara rağmen, STATCOM'un reaktif gücü hızlı bir şekilde dengeleyeceği ifade edilmiştir.

Ertay ve diğ. [16] tarafından yapılan çalışmada, bir enerji iletim sistemindeki dağıtım hattında, yük değişimleri durumunda STATCOM ile hat geriliminin değişimleri gözlenmiştir. Benzetim sonuçlarında; STATCOM'un bara gerilimini istenen değerlerde tutulabileceği, yük değişimlerinde hızlı bir şekilde reaktif güç kompanzasyonu sağlandığı ve sistemin gerilim kararlılığını iyileştirebildiği görülmüştür.

Awashti ve Hucheche [17] tarafından yapılan çalışmada, DSTATCOM'un reaktif güç kompanzasyonu için PI kontrolörü kullanılarak MATLAB simulinkte modellenmesi yapılmıştır. DSTATCOM'un hat üzerinde reaktif güç telafisi, gerilim dengelemesi ve güç kayıplarını azaltmak için kullanılabileceği görülmüştür.

Kara [18] yaptığı çalışmada, bir iletim hattındaki güç akışının kontrolü için, MATLAB/SIMULINK kullanılarak evirici tabanlı FACTS aygıtı olan STATCOM'un bilgisayar benzetimini yapmıştır. STATCOM'un denetiminde sabit parametrelili PI denetleyici ve Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılmıştır. YSA'nın öğrenme ve sınıflandırma metotlarından yararlanılarak PI denetleyicinin tasarımı kolaylaştırılmış ve PI parametrelerinin otomatik olarak ayarlanması sağlanmıştır.

Çakmak [19], dağıtım şebekelerinde D-STATCOM kullanarak gerilim kalitesini artırılmasına yönelik çalışmada bulunmuştur. D-STATCOM'un denetim algoritması için PI ve Paralel Rezonans (PR) denetleyicileri kullanılmış, iki model PSCAD/EMTDC benzetim programında karşılaştırması yapılmıştır. D-STATCOM'un hem PI hem de PR yöntemi ile sistemde arıza veya kısa süreli gerilim düşümlerine çok kısa sürede cevap verdiği ve bara geriliminin anma değerlerine çıkması sağlanmıştır.

## **1.2. Tezin Amacı**

İletim ve dağıtım sistemlerinin denetlenebilirliği ve sistemin reaktif güç kapasitesinin artırılması ile ilgili çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinde kayıpları azaltmak, iletilebilir gücü arttırmak ve hattaki endüktans ve kapasitenin etkisini azaltmak için reaktif gücün ve gerilimin kontrolü gerekmektedir. Bu da hattın belli noktalarında denetleyiciler kullanılarak kompanzasyon yapılması ile gerçekleştirilmektedir. Kompanzasyon ile bara gerilimi ve bara reaktif gücü denetlenerek, kararlılığı artıracağı gözlemlenecektir. Son zamanlarda kompanzasyon yapımında yarı iletken tabanlı güç elektroniği kullanılmaktadır. Sistem için kompanzasyon yapılırken, hızlı cevap verebilmesi önemli bir konudur. Bu nedenle yarı iletken tabanlı güç elektroniği elemanlarından STATCOM üzerinde durulmuştur.

Bu tez çalışmasında, bir fotovoltaik sistemin aktif güç ve reaktif güç değerlerinin STATCOM kontrolü için PI ve bulanık mantık kontrolörüyle eğitimi sağlanmış, MATLAB/SİMULİNK'te benzetimi yapılarak sonuçlar gözlemlenmiş ve çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Tezin amacı STATCOM'un sistem performansını ne oranda artırabileceği, gerilimi düzenleyebilme kabiliyeti, reaktif gücü dengeleyebilme ve aktif gücü karalı bir şekilde vermesi yönünden çeşitli özelliklerinin incelenmesidir.

Güneş sisteminde, sistem performansının artırılabilmesi amacıyla sisteme giren yükleri azaltmak için yeni yöntemler araştırılmıştır. Sisteme STATCOM'un bağlanmasıyla sistemde reaktif güç kontrolü yapılarak gerilim kontrolü sağlanabileceği ve sistemin daha iyi çalışmasının mümkün olabildiği görülmüştür.

## 2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ SİSTEMLERİ

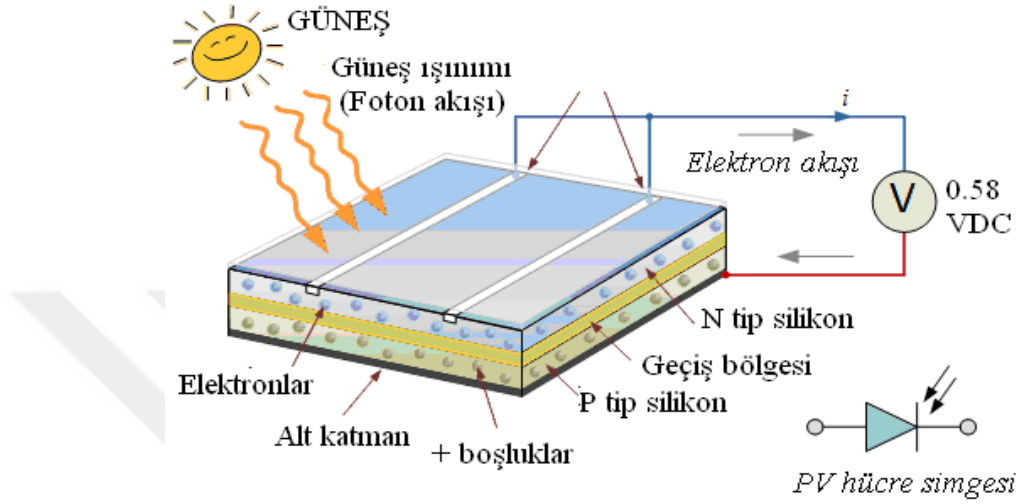
Dünya'nın en önemli enerji kaynağı güneştir. Doğal enerji kaynaklarının pek çoğunun kaynağı olan güneş enerjisinden ısıtma ve elektrik elde etme gibi amaçlarda yararlanılmaktadır. Güneş enerjisi çevreci, temiz bir enerji kaynağı olduğu için fosil enerji kaynaklarına ek olabilecek önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Türkiye bulunduğu coğrafik konum gereği güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça iyi durumdadır [3].

Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen veriler esas alınarak güneşlenme süresi ve güneş ışınım şiddeti verileri kullanılarak Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen çalışmalara göre, Türkiye'de yıllık ortalama güneş ışınımı 1311 kWh/m<sup>2</sup> -yıl (günlük toplam 3.6 kWh/m<sup>2</sup>) değerindedir [1]

### 2.1. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı

Güneşten elektrik elde etmek için, yarı iletkenlerde fotovoltaik dönüşümü gerçekleştirebilmek amacıyla p-n jonksiyonunun eklem bölgesine foton (güneş ışını) düşmesi gerekmektedir. Güneş ışınlarındaki fotonların, yarı iletken malzemelerin yüzeyine çarpması ile elektronların serbest kalması sonucunda enerji ortaya çıkar [4]. Fotonların fotovoltaik hücre üzerine çarpmasıyla bir kısmı hücre tarafından emilir, bir kısmı yansıtılır, geriye kalanı hücre içerisinden geçer. Emilen fotonlar elektrik üretmektedir. Fotovoltaik sistemlerin çoğunda, güneşten gelen ışınlar toplanır. Daha sonra toplanan enerji kullanılmak üzere kimyasal enerjiye dönüştürülerek akülerde depolanabilir [5]. Güneş pilleri; silisyum, germanyum gibi normal şartlarda yalıtkan durumdayken güneşten gelen ışık miktarı etkisiyle elektrik aldığı anda iletkenlik özelliği gösteren bir yarı iletken malzemeden üretilmektedir. PV hücre yapımı herhangi bir yarı iletken P-tipi ve N-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilmektedir. Oluşturulan bu P-tipi ve N-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki P-N eklemi kesiminde bir elektrik alanı oluşturulur. Yarı iletken eklem bölgesinin güneş pili olarak çalışabilmesi için eklem bölgesinde fotovoltaik

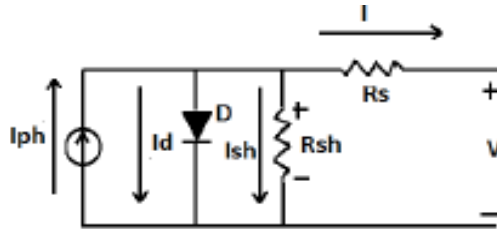
dönüşümün sağlanması gerekmektedir. Bu dönüşüm önce eklem bölgesine güneş ışığı düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulması. daha sonra bu çiftlerin meydana gelen elektrik alan etkisi ile ayrılması olarak iki aşamada gerçekleşmektedir [1].



Şekil 2.1. PV hücrenin çalışma tekniği [5]

## 2.2. Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Güneş pilleri, p-n ekleminden oluşan ve p-n ışığa maruz kalan bir yarı iletken devre elemanıdır [20]. PV hücrenin şekli, Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu devrede güneş hücresi akımına paralel bir diyot ve paralel şekilde  $R_{sh}$  direncine seri bağlı bir  $R_s$  direncinden oluşmaktadır.



Şekil 2.2. PV hücrenin eşdeğer devresi [20]

Paralel direnç, PV hücrenin açık devre gerilimini; seri direnç, kısa devre akımını ve dolum faktörünü azaltan bir elemandır [21].

Kirchhoff'un akımlar kanunu devreye uygulanırsa:

$$I_{pil} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{pil} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{N_s k T}} - 1 \right) - \left( \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

bulunur.

Denklem 2'deki eşitliğin sıcaklıkla bağlantısı;

$$I_{pil} = I_{ph} (1 + C_0 (T - 300)) - I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{N_s k T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (3)$$

şeklinde olup, burada;

$$I_{ph} = I_r * \frac{I_{sr}}{I_{r0}} \quad (4)$$

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{V+R_s I}{N_s k T}} - 1 \right) \quad (5)$$

$$I_s = I_{sc} \left( e^{\frac{V_{oc}}{n * V_t}} - 1 \right) \quad (6)$$

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (7)$$

olarak ifade edilir.

Bu denklemde

$I_{ph}$ : güneş hücresi akımını

$I_s$ : diyotun ters doyma akımını,

$V$ : diyot üzerindeki gerilimi,

$k$ : boltzmann sabiti,

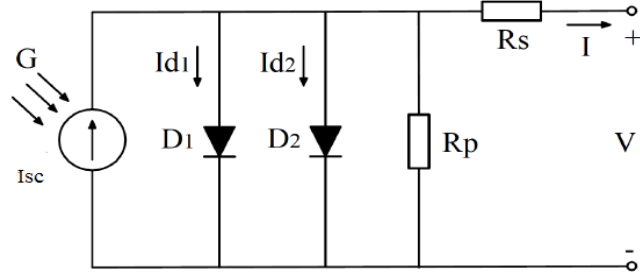
$T$ : birleşme sıcaklığı

$N_s$ : hücre katsayısını ifade etmektedir.

Diyot akımı, p-n eklemlerinden geçen toplam akım olup matematiksel olarak fotonlar, elektronlar ve boşlukların oluşturduğu akımların toplamıdır [21].

### 2.2.1. İki Diyotlu PV Hücre Elektriksel Eşdeğer Devre Modeli

İki diyotlu elektriksel eşdeğer devre modelinde, ideal tek diyotlu eşdeğer devre modellerinde ikinci bir diyot kullanılmaktadır. Bu modellerde yerleştirilen ikinci diyotla, diyot faktörünün alabileceği değer aralığını genişletmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 İki diyotlu PV hücre elektriksel eşdeğer devre modeli [1]

İki diyotlu PV hücre elektriksel eş değer devre modelinde Kirchhoff akım yasası uygulandığında;

$$I = I_{sc} - I_{D_1} - I_{D_2} - I_p \quad (8)$$

eşitliği elde edilir.  $I_{D_1}$ ,  $I_{D_2}$  diyot akımları ve  $I_p$  akım denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$I = I_{sc} - I_{D_1} \left( \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) - I_{D_2} \left( \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (9)$$

### 2.3. Akım Gerilim Güç Özellikleri

PV hücreye ait akım gerilim özellikleri üç ayrı yöntem ile belirlenmektedir:

1. Sabit bir ışık şiddeti altında, değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumunun kontrolü ile PV hücrenin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akım ölçülür.
2. PV hücre karanlıkta, bir dış DC besleme kaynağı yardımı ile diyot gibi çalıştırılarak PV hücrenin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akım ölçülür.
3. Şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağının aydınlatılması altında  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerleri ölçülerek akım-gerilim özellikleri belirlenir [6].

$V_{oc}$ : Açık devre gerilimidir. Bir PV hücrenin açık devre gerilimi, hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda ölçülen gerilimdir.

$I_{sc}$ : Kısa devre akımıdır. Bir PV hücrenin kısa devre akımı, hücreden geçen sıfır gerilimi ve aydınlatma altındaki durumdur.

Dolgu Faktörü (FF): Bir PV hücrenin maksimum çıkış gücünü, açık devre gerilimini ve kısa devre akımının değişimine bağlı olarak değişkenliği gösteren bir tanımlamadır:

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\gamma \times I_s \times A_c}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (10)$$

Dolgu faktörünün değeri, PV hücrenin idealliğini göstermektedir. İdeal bir PV hücrede,  $FF = 1$ 'dir. Bu nedenle, herhangi bir PV hücrede dolgu faktörünün 1'e yakın olması istenir. Dolgu faktörünün büyük olması için seri direncin ( $R_s$ ), diyotun ideal olma faktörünün ( $A_o$ ), ters doyum akım yoğunluğunun ( $J_o$ ) ve sıcaklığın ( $T$ ) küçük; istenmeyen gerilim aralığı ( $E_g$ ) ve şönt direncin ( $R_{sh}$ ) büyük olması gerekir. Dolgu faktörü, hücrelerin seri ve şönt direnç değerlerinden ve diyot kayıplarından doğrudan etkilenir. Şönt direnç ( $R_{sh}$ ) artırılarak ve seri direnç ( $R_s$ ) azaltılarak, dolgu faktörü yükseltilebilir. Bu durumda, hücre çıkış gücü en yüksek noktaya getirilerek yüksek bir verim elde edilir.

**Maksimum Güç Noktası:** Bir PV hücre, geniş bir gerilim ( $V$ ) ve akım ( $I$ ) aralığında çalışabilir. Maksimum güç noktası, sürekli olarak ışınım alan bir PV hücredeki direnç yükünü sıfırdan maksimum değere kadar kademeli artırılarak belirlenir. Maksimum güç noktasında  $V \times I$  değeri yüksek olacaktır. Bu noktada, PV hücre bulunduğu ışınım seviyesinde en yüksek elektrik üretir [6].



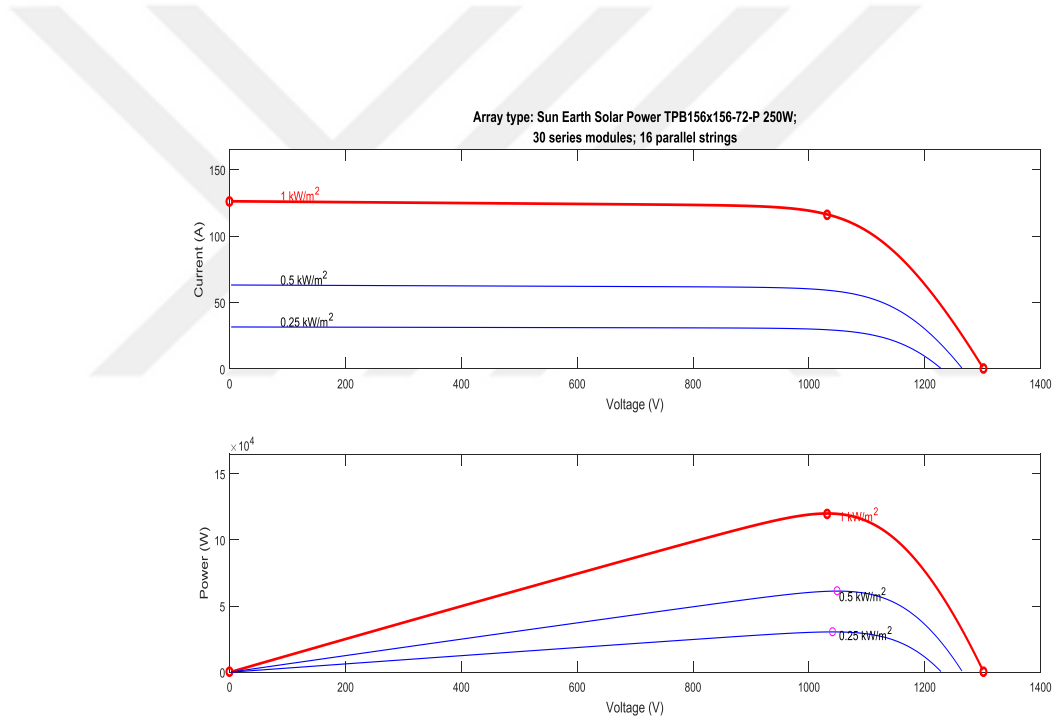
## 2.4. PV Hücre Karakteristiği

PV hücre karakteristiğini ışınım, sıcaklık, rüzgâr hızı, nem vb. çevresel şartları etkilemektedir. Ancak hücre karakteristiğini etkileyen en önemli iki temel faktör ışınım ve sıcaklıktır [22]. Güneş pili hücrelerinin gerilimi ile yük akımı arasındaki ilişki hücrenin I-V karakteristiğini vermektedir.

PV panelin üretici güç

$$P_{PV} = V_{PV} * I_{PV} \quad (11)$$

olduğundan PV hücrenin güç-gerilim eğrisi Şekil 2.4'deki gibi olmaktadır.



Şekil 2.4. PV hücre akım-gerilim karakteristiği ve PV hücrenin güç gerilim karakteristiği

### 3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

Elektrik dağıtım sistemlerinde, bağlanan cihazların büyük bir kısmı şebekeden aktif güç yanında reaktif güç de çekerler. Bu reaktif güç, hattı faydalı bir etki oluşturmadan gereksiz yere meşgul etmektedir [23]. Ancak, diğer taraftan, elektrik dağıtım sistemlerinde, sistemin ihtiyacını karşılamak için aktif gücün yanında reaktif güce de ihtiyaç duyulmaktadır. Reaktif güç, ihtiyaç duyulan sistemlerde üretilir. Çoğunlukla, tüketicilerin normal şebekeden çekilen endüktif reaktif güce karşılık, kapasitif güç vermesi ile reaktif gücün aynı seviyelerde kalmasına reaktif güç kompanzasyonu denir. Ayrıca reaktif güç kompanzasyonu ile güç faktörü de ayarlanabilir. Güç faktörü  $\cos\phi=1$ 'e yaklaştırılır. Bu değer 1'e yaklaştırılma sebebi, reaktif gücü kontrol altına almak ve güç sistemi elemanlarını fazla yükten kurtarmaktır [24]. Dağıtım sisteminde yük kompanze edilmediğinde, yükte ani reaktif güç değişimleri meydana gelir. Bu değişim sonucunda gerilimde değişimler olmaktadır. Gerilimdeki bu dalgalanmalar, bağlı olduğu diğer noktalarda da arızalara sebep olmakta ve tüketiciyi olumsuz etkilemektedir. Güç katsayısının azalması, enerji kayıplarının olması, verimin düşmesi ve kabloların aşırı ısınması gibi olumsuzluklara neden olmaktadır [25]. Kompanzasyonun amacı ise bu değişimleri minimum düzeye indirmektir [24]. Reaktif güç kompanzasyonu ile güç faktörü düzeltilir. Bu sayede kayıplar azalırken, sistem elemanlarının kullanım süresi artmış ve maliyetleri azalmış olur. Bu nedenle her işletme, şebekeden çektiği reaktif gücü kontrol ederek güç faktörünü belli aralıklarda tutmalıdır. Bunu sağlamak için reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır. Kompanzasyon yapılan tesiste elde edilen avantajları şu şekilde sıralayabiliriz:

Reaktif güç kompanzasyonunun tüketici yönünden yararları [25]:

- Kompanzasyon tesisine sahip bir işletmenin ödemeleri azalmaktadır.
- Besleme transformatörünün ve tesisin kapasitesi ile verimi yükselmektedir
- Güç katsayısı ayarlaması yapıldığından dolayı tüketici şebekeden çok daha az reaktif güç çeker ve daha az ödeme yapar.

Reaktif güç kompanzasyonunun şebeke yönünden yararları:

- Şebekenin güç potansiyeli artar, ısı kayıpları azalır ve gerilim düşümü azalmaktadır.
- İletim hatlarının geçici durum kararlılığı düzelmektedir.
- Faz gerilim dengesizlikleri düşmektedir.
- Gerilim dalgalanmaları ve bozulmalar azaltılmaktadır [25].

### 3.1. Kompanzasyon için Gerekli Kondansatör Gücünün Hesaplanması

Kompanzasyon için gerekli kondansatör gücünün hesaplanmasında aktif güç sabit tutulur. Reaktif güç kompanzasyonu için kondansatör eklenirse sistemden çekilen reaktif güç azalır ve buna paralel olarak görünür güç de azalmaktadır.

Görünür gücün ifadesi;

$$S = P + jQ \quad (12)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (13)$$

şeklindedir.

$Q_1$  tesise kompanzasyon yapılmadan önceki reaktif güç

$Q_2$  tesise kompanzasyon yapıldıktan sonraki reaktif güç aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q_1 = P \cdot \tan \phi_1 \quad (14)$$

$$Q_2 = P \cdot \tan \phi_2 \quad (15)$$

Kompanzasyon için gerekli  $Q_c$  aynı zamanda kullanılacak kondansatörün gücünü belirler.

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (16)$$

olarak hesaplanır. Burada  $\tan \phi_1$  ve  $\tan \phi_2$  için hesapta da;

$\tan \phi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi}$  ifadesinden yararlanarak  $\cos \phi_1$  ve  $\cos \phi_2$  den de  $\tan \phi$  hesaplanabilir.

Dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu iki şekilde yapılmaktadır. Birinci dinamik faz kaydırıcı yani senkron makinelerle yapılan ve ikincisi kondansatörlerle yapılan statik faz kaydırıcılardır. Aşağıda bunların açıklaması verilmiştir [24].

### **3.2. Dinamik Faz Kaydırıcılar**

Reaktif güç üretiminde tercih edilen dinamik faz kaydırıcıların ilklerinden biri olarak senkron makineler gelmektedir. Santrallerde genel olarak enerji iletim hatlarının sonunda ve tüketim merkezlerinin başına paralel senkron bir makinenin bağlanması ile reaktif güç ihtiyacı bu makine ile olmaktadır. Paralel bağlanan senkron makine, boştaki çalışma durumunda aktif güç çeker ve senkron makine jeneratör olarak çalışır. Böylece şebekeye reaktif güç sağlanmış olur [26].

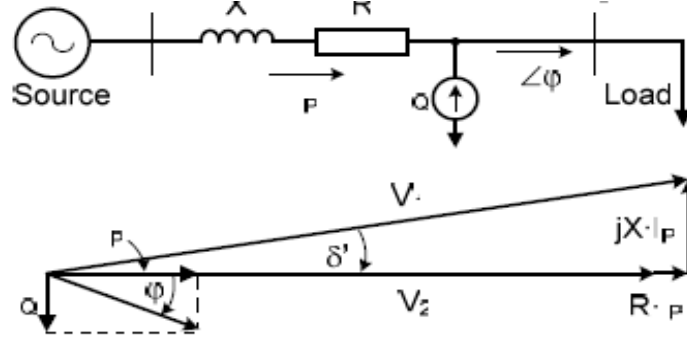
### **3.3. Statik Faz Kaydırıcı**

Reaktif güç üretiminde statik faz kaydırıcılarda kondansatör kullanarak yapılan üretiminin avantajları daha çoktur. Kondansatörlerle istenilen güçlerde reaktif güç üretilmektedir. Bu işlem reaktif gücün tüketiminin yapıldığı kısımda, yani yüke yakın yerlerde yapıldığı için orta ve alçak gerilimlerde fazla reaktif gücün kurtarılmış olur [26].

### **3.4.Şönt Kompanzasyonu**

Şönt kompanzasyonu, özellikle şönt reaktif güç kompanzasyonu, iletim sisteminde gerilim büyüklüğünü düzenlemek, gerilim kalitesini iyileştirmek ve sistem kararlılığını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem yükü endüktif olarak alındığında, düzgün çalışması için reaktif güç gerektirir. Eğer yükün yakınında bir reaktif güç sağlanırsa hat akımı düşürülebilir. Bu da güç kayıplarını azaltır ve yükteki gerilim düzenleyici kullanılabilir duruma getirilir. Yükün önde gelen kompanzasyona ihtiyacı varsa, bir indüktör gerekmektedir. Ayrıca endüktif şönt telafisi için bir akım kaynağı veya bir gerilim kaynağı kullanılabilir. Gerilim veya

akım kaynağı VAR jeneratörlerinin (indüktörler veya kapasitörler yerine) kullanılmasının temel avantajları, üretilen reaktif gücün bağlantı noktasındaki gerilimden bağımsız olmasıdır [27].



**Şekil 3.1.** Şönt kompanzasyonu devre şeması ve fazör diyagramı [27]

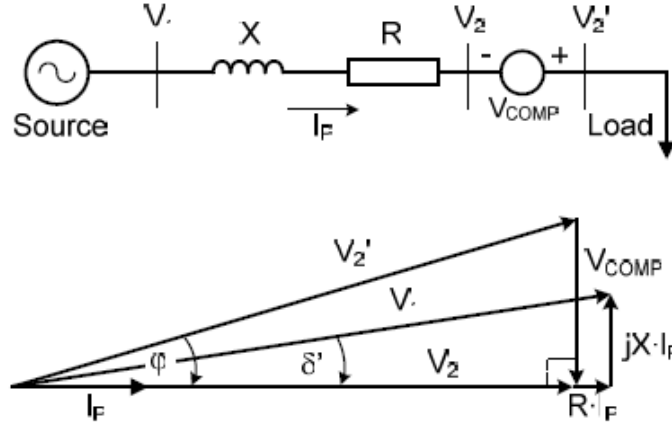
Şekil 3.1’de yük akımının reaktif bileşeni  $I_q$ ’yı kompanze etmek için bir akım kaynağı cihazı kullanılmıştır. Buna karşılık, sistemin gerilim düzenleyici iyileştirilebilir, kaynaktan gelen reaktif akım bileşeni azaltılabilir ya da neredeyse tamamen ortadan kaldırılabilir. Devre şemasında şönt kompanzasyon cihazları değişim empedansı ile bir akım akışı sağlanmaktadır. Bu akım ile iletim gerilimi arasında  $90^\circ$  faz farkı olduğu sürece şönt kompanzasyon cihazı şebekeye değişken reaktif güç vermektedir veya şebekeden çekmektedir. Bunun için akım ve gerilim kaynağı kullanılmaktadır. Bu şönt kompanzasyon cihazının avantajı, üretilen reaktif gücün bağlantı noktasındaki gerilimden bağımsız olmasından kaynaklanmaktadır [27].

### 3.5. Seri Kompanzasyon

Kompanzasyon sistemine seri reaktör yerleştirilmesi ile hattın reaktansı artmakta ve hattan geçen güç azalmaktadır. Bu sebepten dolayı reaktif güce ihtiyaç duyulur. Kompanzasyon sistemine bir seri kapasitörün bağlanması ile hattın transfer reaktansının bir bölümünü dengeleyen reaktif güç üretilir. Sonuç olarak güç iletim sisteminin fonksiyonu:

- i) Güç yolunun kararlılığının artırılması,
- ii) Sistemin voltaj kararlılığının iyileştirilmesi,

iii) Paralel devreler arasında optimize edilmiş güç paylaşımı şeklinde gösterilir [27].



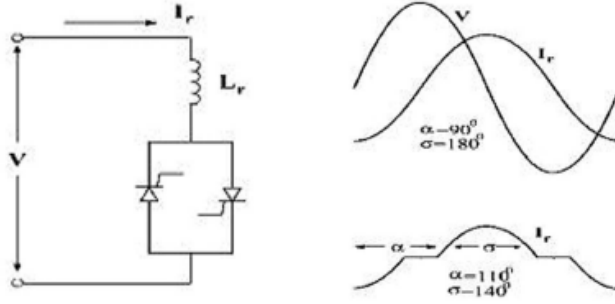
**Şekil 3.2.** Bir gerilim kaynağıyla seri kompanzasyon şeması ve fazör diyagramı [27]

Şekil 3.2’de tekrar ayarlanabilir gerilim kaynağı ile seri kompanzasyon ile elde edilen sonuçlar verilmektedir.  $V_2$ ’de bir güç faktörü çalışması bulunmaktadır. Ancak, kompanzasyon stratejisi şönt kompanzasyon ile karşılaştırıldığında farklılık göstermektedir. Bu durumda, yük tarafındaki gerilim  $V_2$  açısını değiştirmek için hat ve yük arasına  $V_{COMP}$  gerilimi bağlanmıştır.  $V_{COMP}$ ’nin uygun değere ayarı ile güç faktörüne  $V_2$ ’den ulaşılabilir. Şekil 3.2’nin fazör diyagramından da görülebileceği üzere,  $V_{COMP}$  hat indüktansının gerilim düşüşüne zıt yönde bir gerilimi üretmektedir.

Bu sistemde, ana kapasitör aşırı gerilim koruma devreleri ile birlikte bulunur. Aşırı gerilim koruması, kondansatör bankasında arıza durumunda çıkış akım arızasına dayanabilmektedir. Bu nedenle sistem için önemlidir. VAR jeneratörlerinin başarılı bir şekilde çalışması için gerekli faktörler incelenmelidir. Bu faktörlerden bazıları kontrol edilebilirlik, maliyet, güvenilirlik ve harmonik bozulma olarak ifade edilir. Bu gereksinimlere cevap verecek yöntemler aşağıda verilmiştir.

### 3.6. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Tristör kontrollü reaktör tristörlerin kullanımıyla, tristörün iletimde ve kesimdeki durumuna göre akım yönü belirlenerek reaktif güç kontrolü sağlanmaktadır.



**Şekil 3.3.** Tristör kontrollü reaktör devre şeması [28]

İletim açısı ( $\sigma$ ) tetikleme açısı ( $\alpha$ ) cinsinden yazıldığında;

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad \text{olur.}$$

Reaktör üzerinden akan ani akım aşağıdaki gibi yazıldığında;

$$i_r(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}.V}{X_r} (\cos(\frac{\pi-\sigma}{2}) - \cos(\omega t)) \\ 0 \end{cases} \quad (17)$$

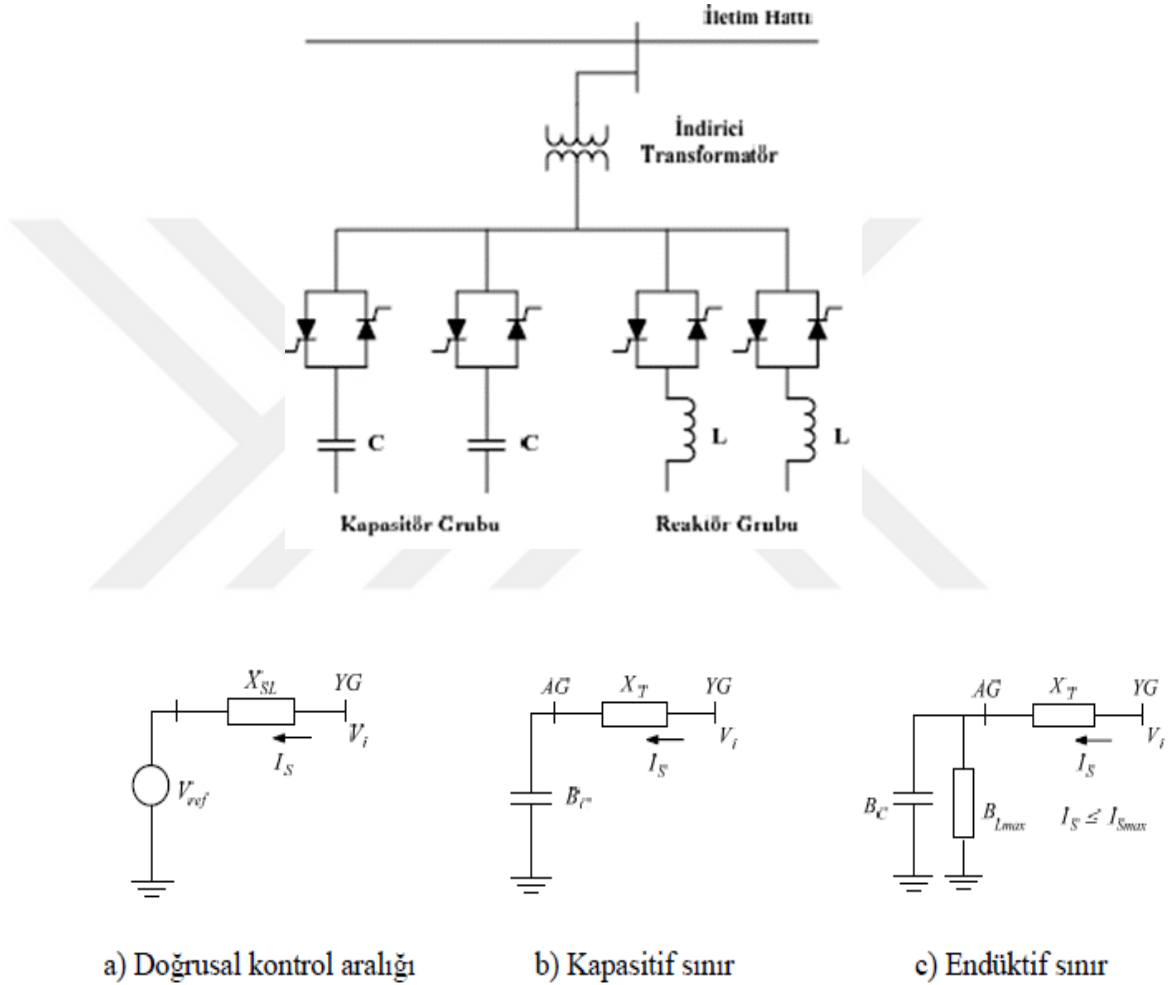
şeklinde olur. Akımın ve gerilimin bileşenlerinden yararlanılarak tristör kontrollü reaktörün süseptans değeri şu şekilde hesaplanabilir:

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{X, \pi} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{X, \pi} \quad (18)$$

Devrede maksimum süseptans değeri  $\sigma = 180^\circ$  ve  $\alpha = 90^\circ$  değerlerindedir. Tristör kontrollü reaktör devreleri  $\alpha$  tetikleme açısı ile reaktörün süseptans değerlerini ayarlayarak istenilen oranda endüktif reaktif güç harcanır [28].

### 3.7. Statik VAR kompanzator (SVC)

Statik VAR kompanzatorlar, kısaca SVC'ler, gerilim gibi sistem parametrelerini düzenlemek için duruma göre reaktif güç üreten veya tüketen, sisteme paralel olarak bağlanan SVC, esasen paralel bağlı kapasitör ve reaktörün eşdeğeridir.



Şekil 3.4. Statik VAR kompanzator şeması [29]

$$V_i = I_S \cdot X_{SL} + V_{ref} \quad (19)$$

SVC'nin lineer bölgedeki çalışma aralıkları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{-V_i^2}{(X_T + 1/B_C)} \leq Q_{SVC} \leq \frac{V_i^2}{(X_T + 1/B_L)} \quad (20)$$



SVC tarafından verilen reaktif güç

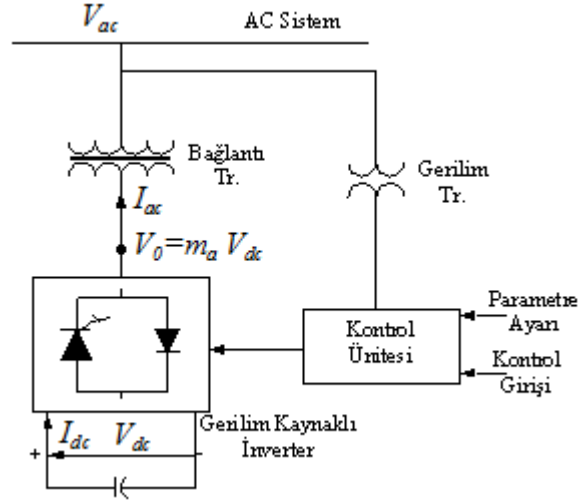
$$Q_{SVC} = -V_i \cdot I_s = V_i (V_{ref} - V_i) / X_{SL} \quad (21)$$

SVC'nin çalışma prensibi, kondansatör ve reaktörlerin tetikleme açılarına göre şebekeye girmesi ve şebekeden çıkması durumunda değişken değerli şönt empedans elde edilmesine dayanmaktadır. SVC'nin bağlı olduğu barada, maksimum kapasitif endüktif değerinden maksimum endüktif kapasitif değerine kadar reaktif değerleri kapsayacak şekilde işlem yapılır [29].



#### 4. STATCOM

İnverter tabanlı FACTS cihazlarından STATCOM, reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistemin gerilim sınırlarını belirli bir aralıkta tutmaya yardımcı olur. AC sistem gerilimi ile inverter çıkış gerilimi arasındaki değer STATCOM reaktif gücünü vermektedir [30]. STATCOM'un esas fonksiyonu, iletim hattından bir reaktif akım çekerek bağlantı noktasında iletim hattı gerilimini ayarlamaktır. Dağıtım sistemlerinde ise gerilim ayarlamasının yapılmasının yanı sıra güç faktörünü düzeltme, yük dengeleme ve yükün harmonik kompanzasyonu için de yararlanır [8]. Şekil 4.1'de STATCOM devre yapısı gösterilmiştir. Basit olarak STATCOM; bir bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı inverter ve dc enerji depolama elemanından oluşmaktadır. Burada  $V_{ac}$ , AC sistem gerilimini;  $V_o$  ise STATCOM çıkış gerilimini göstermektedir.



Şekil 4.1. STATCOM devre yapısı [8]

İnverterden AC sisteme akan akımın değerini aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$I_{ac} = \frac{V_o - V_{ac}}{X} \quad (22)$$

$X$ : bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı ifade etmektedir.

Reaktif güç ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

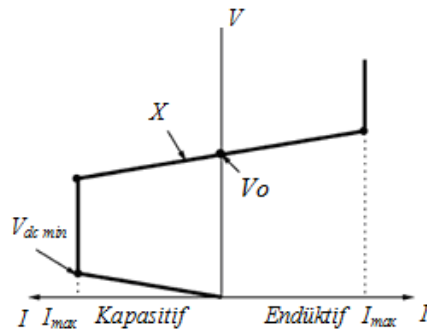
$$Q = \frac{V_0^2 - V_0 V_{ac} \cos \alpha}{X} \quad (23)$$

Aktif güç ifadesi de aşağıdaki gibidir:

$$P = \frac{V_{ac} V_0 \sin \alpha}{X} \quad (24)$$

STATCOM çıkış gerilimi, AC sistem gerilim değerini geçerse ( $V_0 > V$ ) olduğu durumda  $Q > 0$  olacaktır. Akım, transformatör reaktansı aracılığıyla STATCOM'dan AC baraya doğru iletilir. Çevirici, çıkış akımı iletim hattı geriliminden  $90^\circ$  ileridedir. Bu durumda cihaz kapasitif modda çalışmakta ve reaktif güç üretmektedir. Eğer STATCOM çıkış gerilimi AC sistem geriliminden küçük olursa ( $V_0 < V$ ) akım transformatör reaktansı aracılığıyla AC baradan STATCOM'a doğru iletilir. Çevirici akımı, iletim hattı geriliminden  $90^\circ$  geridedir. Bu durumda cihaz endüktif modda çalışılır ve sistemden reaktif güç tüketilir. Kapasitör, çevirici için gerekli DC gerilimi sağlamaktadır. Çevirici çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitörün dolumu ve boşalması gerçekleşmektedir [16]. STATCOM, bağlı olduğu bara gerilimini ayarlamak için iletim hattına reaktif güç verebilir veya iletim hattından reaktif güç çekebilir. Reaktif güç (Q) denetimi yapılabilmesi için Q'nun geriliminin genliği değiştirilmelidir.

Şekil 4.2'de sürekli durumda çalışma halindeki V-I karakteristiği gösterilmiştir. Belli aralıkta hem endüktif hem de kapasitif akım sağlandığı görülmektedir.

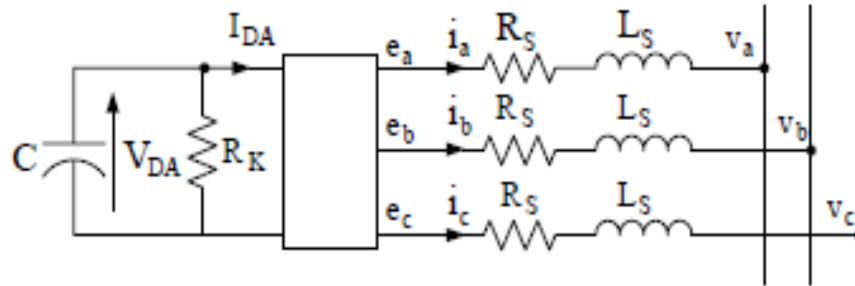


Şekil 4.2. STATCOM'un sürekli durumda V-I karakteristiği.

Şekil 4.2’de STATCOM, kararlı durum karakteristiklerinde negatif akım kapasitif çalışmayı gösterirken, pozitif akım endüktif çalışmayı gösterir. Referans gerilimi ( $V_0$ ) sıfır akım çıkışına karşılık gelmektedir ve genel olarak STATCOM, normal çalışma koşulları sırasında sıfır çıkışa yakın çalıştırılmaktadır. Bir STATCOM ile paralel bağlanmış mekanik olarak anahtarlanmış kapasitörleri/reaktörleri kontrol ederek düzenlenir [31]. STATCOM’un maksimum kapasitif üretimi, sistem geriliminden neredeyse bağımsızdır. Gerilim çökmesi veya ciddi arıza durumu esnasında şebeke gerilimini desteklemek için bu FACTS cihazı gereklidir.

#### 4.1. STATCOM’un Matematiksel Modeli

Şekil 4.3’te, bir gerilim bölücü devre (GBD), dönüştürücüye doğru gerilim sağlayan bir kondansatör, bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı ve dönüştürücüden meydana gelen ve bir  $R_K$  direncinden oluşmaktadır.  $R_K$  direnci anahtarlama kayıplarını ifade etmektedir. STATCOM’un devresi gösterilmektedir [30].



Şekil 4.3. STATCOM’un eşdeğer devresi [30]

Sistemin kontrolü için, STATCOM’un akım ve gerilimleri sistem sabit kabul edilerek denklem (21) yardımıyla d-q bileşenlerine ayrılabilir [30].

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \times \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (25)$$

Burada

$$C = \begin{bmatrix} \cos wt & \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin wt & -\sin\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

olarak ifade edilir.

Şekil 4.3'teki eşdeğer devreye göre STATCOM'un alternatif gerilim denklemi:

$$L \frac{di}{dt} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Va - e_a \\ Vb - e_b \\ Vc - e_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem 16'ya park dönüşümü uygulanırsa:

$$\frac{di}{dt} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-Rs}{Ls} & W \\ -W & \frac{-Rs}{Ls} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} + \frac{1}{Ls} \begin{bmatrix} (e_d - Vd) \\ (e_q - Vq) \end{bmatrix} \quad (28)$$

bulunur.

Denklem 28'de elde edilen dönüştürücünün akımı, d-q bileşenlerine ayrılır. Reaktif güç teoremine göre, güç sistemine verilen aktif güç  $P=Vd*Id$  ve reaktif güç  $Q=Vq*Iq$  şeklinde elde edilebilir [32].

## 4.2. STATCOM'da Kullanılan Evirici Yapılar

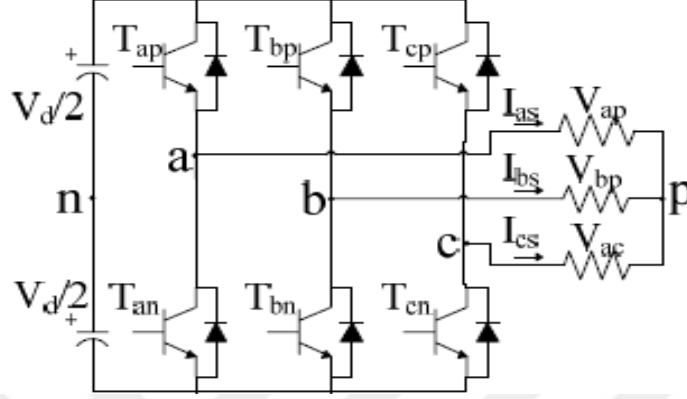
Doğru Akımın (DC) endüstride ve diğer birçok alanda Alternatif Akıma (AC) dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla evirici adı verilen güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır.

Eviriciler, bir DC kaynaktan uygun anahtarlama ile genliği, frekansı ve faz açısı kontrol edilebilen, gerilim üretebilen güç elektroniği devreleridir. Eviricilerde özellikle transistör, tristör, GTO (Kapıdan Söndürmeli Tristör), MOSFET (Metal Oksit Yarı iletkenli Alan Etkili Transistör), IGBT (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör) ve IGCT (Kapı Devresi İle Söndürülen Tristör) gibi yarı iletken anahtarlar tercih edilmektedir. Bu yarı iletkenlerden transistör ve MOSFET düşük ve orta güçlü sistemlerde; tristör, GTO, IGBT, IGCT ise yüksek güç gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Eviriciler akım veya gerilimden kaynaklı olarak ifade edilebilir [34]. Evirici kaynağı akım olduğu durumda DC'de endüktans elemanı, evirici kaynağı gerilim olduğunda ise DC'de kondansatör elemanı tercih edilir. Günümüze kadar STATCOM'un güç devresinde iki seviyeli çok darbeli evirici ve iki seviyeli darbe genişlik modülasyon denetimli eviriciler kullanılmıştır [34]. İlk zamanlarda kullanılan evirici yapısı iki seviyeli eviricidir. Daha sonra evirici yapılarının gelişmesiyle çok seviyeli eviricilere geçilmiştir. Çok seviyeli eviriciler üçe ayrılmaktadır: Bunlar, diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat eviricilerdir [33].

### 4.2.1. İki Seviyeli Eviriciler

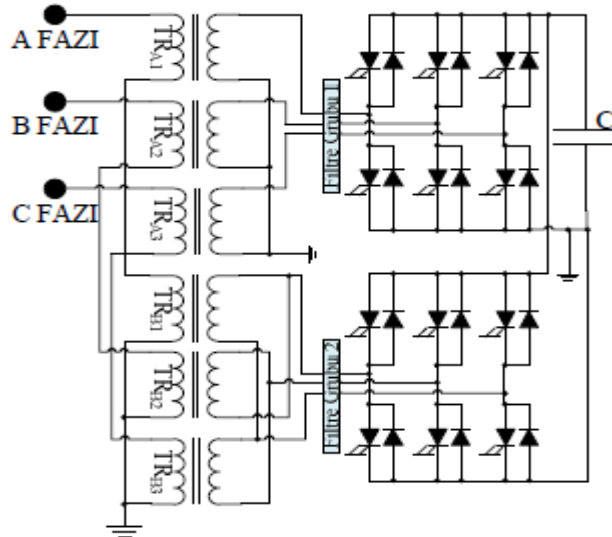
STATCOM'larda Şekil 4.4'de gösterilen ilk zamanlarda tercih edilen iki seviyeli evirici olan çok darbeli evirici yapısı kullanılmıştır. İki seviyeli çok darbeli evirici yapıları kullanarak gerçekleştirilen STATCOM devrelerinde, inverter çıkışında çıkış dalga harmoniğini azaltmak için zigzag transformatörler kullanılmıştır. Ancak zigzag transformatörler pahalı eleman olması, kayıplara sebep olmasından dolayı denetim zorlukları yaşanmaktadır. Bu yüzden STATCOM denetiminde harmoniği azaltan, transformatör devresini basitleştiren, yüksek anahtarlama frekansında çalışan yarı iletken elemanların kullanımı tercih edilmeye

başlanmıştır. Ortak DC baradan sağlanan bir veya daha fazla iki seviyeli evirici, AC tarafta paralel ve seri bağlı olan bir transformator aracılığıyla şebekeye bağlanır [33].



Şekil 4.4. İki seviyeli evirici yapısı [33]

STATCOM'lar da tercih edilen diğer iki seviyeli evirici devresi ise PWM (Sinyal Genişlik Modülasyonu) denetimli iki seviyeli eviricilerdir. Çok darbeli eviricilerde (Şekil 4.5'te gösterilen) PWM metodu kullanılmaktadır.

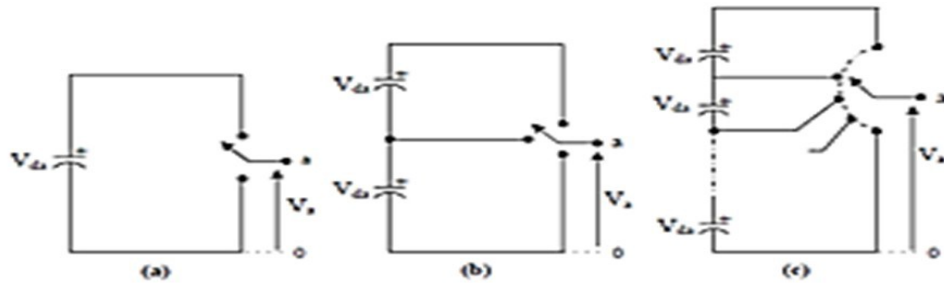


Şekil 4.5. PWM denetimli iki seviyeli evirici yapısı [33]

STATCOM uygulamalarında yüksek anahtarlama frekansı kullanılmaktadır. Yüksek anahtarlama frekansı güç kullanım seviyesini arttırdığı gibi anahtarlama kayıplarını da artırmaktadır. İki seviyeli eviricilerin orta ve yüksek güç uygulamalarında anahtarlama kayıpları ve kayıpların anma değerindeki sınırlandırmalardan dolayı yüksek anahtarlama frekanslarında istenilen seviyelerde çalışmamaktadır. Ayrıca orta ve yüksek güçlü uygulamalarda iki seviyeli eviricilerde; düşük verim, yüksek güçlü transformatör kullanımı ve yüksek fiyat gibi dezavantajlara sahiptir. Bundan dolayı eviricilerden çok seviyeli eviriciler orta ve yüksek güç uygulamalarında bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır [33].

#### 4.2.2. Çok Seviyeli Eviriciler

Çok seviyeli eviriciler günümüzde büyük güçlü elemanlarda tercih edilmektedir. Bunlar çıkış gerilimi, yüksek verimlilik ve güç faktörü için düşük toplam harmonik bozulma (THD) sağlamaktadır. Cihazlar düşük frekansta değiştirilebildiğinden daha yüksek verimliliğe ulaşabilir [33]. Ayrıca çok seviyeli eviriciler, girişlerine uygulanan DC gerilimin anahtarlama ile sinüzoidal dalga şekline benzeyen bir merdiven dalga şekli de oluşturabilirler. Anahtarların değiştirilmesi, çıkışta yüksek gerilime ulaşan kapasitör gerilimlerinin eklenmesine izin verirken, güç yarıiletkenleri düşük gerilimlere dayanabilmelidir [35]. Burada ilave edilen her bir DC gerilim seviyesi, AC çıkış gerilimi çıkış dalga modeline de basamak ilavesi gerçekleşmektedir. Şekil 4.6'da, anahtarlamalara göre iki, üç ve çok seviyeli evirici devresi verilmiştir.



Şekil 4.6. a) İki seviyeli evirici, b) Üç seviyeli evirici, c) m seviyeli eviricinin bir fazına ait devre [35].



Çok seviyeli eviricileri aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür:

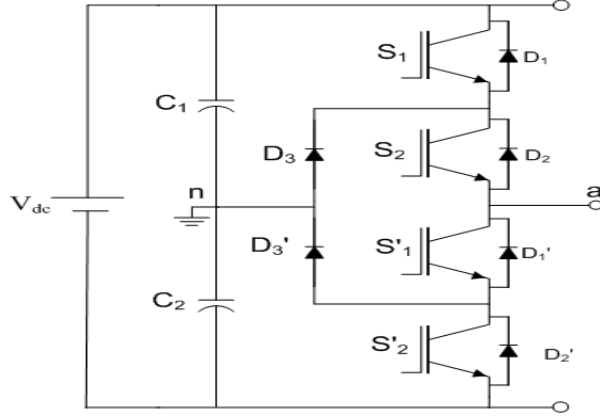
1. Diyot Kenetlemeli Evirici (DKE)
2. Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE)
3. Çok Seviyeli Kaskat Evirici (ÇSKE)
4. Modüler Çok Seviyeli Evirici (MÇSE)

Çok seviyeli inverterlerin en önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

1. Çok seviyeli inverterler oldukça düşük bozulmalarla çıkış gerilimi üretebilirler.
2. Çok düşük bozulmalarla giriş akımı çekebilirler.
3. Daha küçük ortak mod gerilim üreterek motor yataklarındaki gerilimi azaltabilirler. Ek olarak modülasyon yöntemleri kullanılarak ortak mod gerilimleri ortadan kaldırabilirler.
4. Daha düşük anahtarlama frekansı ile çalışabilirler [36].

#### **4.2.2.1. Diyot Kenetlemeli Eviriciler**

Sıfır nokta kenetlemeli olarak da bilinen DKE eviriciler, 1981 yılında Nabae ve arkadaşları tarafından ilk önerilen çok seviyeli evirici olmuştur. Şekil 4.7'de tek faz devresi gösterilen DKE eviricilerde, giriş gerilimi birbirine seri bağlı kapasitörler arasında bulunan bağlantı noktasıyla ayrı ayrı seviyelerde incelenebilir [33]. Bu devreyi geleneksel iki seviyeli eviriciden ayıran elemanlar  $D_3$  ve  $D_3$  diyotlarıdır. Bu iki diyot, DC gerilimin yarısına anahtar gerilimini ayarlamaktadır.  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarı açıldığında, 0 ve a arası gerilim  $V_{dc}$ 'dir. Bu durumda,  $S_1$  ile  $S_2$  arasındaki gerilimi  $S_1$  dengeler ve  $C_1$  ve  $S_2$  arasındaki gerilimi  $C_2$  üzerindeki gerilim engeller. Van çıkış gerilimi AC ve  $V_{a0}$ 'ı DC'dir.  $V_{an}$  ve  $V_{a0}$  arasındaki fark  $V_{dc}/2$  olan  $C_2$ 'deki gerilimdir. İki kondansatörün orta noktası olan 'n', sıfır noktası olarak tanımlanır. Böylece Van, çıkış gerilimi ( $V_{dc}/2$ ), 0, ( $-V_{dc}/2$ ) olarak üç seviyede olmaktadır [35].

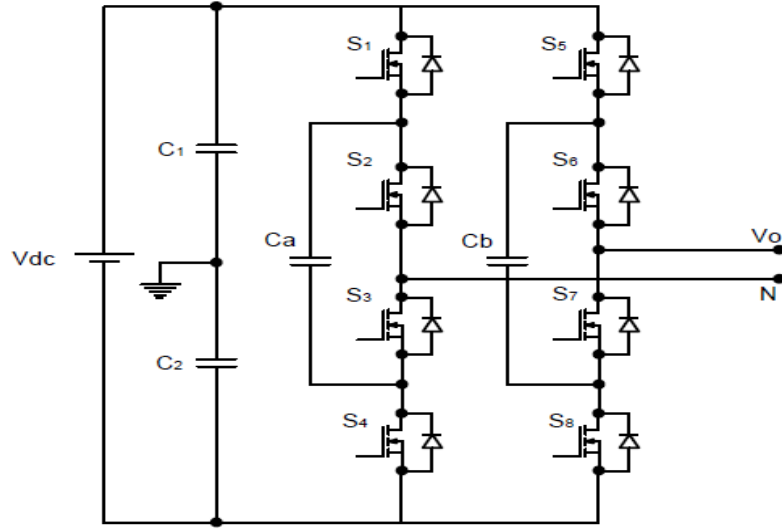


**Şekil 4.7.** Üç-seviyeli diyot kenetlemeli evirici tek hat devre şeması [35].

DKE'nin avantajları şu şekildedir: seviye sayısı arttıkça, çıkış dalga formunun harmonik içeriği, filtre boyutunu azaltır. Cihazların çıkıştaki harmonik içeriği artırmadan frekansın değiştirilmesi nedeniyle daha düşük anahtarlama kayıpları sağlamaktadır. Reaktif güç akışı kontrol edilebilir. Böylece kapasitör gerilimlerinde dengesizliğe neden olmaz. Hızlı dinamik cevap verebilir. Sürekli çalışma sağlayabilir [36]. DKE'nin dezavantajları ise şunlardır: Seviye sayısı arttıkça, kenetleme diyotuna gereksinim duyulmaktadır. Bu durumda, aktif güç denetimi zorlaşmakta ve sınırlı çıkış gerilimi verilebilmektedir [33].

#### 4.2.2.2. Kapasitör Kenetlemeli Evirici

Kapasitör kenetlemeli eviricinin yapısı diyot kenetlemeli eviriciye benzemektedir. Onu diyot kenetlemeli eviriciden ayıran özelliği kenetleme diyotları yerine kondansatörlerden yararlanılmaktadır. Şekil 4.8'de üç seviyeli kapasitör kenetlemeli evirici devre şeması gösterilmiştir [33]. 3 seviyeli KKE'nin her üç faz çıkışı DA hat kondansatörleri tarafından 3 seviyeye bölünmüş ve giriş gerilimini paylaşmaktadır.



**Şekil 4.8.** Üç seviyeli kapasitör kenetlemeli evirici devre şeması

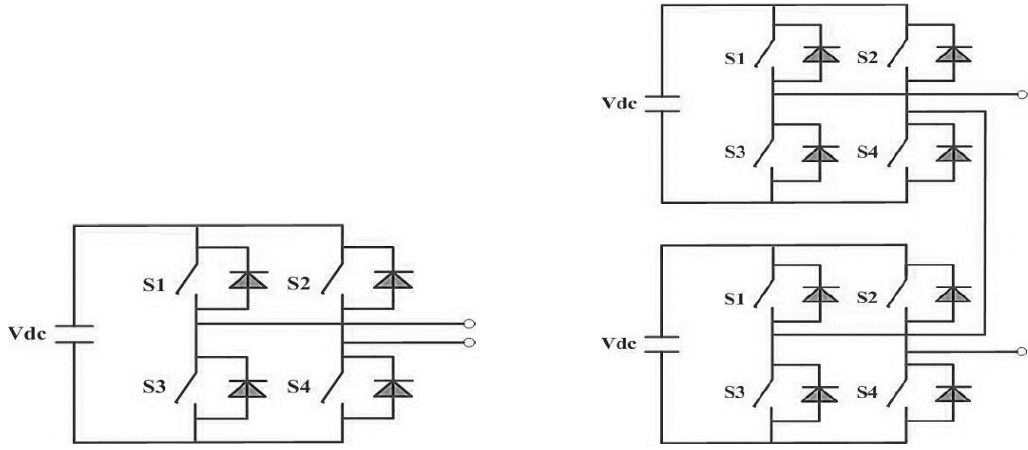
Kapasitör kenetlemeli çok seviyeli eviricilerde, kondansatörlerin basamak şeklinde sıralanmasının nedeni, kondansatörlerin her bir geriliminin değeri sonraki kondansatör değerinden farklı olmasıdır. Eviricide, seviye sayısı  $m$  olan bir çıkış verilebilmesi için  $(m-1)$  adet kondansatörden faydalanılmaktadır ve  $(m-1).(m-2)/2$  kadar da yardımcı kondansatöre ihtiyaç duyulmuştur. Şekildeki evirici devresinde “a” ve “n” noktaları arasında üç seviyeli bir çıkış elde edilebilir. Örneğin  $V_{an} = V_{dc}/2$ , 0 ya da  $-V_{dc}/2$  olabilir. Gerilim seviyesini  $V_{dc}/2$  yapmak için  $S_1$  ve  $S_2$  iletme geçirilir. Benzer şekilde  $-V_{dc}/2$  için  $S_3$ ,  $S_4$  anahtarları iletimdedir. Sıfır seviyesi için ise  $S_1$  ve  $S_3$  veya  $S_2$  ve  $S_4$  anahtar çiftlerinden biri iletimde olmalıdır.  $C_a$  kenetleme kapasitörü,  $S_1$   $S_3$  anahtarı iletimde olduğu zaman dolar.  $S_2$  ve  $S_4$  iletme geçtiğinde boşalır [37]. Bu eviricinin en önemli özelliği, aktif ve reaktif güç kontrolünün sağlanması ve filtre kullanımına ihtiyaç duyulmamasıdır. Ancak çok miktarda harcanan depolama kondansatörleri fiyatı artırmakta ve bu kondansatörlerin dolum ve boşalmasının kontrolü hassas bir eleman olduğu için zorlaşmaktadır [32].

### 4.2.3. Çok Seviyeli Kaskat Evirici ( ÇSKE)

ÇSKE en az devre elemanına ihtiyaç duyan eviricidir. Son yıllarda AC güç kaynaklarında, yüksek güçlü motor sürücülerinde, iletim ve dağıtım sistemlerinde kompanzasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. DSTATCOM uygulamaları için umut vadeden çok seviyeli evirici yapısı olarak gözükmiştir. Çünkü ÇSKE'ler seri bağlı ve ayrı ayrı denetlenebilen H köprülerine ve DC kaynak oranına sahiptir. DC kaynak oranı çıkış gerilim seviyelerini belirlemektedir. Gerilim seviyeleri aynı olabildiği gibi farklı da olabilir. Gerilim seviyeleri farklı olduğu durumda çıkış gerilim sayısı fazla olur. Böylece aynı sayıda yarı iletken kullanarak daha fazla çok seviyeli eviriciler elde edilir. Bu evirici yapısında ayrı bir DC kaynak kullanımına izin vermektedir [38]. Evirici modüllerinin seri bağlantısı H-köprü çalışma modunda, anahtarlama ani yükselmelerini önleyerek eviricinin büyük güç uygulamalarında verimli olmasını sağlar.

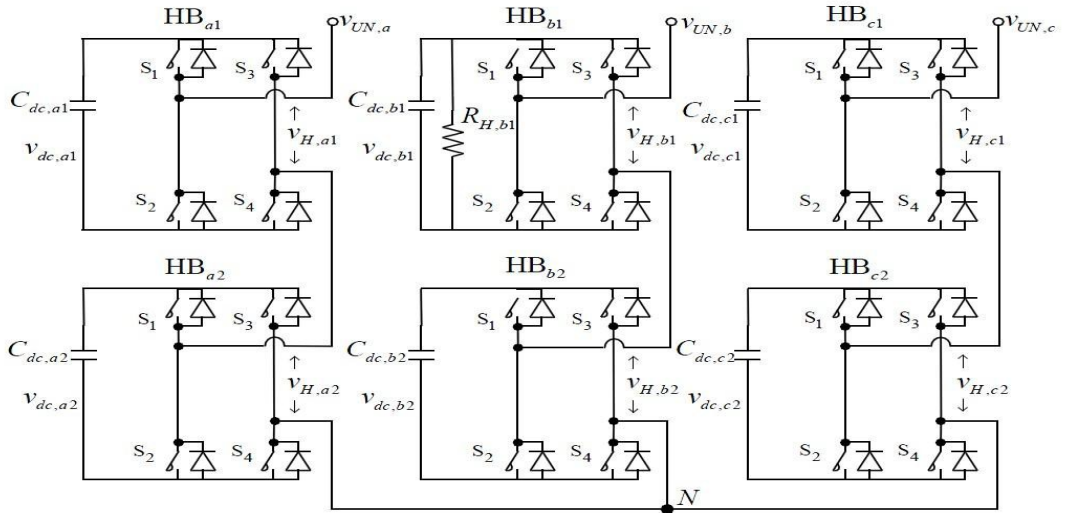
#### 4.2.3.1. Kaskad H-köprü Çok Seviyeli Evirici

Şekil 4.9'da bir faz için 3 seviyeli ve 5 seviyeli kaskad H-köprü çok seviyeli evirici yapıları gösterilmektedir. Kaskad çok seviyeli eviricilerin bazı avantajları vardır. Gerilim seviyesini aynı miktarda sağlayabilmek için çok az eleman sayısı kullanılmaktadır. Burada kenetleme diyotlarına veya gerilim ayarlaması yapan kondansatörlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Çünkü her seviyede aynı elemanlar kullanılmıştır. Bu yapıda direnç-kondansatör-diyot kayıplarının sönümleme etkisinden kurtulmak için yumuşak anahtarlama kullanılabilir. Dezavantaj olarak da aktif güç alışverişi için ayrı bir DC kaynağa gereksinim duyulmaktadır ve bu nedenle uygulama alanı sınırlıdır [32].



**Şekil 4.9.** Kaskad H-köprü çok seviyeli evirici [32]

Şekil 4.9’da her faz için 2 adet olmak üzere H-köprülü çok seviyeli bir eviricinin devre yapısı gösterilmektedir. Her H-köprü için ayrı bir DC kaynağı bulunmaktadır. Faz gerilimi ise ayrı ayrı H-köprüler kullanılarak elde edilen gerilimlerin toplamından oluşmaktadır. Eğer H-köprülerin DC link gerilim seviyeleri aynı ise çok seviyeli eviriciye kaskad çok seviyeli evirici denir. H-köprülerin DC link gerilimleri birbirlerinden farklı olduğu durumda ise hibrit çok seviyeli eviricidir [32].

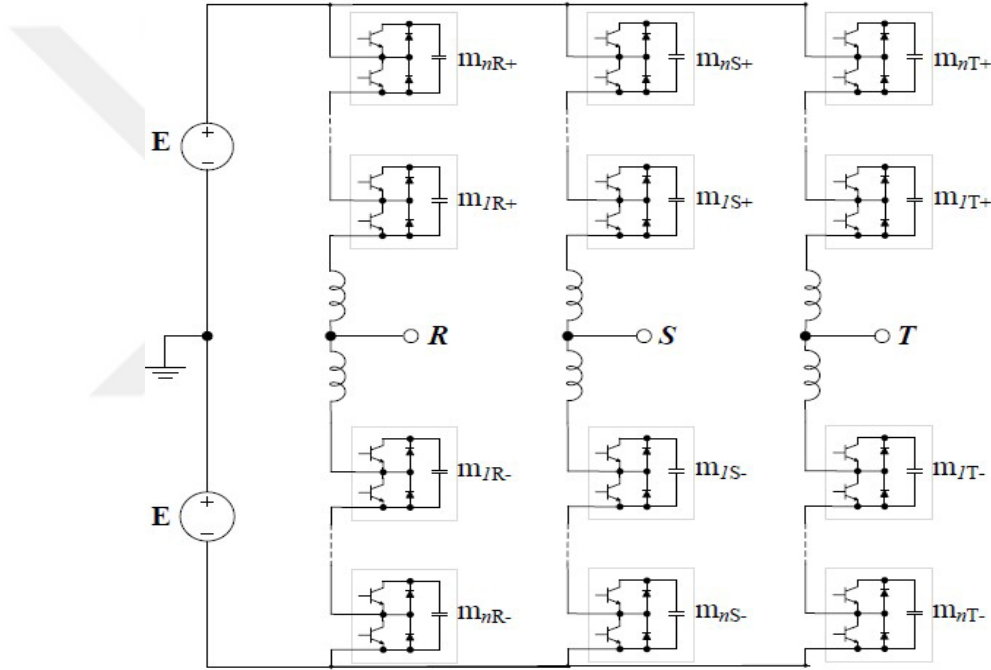


**Şekil 4.10.** Beş seviyeli kaskad çok seviyeli evirici yapısı [32]

#### 4.2.3.2. Modüler Çok Seviyeli Eviriciler (MÇSE)

Gerilim kaynaklı tip dönüştürücüler olan MÇSE'ler transformatörler olmadan yüksek veya orta gerilim güç dönüşümü için yeni nesil çok seviyeli eviricidir. MÇSE'lerin temeli bir çok DC gerilim bağlantısı sonucunda AC gerilim oluşturur [39].

MÇSE'ler, daha esnek bir yapısı, çalışma aralıklarının fazla olması, harmonik bozulmalarının az olması gibi avantajlarından dolayı çok seviyeli evirici yapıları içinde daha kullanışlı olmaktadır [33].



Şekil 4.11. Modüler çok seviyeli dönüştürücü yapısı [33]

Modüler çok seviyeli dönüştürücülerin avantajlarına bakıldığında; AC sistem akım ve gerilimleri düşük bozulmalara sahiptir. PWM taşıyıcı frekansı azalmış ve bu nedenle anahtarlama kayıpları düşmüştür. Eviricinin modüllerinde depolanan enerji sebebiyle DC hat kapasitansının düşürülmesi ya da ortadan kaldırılması gerekmektedir. Diğer çok seviyeli dönüştürücülere göre bunlar basit bir yapıya sahiptir. Yarı iletkenlerin düşük gerilim değerleri, yüksek gerilim kullanımları için daha avantajlıdır. Modüler çok seviyeli dönüştürücülerin olumsuzlukları

sıralandığında; DC bağlantı hatalarına karşı savunmasızdır. Yarı iletken bir arıza olduğu durumlarda korumaya ihtiyacı olan bir modüldür [33].

### **4.3. Anahtarlama Yöntemleri**

Her bir uygulamada anahtarlama sayısının ve anahtarlama kayıplarının azlığı, çıkış gerilim darbeleri arasındaki mesafe, ortak mod gerilim şiddeti gibi ölçütler alınıp anahtarlama şablonları ona göre oluşturulur. Belirlenen anahtarlama şablonu, var olan yazılım ve donanım kabiliyetine bağlı olarak çeşitlendirilir. Anahtarlama yöntemleri: düşük frekansta, yüksek frekansta anahtarlama (PWM) ve karma yöntem olarak üçe ayrılır [40].

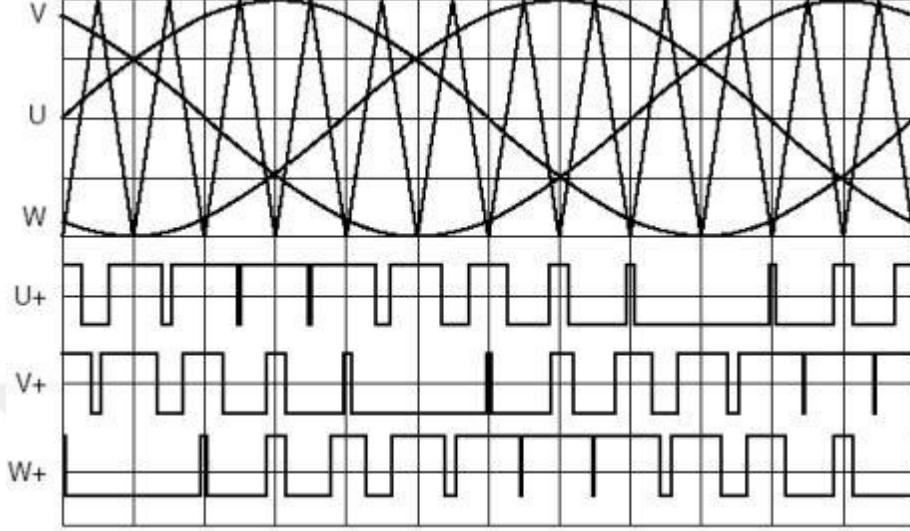
#### **4.3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu**

D-STATCOM uygulamalarında dönüştürücüler için anahtarlama frekansının yüksek olduğu PWM teknikleri kullanılmaktadır. Bu sayede D-STATCOM'un güç sisteminde oluşan değişiklikleri oldukça kısa bir sürede yanıtlanması gerçekleşir. Yüksek frekanslı inverterler için tercih edilen PWM yöntemi iki seviyeli de kullanılan PWM tekniğinin gelişmiş durumudur. Bu PWM yöntemleri arasında taşıyıcı temelli Sinüzoidal PWM ve Uzay Vektör PWM D-STATCOM uygulamaları için en uygun PWM yöntemleridir [34].

#### **4.3.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu**

Sinüs darbe genişlik modülasyonu, endüstriyel uygulamalarda genellikle kullanılmaktadır. Şekil 4.12'de gösterildiği gibi sinüs dalga ile yüksek frekanslı taşıyıcı üçgen dalga karşılaştırılmaktadır. Üçgen dalganın anlık değeri ile sinüs dalganın anlık değeri karşılaştırıldığında, üçgen dalganın anlık değeri daha düşük olduğunda lojik 1 olarak alınır. Aksi durumda 0 olarak alınır. Bu şekilde üretilen (1-0) darbeleri eviriciye verilir ve böylece çıkışta sinüzoidal bir gerilim elde edilir. Modüle edici sinyal genliğinin taşıyıcı sinyal genliğine oranı, modülasyon indeksini vermektedir [41].

$$m_a = \frac{V_{\text{kontrol}}}{V_{\text{üçgen}}} \quad (29)$$



Şekil 4.12. Sinüs darbe genişlik modülasyonu

Referans gerilimleri belirlemek için sinyal denklemi;

$$V_r = A \cdot \sin(\omega t + \theta)$$

A; sinyalin büyüklüğü (30)

$\theta$ ; faz kayma açısı

V( a-b-c) için gerilimleri referans alınınca eşitlikler:

$$V_{ra} = A \cdot \sin(\omega t + 0^\circ)$$

$$V_{rb} = A \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (31)$$

$$V_{rc} = A \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$$



### 4.3.3. Uzay Vektör PWM

Uzay vektörü PWM gereksiz anahtarlamayı önler. Bu, geleneksel darbe genişlik modülatörlerine sahip benzer invertörlere kıyasla çok iyi çıkış performansı, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlar. SVPWM yönteminde, abc koordinatlarındaki referans sinyalleri, inverterin anahtarlama durumlarında meydana gelen vektörlerin uygulama sırası ve uygulama periyoduyla üretilen aşağıdaki dönüşüm matrisi ile koordinatlarda normalleştirilmiş referans vektörüne dönüştürülür. Space Vector PWM uygulamalarında gerilim sentezi: İlk olarak, a, b, c'den  $\alpha$ - $\beta$ 'ya dönüşüm yapılır [42].

$$V_{\alpha} = V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn} \quad (32)$$

$$V_{\beta} = V_{an} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{cn} \quad (33)$$

Referans gerilimin büyüklüğü:

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (34)$$

$\alpha$ - $\beta$  arası açı eşitliği;

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} = \omega t = 2\pi f t \quad (35)$$

İnverterin anahtarlama durumlarında meydana gelen vektörlerin periyodu, 32 ve 33'deki denklemleriyle belirlenen Clark matrisi aşağıdaki gibidir:

$$T_{abc-\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

#### 4.4. Statcom Denetim Yöntemleri

STATCOM denetimi yapmak için öncelikle şebekenin STATCOM 'un ürettiği akım, gerilimler ve evirici girişine bağlı DA kaynağının gerilimi ölçülür. Ölçülen bu akım gerilimler sistemde istenen referans sinyaller; PI, PID, YSA veya Neuro-fuzzy kontrollerden geçirilerek evirici için anahtarlama sinyalleri üretilir. STATCOM ve şebeke arasındaki iletilebilecek aktif güç değeri;

$$P = \frac{V_s V_i}{X} \sin \delta \quad (37)$$

Burada  $V_s$  şebeke gerilimin etkin değeri,  $V_i$  STATCOM gerilimin etkin değeri,  $X$  bağlantı reaktansı,  $\delta$  açısı şebeke ve STATCOM gerilimleri arasındaki açıdır. Q gücü STATCOM ve şebeke arasında iletilebilecek reaktif güç değeridir.

$$Q = \frac{V_s}{X} (V_s - V_i \cos \delta) \quad (38)$$

STATCOM çıkış geriliminin üç fazlı köprü inverter için tepe değeri;

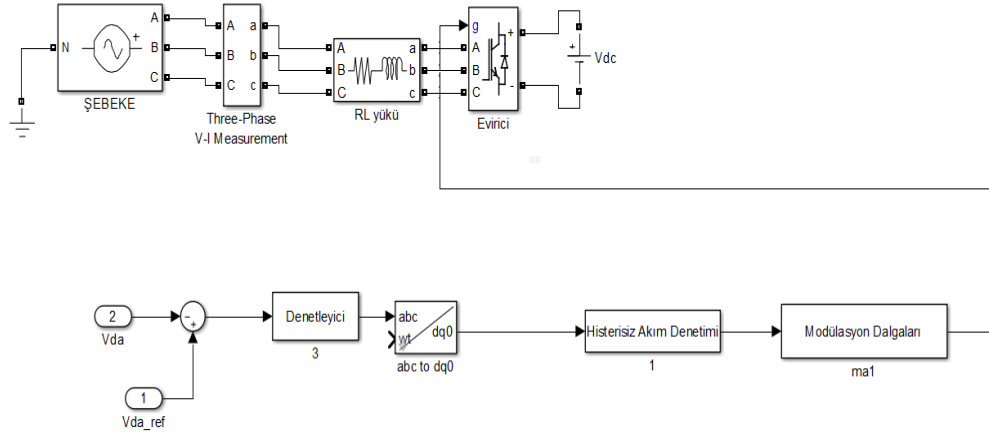
$$V_i = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (39)$$

Burada ( $m_a$ ) modülasyon indeksi, ( $V_{dc}$ ) ise evirici girişine bağlı DA kaynak gerilimidir. Aynı şekilde STATCOM çıkış geriliminin etkin değeri;

$$V_i = m_a \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} = 0,35m_a V_{dc} \quad (40)$$

$$P_i = \frac{V_s}{X} 0,35m_a V_{dc} \sin \delta \quad (41)$$

$$Q_i = \frac{V_s}{X} (V_s - 0,35m_a V_{dc} \cos \delta) \quad (42)$$



**Şekil 4.14.** Doğrudan akım denetim bloğu

Doğrudan akım denetim yönteminde STATCOM hat akımı anlık  $p-q$  teorisini kullanarak aktif reaktif güç referansına göre düzenlenmektedir. DC-hat gerilimi referans ile DC gerilim karşılaştırılarak gerilim hatası bir denetleyiciye uygulanmaktadır. Burada  $d-q$  dönüştürücü bileşenleri, akım ve gerilim değerlerinde gözlenir.

#### 4.4.3. Sabit DA-Hat Gerilim Yöntemi

Faz açısı denetim yönteminde hat kondansatörü ve bağlantı endüktansından dolayı sistemin reaktif güç sağlamadaki hızı çok iyi değildir. Bu yöntemde ise bu dezavantajı ortadan kaldırmak için DA-hat gerilim  $\delta$  açısı ile sabit tutulur. Çıkış geriliminin genliği modülasyon indeksinin kontrolü ile değiştirilebilir. Modülasyon indeksi kontrolüyle STATCOM ile şebeke arasındaki reaktif güç kontrolü sağlanır. Reaktif güç kontrolünde referans reaktif güç miktarı ile ölçülen reaktif güç miktarı karşılaştırılarak denetleyiciye giriş olarak uygulanmaktadır. Denetleyicinin çıkışında modülasyon dalgalarının genliği bulunarak ve DA-hat gerilim denetleyicisinden elde edilen fazı açısı reaktif güç denetleyicisinin çıkışından elde edilen genlik değeri ile çarpılarak modülasyon dalgaları üretilmektedir. Böylece iki adet denetleyici ile hem genliği hem de faz bilgileri elde edilmektedir [42, 43].

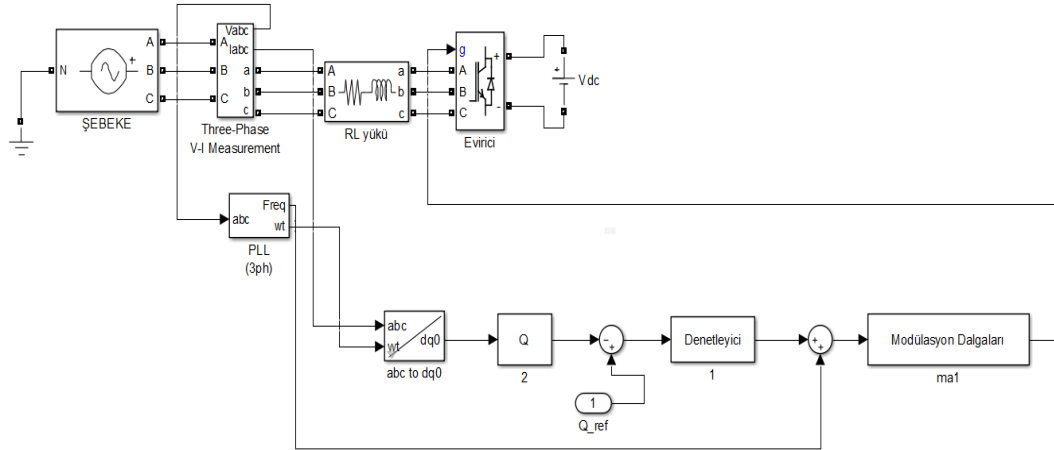
Bu eşitliklere göre reaktif güç denetiminin iki farklı çalışma modu ortaya çıkar.  $Q_i$  eğer şebeke geriliminden düşükse evirici reaktif gücü absorbe eder ve evirici endüktif olarak çalışır.  $Q_i$  değeri, şebeke geriliminden büyük ise evirici reaktif güç şebekeye verir. Evirici kapasitif modda çalışır [42]. Eviricinin çıkış geriliminin genliği; DA-hat gerilimi, modülasyon indeksi ve şebeke gerilimi ile eviricinin çıkış geriliminin arasındaki faz farkı ile kontrol edilmektedir.

STATCOM'un reaktif gücünün denetimi şöyle gerçekleşir: DC- hat gerilimi sabit tutulup modülasyon indeksi değiştirilmesiyle, modülasyon indeksi sabit tutulup DC- hat gerilimi değiştirilmesiyle ve her iki durumun sağlanmasıyla denetimi yapılmaktadır. Buna göre D-STATCOM'un çıkış reaktif gücünün kontrolü için araştırmalarda farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar:

1. Faz açısı denetim yöntemi,
2. Doğrudan akım denetim yöntemi,
3. Sabit DA-hat gerilim yöntemi
4. Dolaylı akım denetim yöntemidir [43].

#### **4.4.1. Faz Açısı Denetim Yöntemi**

Faz açısı denetim yönteminde modülasyon indeksi sabit tutulur ve reaktif güç denetimi amacıyla evirici çıkış geriliminin harmoniğinin denetlenmesi için DC-hat geriliminin değişimine izin vermek amacıyla yapılmaktadır. Bunun içinde çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki faz açısı  $\delta$  değiştirilir. Faz kilitleme devresine (FKD) girilen üç faz gerilimlerinden, açısal frekans bilgisi elde edilir. Elde edilen frekans bilgisi kullanılarak akım ve gerilimler dq-eksen bileşenlerine dönüştürülür. Daha sonra dq-eksen bileşenleri kullanılarak elde edilen akım ve gerilim reaktif güç hesaplanması için kullanılır. Referans reaktif güç miktarı ile hesaplanan reaktif gücün farkı alınarak denetleyiciye girilir. Denetleyici çıkışında ise evirici ve şebeke gerilimlerinin temel bileşenleri arasında olması gereken faz farkı bulunur. STATCOM ile şebeke arasında reaktif güç alışverişi sağlanır [42, 44].

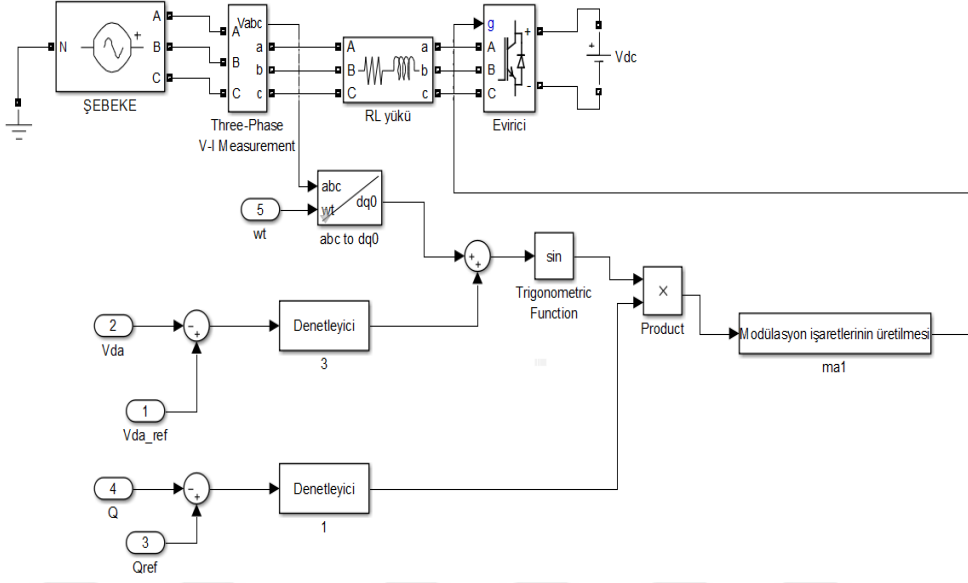


**Şekil 4.13.** Faz açısı denetim blok diyagramı

Faz açısı denetimi içeren sistemin, açık çevrim cevap süresi, bağlantı endüktansı ve DC-hat kondansatörü tarafından belirlenmektedir. Bağlantı endüktansı, dönüştürücü harmoniklerini filtrelemek için kullanılır. Akım ve gerilimin d-q eksen bileşenleri kullanılarak, yüklerin dağıtım şebekesinden çektiği reaktif güç ölçülür. Ölçülen reaktif güç ile referans güç karşılaştırılarak reaktif güç hatası PI, YSA, Fuzzy, ANFIS gibi bir denetleyiciye uygulanır. Denetleyicinin çıkışında evirici geriliminin faz açısı belirlenmektedir [42].

#### 4.4.2. Doğrudan Akım Denetim Yöntemi

Bu yöntem; anlık  $p$ - $q$  teorisi üç faz büyüklüklerin,  $\alpha$ - $\beta$  çatıdaki iki faz büyüklüklerine dönüşmesine ve aktif ve reaktif gücün bu değerlere göre hesaplanmasına dayanır. DA-hat gerilim denetleyicisinin çıkışında DA-hat geriliminin sabit kalabilmesi için gerekli olan aktif güç miktarı ( $P_{ref}$ ) belirlenir. Şebeke gerilimleri Clark dönüşümleri ile  $\alpha\beta 0$  eksenlerine dönüştürülür.  $P_{ref}$ ,  $Q_{ref}$  ve eviricinin üretmesi gereken akımın  $\alpha\beta$ -eksen bileşenleri belirlenir [43].



Şekil 4.15. Sabit DA-Hat gerilim blog diyagramı

#### 4.4.4. Dolaylı Akım Denetim Yöntemi

Dolaylı akım denetim uygulamasında DC gerilim sabit tutulur ve dönüştürücünün üretmesi gereken referans gerilimler aktif ve reaktif güce göre elde edilir.

Dolaylı akım denetim metodunda, iç akım denetim döngüsü kullanılarak  $d-q$  eksen akımlarının denetimi gerçekleştirilir.  $d-q$ -ekseninde elde edilen STATCOM denklemleri yeni bir çatıya ( $d'q'$ ) dönüştürülür.

$d'q'$ -ekseninde akımlar;

$$i_{d'} = i_d \cos \delta + i_q \sin \delta \quad (43)$$

$$i_{q'} = i_q \cos \delta + i_d \sin \delta \quad (44)$$

şeklinde ifade edilir.

STATCOM akım denetimi için:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_S}{L_S} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_S}{L_S} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_S} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{id} \\ V_{sq} - V_{iq} \end{bmatrix} \quad \text{ifadesi yeni bir çatıya } (d'q') \text{'e}$$

göre düzenlenir ve aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_S}{L_S} i_d + \omega i_q + \frac{1}{L_S} (V_{sd} - V_{id}) \quad (45)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_S}{L_S} i_q - \omega i_d + \frac{1}{L_S} (V_{sq} - V_{iq}) \quad (46)$$

elde edilir. Burada;

$$V_{id} = V_{id} \cos \delta + V_{iq} \sin \delta \quad (47)$$

$$V_{iq} = V_{iq} \cos \delta - V_{id} \sin \delta \quad (48)$$

şeklindedir.

Eviricinin çıkış gerilimi:

$$V_{i_d} = -(\omega L_S i_q + L_S u_q) \quad (49)$$

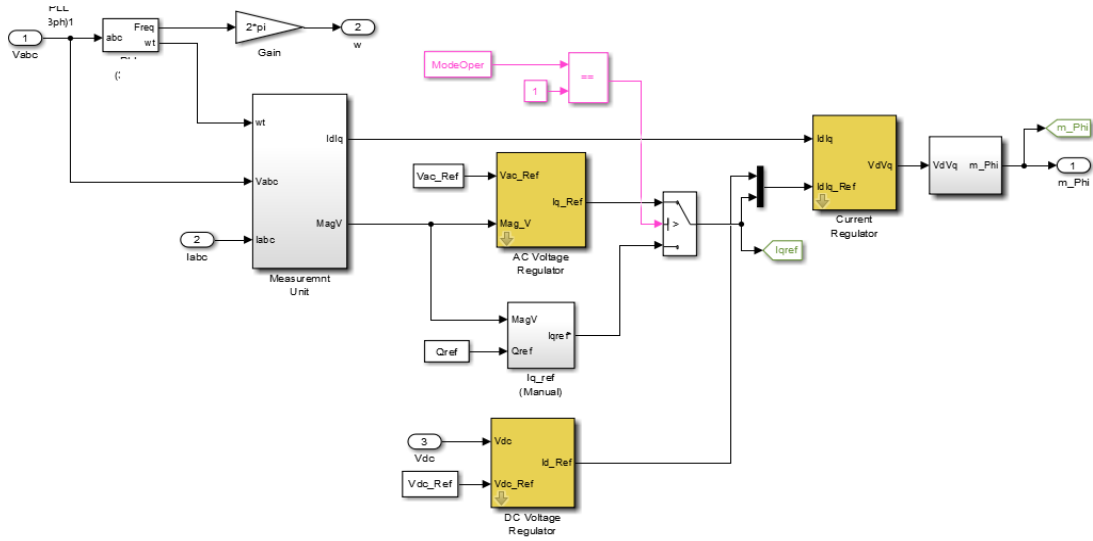
$$V_{i_q} = \omega L_S i_d + V_{sd} - L_S u_d \quad (50)$$

Denetim işaretleri olan  $u_d$  ve  $u_q$  doğrusal bir PI denetleyici tarafından kolaylıkla tanımlanabilir.  $i_d'$  ve  $i_q'$ ; güç sisteminden çekilen  $d$ - $q$  akımlarının referans değeri olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır [43]:

$$\frac{di_d'}{dt} = -\frac{R_S \omega_b i_q}{X} + \omega i_d + \frac{\omega_b}{X} (e_d' - V_{id}) \quad (51)$$

$$\frac{di_q'}{dt} = -\frac{R_S \omega_b i_d}{X} - \omega i_q + \frac{\omega_b}{X} (e_q' - V_{iq}) \quad (52)$$

$i_d'$  ve  $i_q'$ ; güç sisteminden çekilen  $d$ - $q$  akımlarının referans değeri olarak tanımlanır [43].



**Şekil 4.16.** Dolaylı akım denetim yöntemi

Burada aktif güç ve reaktif güç değerlerinin hata değerleri denetleyiciye uygulanarak faz açısı ve genliği elde edilir. Bunun modülasyon indeksi hesaplarında bir referans değeri elde edilir. Bu referans değeri STATCOM eviricisine uygulanır.

#### 4.4.5. Bulanık Mantık Kontrolörü

Bulanık mantığın tarihi gelişim sürecine bakılacak olursa klasik mantığın doğuşundan başlanıp mantığın genel gelişim sürecinde değinmeye başlayarak bulanık mantık anlatılmaya başlanacaktır.

##### 4.4.5.1. Eski Dönemde Mantık

Bu dönemde mantık alanındaki çalışmalarıyla Mozi (Mo Di), Sokrates, Elealı Zenon, Parmenides Aristoteles ve Platon öne çıkan isimlerdir. Mohist akımının kurucusu olan Mozi, doğru mantık yürütme ve sonuç çıkarma üzerine çalışmıştır. Parmenides tarafından çeşitli paradokslar üretilmiş ve zorunlu varlık bilgisini, oluş halinde bulunmayan, değişmeyen ve daima durağan kalan bilgi olarak tanımlamıştır. Sokrates, ilk defa kavram konusu üzerinde durmuştur. Elealı Zenon,



kavramsal düşünce yapısını ve aklın bilgisini esas alarak aklın ilkelerini genel hatlarıyla ele almıştır. Antik Yunan'da Aristoteles tarafından mantık ilminin temelleri atılmıştır. Platon, tümevarımsal teknikler kullanılarak bir varlık modeli oluşturulamayacağı kanaatindedir [45].

#### **4.4.5.2. Modern Dönemde Mantık**

Eski dönemden modern döneme kadar Mantık kavramının temellerini oluşturan bir çok araştırmacı düşünür, mantık alanına katkıda bulunmuştur. De Morgan teorilerini geliştiren Augustus De Morgan'dır. Sembolik mantığın temelini de George Boole atmış ve Boole cebirinin sahibidir. John Venn dairesel şekiller (Venn şeması) yöntemini üretmiştir [45].

#### **4.4.5.3. Bulanık Mantık Dönemi**

Jan Lukasiewicz, 1900'lü yılların başından itibaren Aristo mantığına ilave olarak 2 değer yanına bir üçüncü değer eklemiş ve  $[-1, 0, 1]$  değerlerini kullanmıştır. Sonra 3 değerli yöntemler kabul görmemiştir. Bulanık mantığın ilkeleri ile ilgili çalışmalar yapan Zadeh, bu alanın öncüsü olmuştur. 1965 yılında Zadeh'in yaptığı bir makale çalışmasında bu konu üzerinde durmuştur. Bu tarihten sonra konunun önemi git gide artmış ve günümüzde bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ile ilgili çalışmalar için kullanılan bir matematiksel sistem haline gelmiştir.

Zadeh'in bulanık mantık ilkeleri aşağıda verilmiştir [45]:

- Bulanık mantık da kesin değerler yerine yaklaşık değerlerin kullanımı tercih edilir.
- Bulanık küçük, büyük, orta gibi sözel ifadeler ile anlatılır.
- Bulanık mantıkta bütün değerler  $[0-1]$  aralığında gösterilir.
- Mantıksal bütün ifadeler bulanık ifadelere dönüştürülebilir.
- Matematik açısından zor işlemler için kullanılabilir

Assilion ve Mamdani tarafından 1975 yılında kullanılan bulanık mantık, ilk kez bir buhar makinesinin kontrol sistemine bağlanmasıyla gerçekleşmiştir. 1987

yılında Hitachi firması, metroda bulanık mantık yöntemini kullanmış ve bu çalışmayla %10 enerji tasarrufu sağlandığı gözlenmiştir. Yamaichi Securities'in bulanık mantık temelli akıllı sistemi ile Tokyo borsasında Kara Pazar olarak bilinen krizin sinyallerini kısa bir sürede bildirmiştir. IBM, Matsuhita, Toshiba, Omron, SGS, Thomson gibi firmaların da olduğu 51 şirket, 1989 yılında Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering (LIFE) adlı laboratuvarı kurmuşlar [45].

#### **4.4.5.4. Bulanık Mantığın Avantajları**

Bulanık mantık karmaşık, belirsiz, iyi tanımlanmamış sistemlerin denetimine çözümler getirir. Bulanık mantık denetimi, sisteme daha iyi bir analiz sağlar ve ekonomiktir. Bulanık mantık analizinde yazılım boyutları küçük olduğu için dış bellek ihtiyacı yoktur. Bulanık mantığın bir başka avantaj ise kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanmayı sağlamaktadır.

#### **4.4.6. Bulanık Küme**

Bulanık kümede kişinin karar verdiği şartlar ve boyutlar ne olursa olsun, verdiği kararlar bir belirsizlik ortamı içinde bu işlevi yerine getirmek zorundadır. Verilen kararların doğruluğu ise, söz konusu belirsizliğin riske dönüştürülebildiği ölçüde sağlanır. Ancak karar sürecinde klasik bilimsel yaklaşım ve bu yaklaşımın içerdiği yöntemleri kişi kullanıyorsa, sonuçta verilen kararlar iyi-kötü, güzel-çirkin, doğru-yanlış, siyah-beyaz ya da 0-1 gibi yönlü kararlar olmaktadır[46].

##### **4.4.6.1. Üyelik Fonksiyonları**

Üyelik fonksiyonunda [0,1] arası bir üyelik ağırlığı vardır. Üyelik ağırlığı belli bir değer bir bulanık küme içerisinde yer almasını göstermektedir. Değeri [0-1] aralığında olan gerçek bir A kümesi olarak tanımlandığında,  $\mu_A(x)$  x'in A'daki üyeliğini vermektedir.  $\mu_A(x)$ 'in değeri 1'e yaklaştıkça X'in A kümesindeki üyeliği artar.

X'teki bir A bulanık kümesi

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}$$

A bulanık kümesi, ayrık x uzayının sonlu sayıda x eklenmesi ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ )

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \frac{\mu_A(x_3)}{x_3} \dots \dots \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x)}{x_i} \right\} \quad (53)$$

A bulanık kümesi, sürekli X uzayının sonsuz sayıda x elemanından oluşuyor.

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (54)$$

Burada  $\int$  işareti sürekli değişkenlerin birleşimi anlamına gelmektedir [47].

Üyelik fonksiyonları genelde üçgensel ve yamuk olarak iki şekilde olmaktadır.

$\mu_A(x)$  üçgensel üyelik fonksiyonu, aşağıda denklemle açıklanmıştır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (55)$$

Bu bağıntıya göre  $A = \{a_1, a_2, a_3\}$  olmalıdır. Bulanık mantık a değerinin belli bir  $a_2$  ifadesine yakın değerlerin tespitine göre belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Başka bir ifade ile  $a_2$  deki belirsizlik tolere edilebilir bir a katsayısı ile bulanabilir.

$\mu_A(x)$  yamuk üyelik fonksiyonu aşağıda tanımlanmaktadır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (56)$$

Burada A'nın aralığı  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$  şeklinde 4 değer aralığı olduğu durum yamuk üyelik fonksiyonu olmaktadır [46]

#### 4.4.6.2. Küme İşlemleri

Klasik küme teorisinde karakteristik değer 0-1 aralığındadır. X uzayında tanımlı iki A ve B kümesi düşünelim. Bu fonksiyonların üyelik fonksiyonları  $\mu_A(x)$  ve  $\mu_B(x)$  olsun.  $x \in X$ 'dir.

**Birleşim İşlemi:** İki bulanık kümeden en büyüğünün belirlendiği işlemdir. A U B şeklindedir ve üyelik fonksiyonu ifadesi

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (57)$$

**Kesişim İşlemi:** İki bulanık küme elemanından en küçüğün belirlenip ona göre yapıldığı işlemdir.  $A \cap B$  şeklindedir ve üyelik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (58)$$

**Ters Alma İşlemi:** Bu işlem bulanık kümenin üyelik derecelerinin birden çıkarılması işlemi ile yapılmaktadır.

$$A' \text{ kümesinin üyelik fonksiyonu } \mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (59)$$

A ve B, U evreninde üyelik fonksiyonları sırasıyla ve iki bulanık küme düşünelim. Tümleneyen, birleşim ve kesişim gibi küme işlemlerini, bulanık küme için üyelik fonksiyonları ile oluşturacak olursak, aşağıdaki gibi ifade edilir [47, 48]:

#### Değişme Özelliği

$$A \cup B = B \cup A, A \cap B = B \cap A$$

#### Dağılma Özelliği

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C), A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

#### De Morgan Kuralı

$$(\overline{A \cap B}) = \overline{A} \cup \overline{B} \text{ ve } (\overline{A \cup B}) = \overline{A} \cap \overline{B}$$

#### Yutma Özelliği

$$A \cup (A \cap B) = A, A \cap (A \cup B) = A$$

#### Tek kuvvetli Özelliği

$$A \cup A = A, A \cap A = A$$

#### 4.4.6.3. Bulanık Mantık Kural Tabanı

Bulanık kural tabanında giriş çıkış değerlerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. Tüm girdi ve çıktı değerlerine göre bütün aralıklara göre oluşabilecek bir taban aralığı düzenlenmektedir. Buna göre her bir girdi uzay aralığının karşılığında, bir çıktı uzay aralığına bağlanır. Bu işlemin tamamı bulanık kural tabanını oluşturmaktadır. "Eğer  $x$  A ise, o halde  $y$  B'dir" şeklinde bulanık kural olsun. Bu kural tabanında "Eğer  $x$  A ( $x$ ) ise, o halde  $y$  B ( $y$ )'dir" şeklinde yazılır.

Bulanık mantık kontrol sistemlerinde çok kullanılmaktadır. Kontrol sistemlerinde doğrusal olmayan sistemlerin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Ancak bulanık mantık ile kontrolde gerek duyulmamaktadır. Bulanık mantık sistemlerinde dilsel ifadelerle ele alınmaktadır [49]. Bulanık kontrol, geçici kararlılığını ve aktarım sınırını arttırmak için birbirine bağlı güç sistemlerinin bağlantı hatlarında gerilim desteği sağlamayı amaçlayan gerilim regülasyonu sabit gerilim kontrolüdür [50]. Güç sistemi çalışma durumları değişkenlik gösterir. Bu değişkenlik, yalnız çalışma şartları ve lineer sistem modeline dayanan geleneksel kontrolördeki güç sistemi, kararlılık problemlerini daha çok zorlaştırmaktadır. Bu sebeple geleneksel yaklaşım için bir tamamlayıcı olarak, bulanık mantık kontrol yaklaşımı, son yıllarda daha çok tercih edilmiştir.

#### 4.4.7. Bulanık Mantık Kuramı

Bulanık mantık kuramı, bilgisayarlara insanların sözel verilerini işleyebilme ve onların tecrübelerinden yararlanılarak çalışabilme yeteneğini kazandırırken, sayısal ifadeler yerine sembolik ifadeler kullanır. Bu sembolik ifadelere bulanık mantık kümeleri denilir. Bulanık kurallar, kontrol amacını gerçekleştirmek üzere tasarlanmış bulanık kontrol kurallarını içerir. Bulanık çıkarılma sistemi temel olarak 3 aşamadan oluşur

- Bulanıklaştırma
- Çıkarsama
- Durulaştırma

Bulanıklaştırma: sistemden alınan kesin giriş verilerinin, sözel değişkene dönüştürme işlemidir. Bu aşamada belirlenen üyelik fonksiyonlarından yararlanarak giriş bilgileri, ait olduğu bulanık kümeler ile eşleştirilmekte ve üyelik derecesi belirlenerek sözel değişkenler tespit edilmektedir. Bulanıklaştırıcıya gelen  $x$  ve  $y$  değerlerinin tanımlı Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NO), Sıfır (SS); Pozitif Orta (PO), Pozitif Büyük (PB) bulanık kümelerinde elemanı bulunup bulunmadığı karşılaştırılır [51].

Bulanıklaştırmanın adımları şu şekildedir: Giriş değişkenlerinin ölçüsü olan değişkenin alabileceği değer ölçüsü tespit edilir. Sözü edilen uzaya karşılık gelen ve giriş değişkeninin oranına dönüştüren performans ölçeklemesi yapılır. Belirlenen üyelik fonksiyonları ile giriş verileri uygun sözel değişkenlere ve diğer adımlara aktarılmak suretiyle bulanık veriler hazırlanır [52].

Bulanık denetleyici içinde olan bulanıklaştırma işleminde sayısal değerine karşılık gelen (0-1) değer aralığındaki üyelik dereceleri için her bir sayısal değere sözel olarak karşılığı bulunmaktadır. Kural tabanlı çıkarım biriminde, bulanıklaştırma biriminden gelen sayısal değerleri sözel taban kuralına göre bir bulanık mantık çıkışı elde edilmektedir ve bu en önemli kısımdır. Durulaştırma biriminde kural tabanlı çıkarım mekanizmasından gelen bulanık ifadelerin toplamı sisteme uygulanabilecek sayısal ifadelere dönüştürülür.

#### **4.4.7.1. Mamdani Çıkarım Yöntemi**

En çok kullanılan bulanık mantık yöntemidir. Bunun sebepleri insan algısına daha çok hitap etmesi, tasarımının nispeten kolay olması ve yorumlanabilme oranının yüksek olmasıdır. Bu yöntem ilk kez 1975 yılında Londra Üniversitesinde çalışan matematikçi ve bilgisayar bilimci olan İbrahim Mamdani tarafından geliştirilmiştir. İlk defa insan tecrübesinden elde edilen sözel kontrol kuralları yardımıyla bir buhar motoru oluşturulmuştur.

Mamdani tipi bulanık mantık 5 adımdan oluşur:

- Girdilerin bulanıklaştırılması. Yani girişteki bütün bulanık ifadeleri girdi olarak kullanılması

- 0 ile 1 arasında değişen üyeliklerin belirlenmesi
- Bulanık küme mantıksal işlemlerin (ve, veya, değil gibi) uygulanması
- Her kuralın ayrı ayrı çıktısı alınarak toplamsal bir bulanık küme oluşturma
- Bulanık işlemler kullanılarak kural ağırlıklarının belirlenmesi [53].

Şekil 3.16'de x ve y iki girişli Mamdani bulanık mantığıyla z çıkış değerinin küme fonksiyonundan nasıl bulunduğu gösterilmektedir.

Kural 1: Eğer x=A1 VE y=B1 ise z=C1

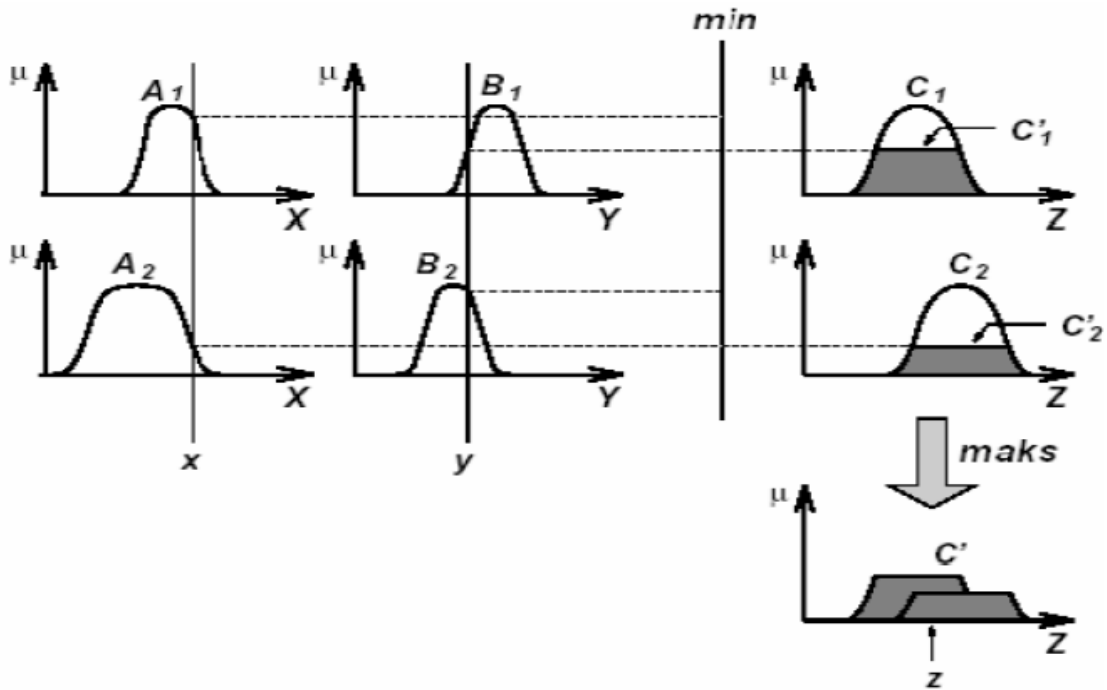
Kural 2: Eğer x=A2 VE y=B2 ise z=C2

C' çıkarım sonucu Ci'lerin toplamıdır.

$$\mu_{c'}(g) = \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i} \wedge \mu_{B_i}] = \bigvee_{i=1}^n \mu_{C_i}(g) \quad (60)$$

$$C' = \bigcup_{i=1}^n C_i$$

elde edilir [53].



Şekil 4.17. Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla minimum ve maksimumunu gösteren Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi [48,53]

#### 4.4.7.2 Takagi-Sugeno Yöntemi

Takagi- Sugeno bulanık mantık veya Sugeno bulanık mantık, ilk kez 1985 yılında kullanılmıştır. Girdi değişkenlerinin bulanıklaştırılması, Mamdani bulanık modeli ile aynıdır. İki yöntem arasındaki fark, çıktı üyelik fonksiyonudur. Sugeno da çıkış fonksiyonları lineer ve sabittir. Çıktı üyelik fonksiyonları sabit olduğunda sıfıncı derece olarak ve birinci derece olduğunda birinci derece sugeno olarak adlandırılmaktadır. Böylece Sugeno, Mamdani yöntemine göre daha karmaşıktır ve gösterim açısından elverişlidir. Bu sebepten Sugeno yöntemi uyarlanabilir sistemlerde kullanılır. Bir tek dereceli sugeno yöntemi ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\text{Eğer } x=A \text{ ve } y=B, \text{ ise } z=f(x,y)=px+qy+r(c) \quad (61)$$

Burada A ve B, x ve y üyelik fonksiyonları için tanımlanan giriş kısmındaki p, q ve r ise soncul parametredir ve her biri için bir çıkış elde edilmektedir [50]. Genellikle  $f(x, y)$  gibi burada  $f$ , x ve y girdilerinde bir polinomdur ve bundan dolayı tekil değerlerde bu yöntem çalışır [50].

#### 4.4.7.3. Larsen Çıkarım Yöntemi

Bu yöntem bulanıklaştırma için  $R_p$  çarpım işlemcisini, bileşke içinde çarpım işlemcisini kullanır.  $i=1,2,\dots,n$  olmak üzere  $R_i$  : Eğer e  $A_i$  ve f  $B_i$  ise g  $C_i$ ' dir.

Kural tabanı için;

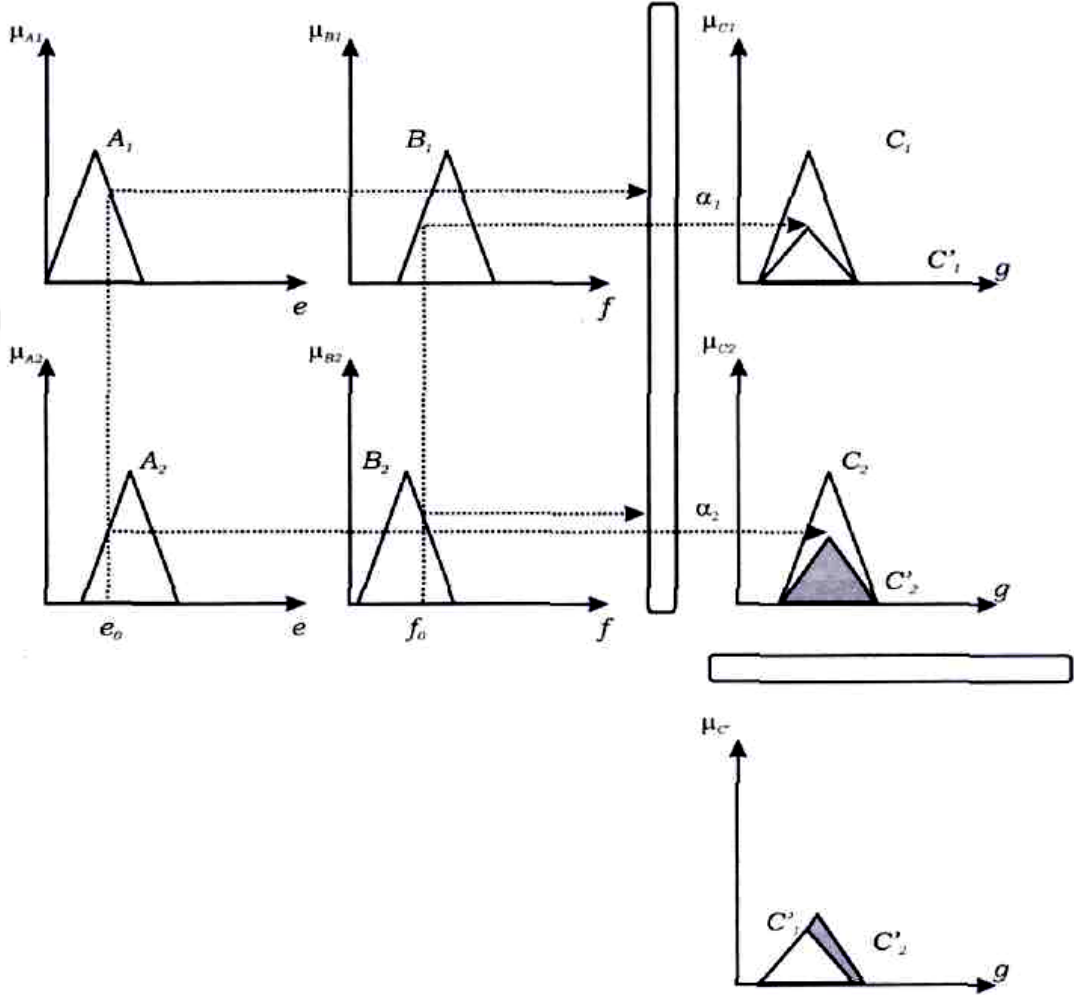
$$R_i=(A_i \text{ ve } B_i) \rightarrow C_i ; \mu_{A_i \text{ ve } B_i \Rightarrow C_i}^1(e, f, g) \quad (62)$$

Tekillik girdi verisi  $e=e_0$ ,  $f=f_0$  olarak verilince, tekillik girdisi için  $C_i$ ;  $A_i$  ve  $B_i$ 'nin en küçük eşleme derecesi belirlenir. Girdiler  $A'=e_0$  ve  $B'=f_0$  ise  $a_i$  değeri için  $\mu_{A_i}(e_0)$  ve  $\mu_{B_i}(f_0)$  arasında en küçük değerdir önermesinde,

$$\mu'_{C_i}(g) = [\mu_{A_i}(e_0) \text{ ve } \mu_{B_i}(f_0)] \rightarrow \mu_{C_i}(g) \quad (63)$$



$a_i = \mu_{A_i}(e_0) \wedge \mu_{B_i}(g_0)$  olduğunda  $\mu'_{C_i}(g) = a_i \cdot \mu_{C_i}(g)$  sonucu karşımıza çıkmaktadır.  $C'$  toplam sonucu bireysel  $C'_i$  sonuçların toplamıdır.  $C'$  çıkarım sonucu bireysel sonuçlardan elde edilen  $C'_i$  sonuçların toplamıdır.  $C'$  çıkarım sonucu bireysel sonuçlardan elde edilen  $C'_i$  sonuçların toplamıdır.



**Şekil 4.18.** Larsen Çıkarım yöntemi başlangıç gösterimi

$$\mu_c(g) = \bigvee_{i=1}^n [a_i \cdot \mu_{C_i}(g)] = \bigvee_{i=1}^n \mu'_{C_i}(g) \quad (64)$$

$$C' = \bigcup_{i=1}^n C'_i$$

elde edilmiştir [53].

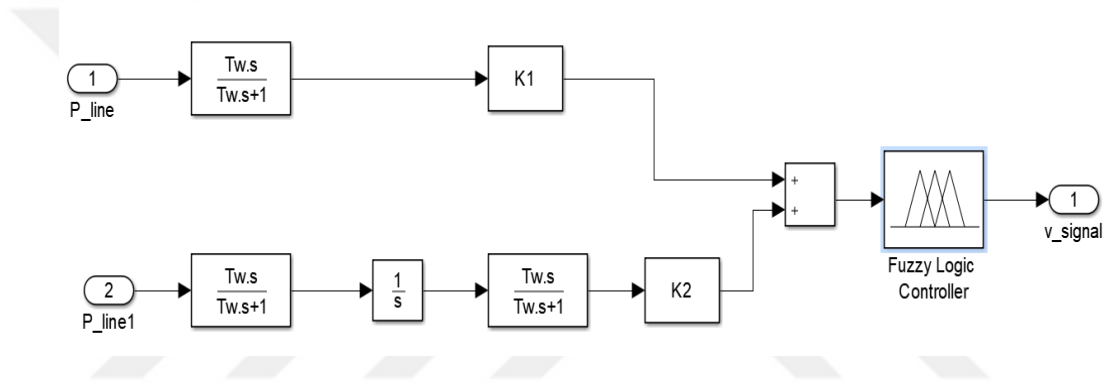
$$Z_i = (\mu_{x_i}(u) \cap \mu_{y_i}(v)) \cap \mu_{z_i}(w) \quad (65)$$

$$Z_i = (\mu_{xi}(u) \cap \mu_{yi}(v)) \times \mu_{zi}(w) \quad (66)$$

$$Z_i = f^{-1}\mu_{zi}(ai) = f^{-1}\mu_{zi}(\mu_{xi}(v) \cap \mu_{yi}(v)) \quad (67)$$

Burada,  $\mu_x$  ve  $\mu_y$  giriş üyelik fonksiyonlarını  $\mu_z$  çıkış fonksiyonuna göre bir  $Z$  çıkarım sonucunu ve  $i$  sırasını ifade etmektedir.  $n$  adet toplam çıkarım sonucu toplam çıkarım değerlerinin bir bileşkesi sonucu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$Z = \cup_{i=1}^n Z_i \quad (68)$$

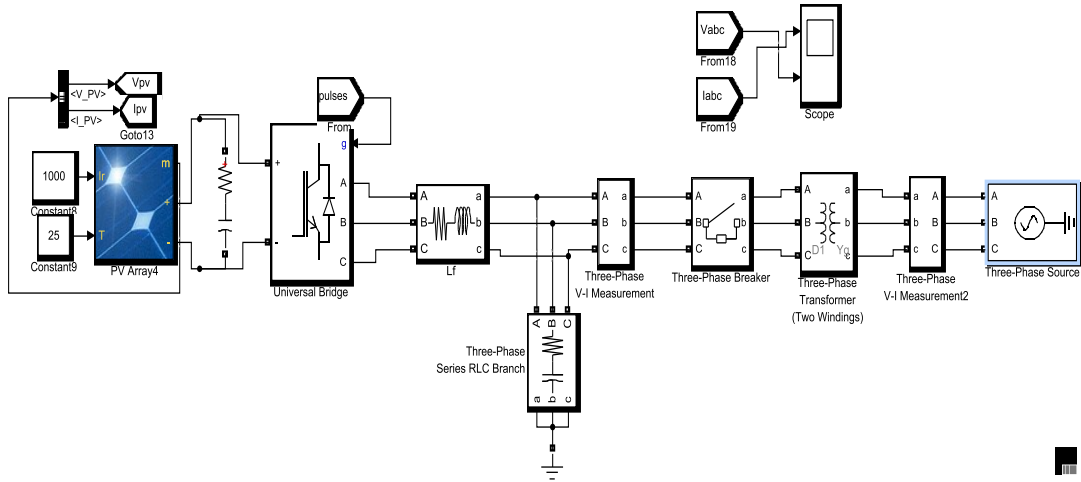


**Şekil 4.19.** Fuzzy toplamsal denetleme modeli

STATCOM için tasarlanan bulanık mantık temelli kontrolörü için giriş ve çıkış fonksiyonları belirlenmiştir. İki girişli tek çıkışlıdır. İki girişimiz  $Q\_error$  ve  $P\_error$  için girdiler tanımlanmıştır ve çıkışta modülasyon indeksi ve kayma için bir çıkış alınır. Modülasyon indeksi ve kayma işlenerek abc ye döndürülür. Bir referans değer elde edilir. Referans değer PWM e gönderilir ve bir işaret çıkışı alınıp STATCOM'un gate ucuna bağlanır. STATCOM kontrolü sağlanmış olacaktır.

## 5. SİSTEM MODELLEMESİ

Bu tez çalışmasında, PV güneş sistemine bağlı gerilim kontrolü ve reaktif güç kontrolünü sağlayan bir STATCOM'un MATLAB/SIMULINK kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. STATCOM'un denetimi PI denetleyici ve Bulanık Mantık ile gerçekleştirilmiş ve benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 5.1'de MATLAB/SIMULINK'te oluşturulan PV-STATCOM'un devre modeli verilmiştir.



Şekil 5.1. PV sistemin MATLAB'da modellenmesi

Simülasyonda kullanılan PV santralde, Sun Earth Solar Power TP8156×156-72-P 250 W marka panel kullanılmıştır. Panel şebekeye STATCOM üzerinden bağlanmış, STATCOM inverter olarak kullanılmaktadır. Bu eviriciye 26 seri 36 paralel olmak üzere toplam 936 adet panel bağlanmıştır. Şekil 5.2'de simülasyonda kullanılan panele girilen değerler ve Şekil 2.3'te PV panelin standart koşullardaki akım ve gerilim grafiği gösterilmiştir.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi STATCOM'un bağlı olduğu PV sistemin DC gerilimi, seri bağlı panel sayısının panelin maksimum gerilimi ile çarpımından elde edilmektedir. DC gerilim değeri ise 26 ile 34.4'ün çarpımından yaklaşık 900 V olarak belirlenmiştir.

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.  
Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings  
36

Series-connected modules per string  
26

Module data

Module: Sun Earth Solar Power TPB156x156-72-P 250W

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
250.088	72
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
43.4	7.89
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
34.4	7.27
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.34	0.07

Display I-V and P-V characteristics of ...  
array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m2) [ 1000 500 250 ]

Plot

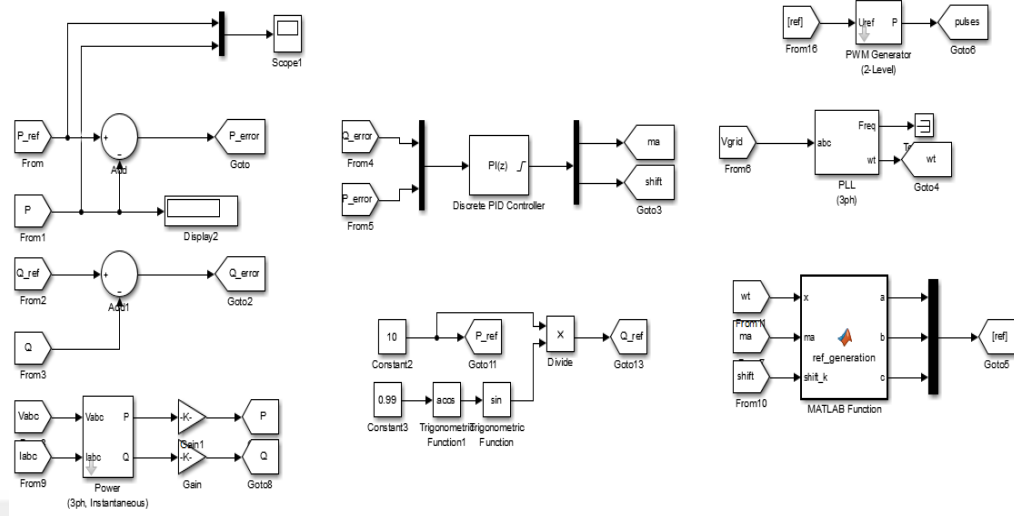
Model parameters

Light-generated current IL (A)	7.9163
Diode saturation current I0 (A)	1.3196e-10
Diode ideality factor	0.9467
Shunt resistance Rsh (ohms)	159.1067
Series resistance Rs (ohms)	0.53082

OK Cancel Help Apply

**Şekil 5.2.** PV array ayarları

Panel çıkışından alınan DC gerilimi, AC gerilime dönüştürmek için inverter bağlantısı yapılmaktadır. Simülasyonda üç köprülü gerilim kontrollü inverter kullanılmıştır. İnverter kontrolü için genellikle VSC kontrolü kullanılırken sistemin daha verimli çalışmasını sağlayacak STATCOM elemanı kullanılmıştır. Kullanılan STATCOM kontrol çıkışında elde edilen modülasyon indeksi ile evirici için anahtarlama darbeleri üretilir. Denetim bloğunun benzetimi Şekil 5.3'de verilmiştir.



**Şekil 5.3.** STATCOM kontrol kısmı

Şekil 5.3'te STATCOM kontrolü gösterilmiştir. İlk olarak denetlenen bloğun akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Ölçülen  $V_{abc}$  ve  $I_{abc}$ 'den şebeke aktif ve reaktif gücü elde edilmiş, şebeke gerilimi PLL bloğuna bağlanmıştır. PLL, STATCOM'un bağlı olduğu fazın geriliminin ana bileşeni sıfır noktasına göre ayarlanmıştır. Yani a fazının frekansını ve açılal hızını belirlemiştir. Aktif güç için bir referans değer belirlenmiş, daha sonra güç faktörü  $\cos(\theta)$  0.99 olarak ayarlanarak, reaktif güç kontrolünün sağlanması için  $\cos(\theta)$  0.99'a göre bir reaktif güç referans değeri elde edilmiştir. Ölçülen aktif ve reaktif güç ile referans olarak belirlenen aktif ve reaktif güç karşılaştırılarak hata sabit değerleri PI denetleyiciden geçirilerek modülasyon indeksi ve kayma çıkışları elde edilmiştir. Bu değerler sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda kullanılan modülasyon indeksi ve kayma açısı değerleri de kullanılarak  $a b c$  dönüşümü yapılmıştır. Bu dönüşüm aşağıda verilmiştir:

$$V_{ra} = A \cdot \sin(\omega t + \delta + 0^\circ) \quad (69)$$

$$V_{rb} = A \cdot \sin(\omega t + \delta - 120^\circ) \quad (70)$$

$$V_{rc} = A \cdot \sin(\omega t + \delta + 120^\circ) \quad (71)$$

Bu dönüşümün çıkışından alınan referans değer PWM jeneratöre gönderilir, çıkışından evirici için anahtarlama darbe işareti üretilir ve invertere bağlanmıştır. SPWM jeneratörün frekansı 1000 Hz ayarlanarak yüksek frekanslı harmoniklerin ve gürültülerin yok edilmesi sağlanmış olur.

### 5.1. LCL Filtre Hesabı

DC gerilimi, evirici ile alternatif akıma dönüştürüldükten sonra elde edilen gerilim, LCL yardımı ile düzenlenmiştir. LCL filtre tasarımı yapılırken,

$$P_{min} = 10000 \text{ W}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$V = 400 \text{ V}$$

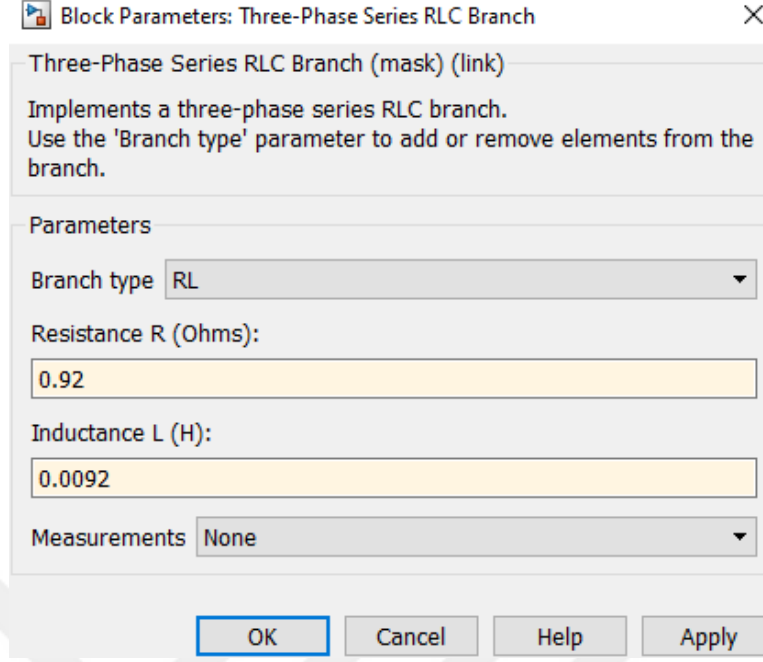
$$L_f = (0.1 * V^2) / (2 * \pi * f * P_{min}) \quad (72)$$

$$R_f = 100 * L_f \quad (73)$$

Denklemler 69 ve 70 yardımıyla inverter çıkışı  $L_f$  ve  $R_f$  değerleri

$$L_f = (0.1 * 400^2) / (2 * 3.14 * 50 * 10000) = 9.2 \text{ mH}$$

$R_f = 0.92 \text{ } \Omega$  olarak hesaplanmış ve Şekil 5.4'te gösterildiği gibi endüktans bloğuna değerler girilmiştir.



Şekil 5.4. MATLAB/SIMULINK endüktans bloğu

LCL filtrenin kapasitör hesabında

$$Z_b = V^2 / P_{min} \quad (74)$$

$$C_b = 1/2 * \pi * f * Z_b \quad (75)$$

dir.

Filtre kapasitesinin tasarımı sırasında güç faktörü maksimum %5 olarak düşünülür.

Bu hesaplanan baz kapasitesinin %5'ine denktir. Bu durumda;

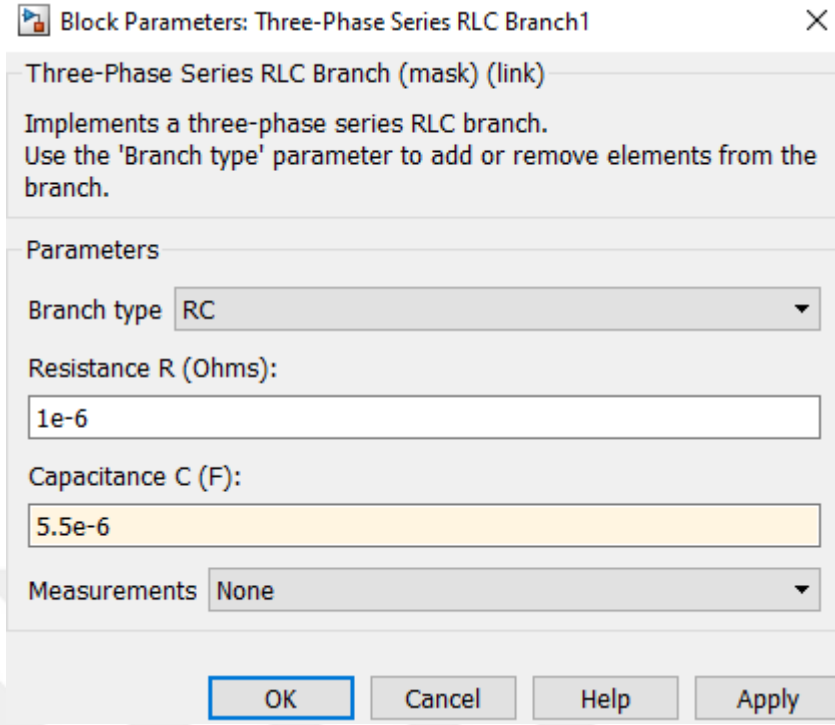
$$C_{fmax} = 0.05 * C_b \quad (76)$$

Denklem 72 ve 73 yardımıyla

$$C_{fmax} = (0.05 * P_{min}) / (2 * \pi * f * V^2) = (0.05 * 10000) / (2 * 3.14 * 50 * 400^2) = 5.5 \mu F$$

olur.

Şekil 5.5'te gösterildiği gibi kapasitans bloğu girilmiştir.



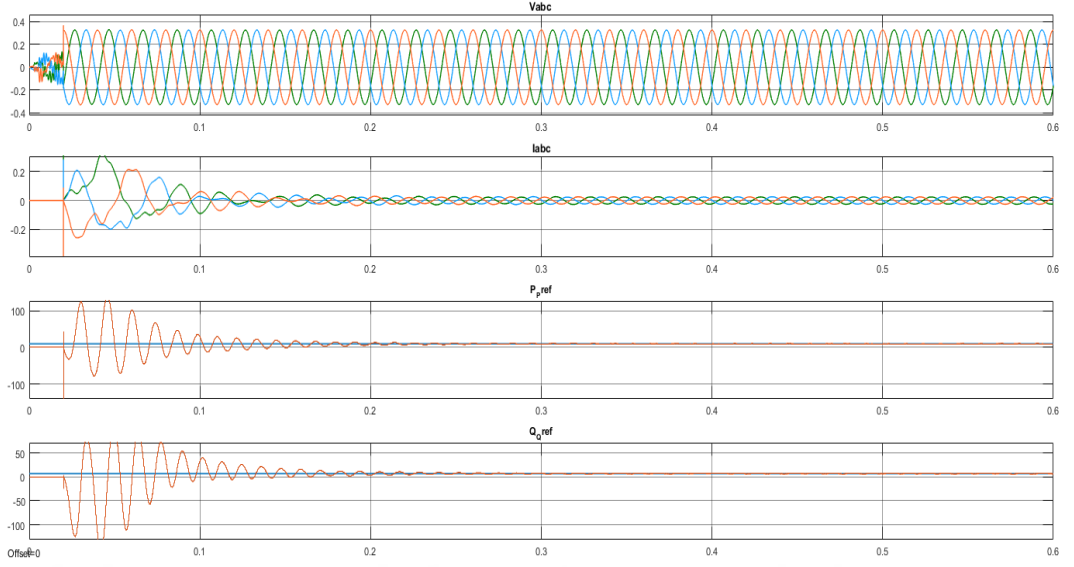
Şekil 5.5. MATLAB/SIMULINK kapasitans bloğu

## 5.2. PI Kontrolör ile Yapılan Sistem Grafikleri

Bir dağıtım sisteminde STATCOM'un bara geriliminin değerindeki değişmelere bağlı olarak cevap verme süresi ile referans güç değeri değişimi durumunda kompanze etme süresini incelemektedir. Ayrıca frekans değiştirilme durumundaki cevabı, sisteme yükler eklendiğinde cevap verme durumu ve  $\cos(\delta)$  değerinin değiştirilmesindeki cevabı incelemektedir.

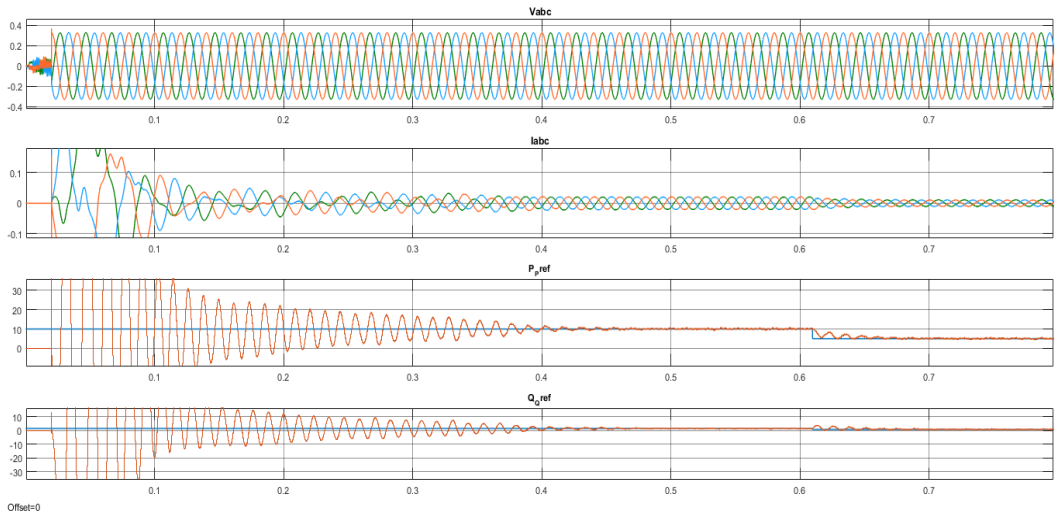
Şekil 5.1'deki benzetim çalıştırıldığında, Şekil 5.6'da görüldüğü gibi gerilim, akım ve güç değerleri değişimleri gerçekleşmektedir.





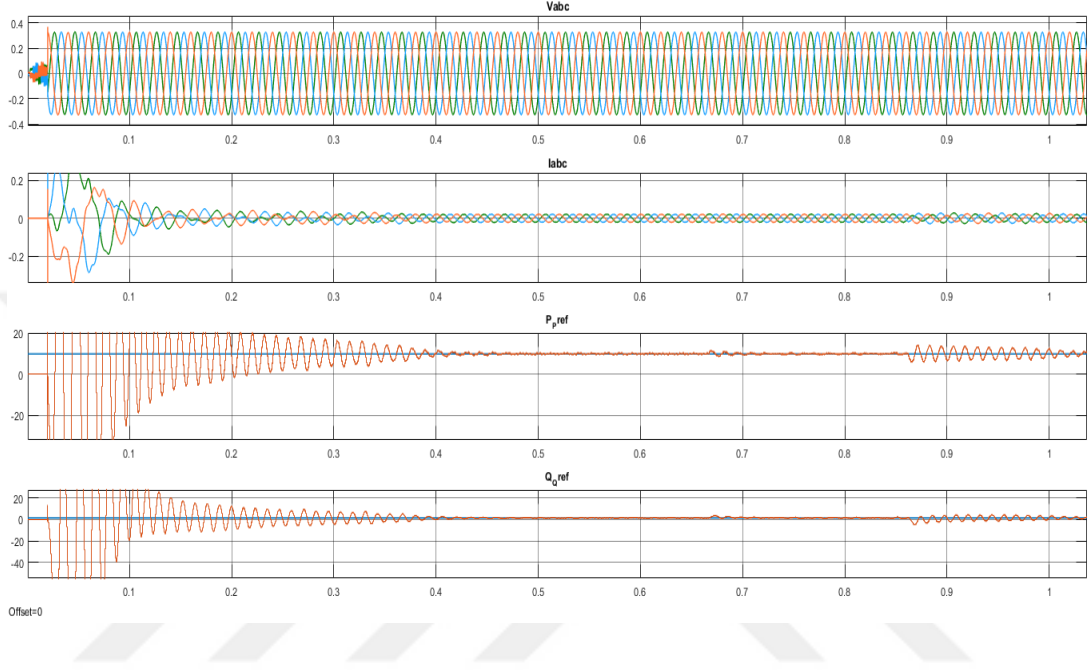
**Şekil 5.6.** Sistemin gerilim, akım ve güç değişimleri

Burada aktif ve reaktif güç değişimi grafiklerine bakıldığında, hata değerlerinin 380 ms’de aktif güç 10 kW referans değerine, reaktif güç ise referans değer olan 1.41 kW referans değerine ulaşmakta ve hata değeri sıfırlanmaktadır. Akım ve gerilim grafiklerine bakıldığında STATCOM’un kompanzasyon akımının tamamını karşıladığı için akım ve gerilim aynı fazda olmaktadır. İletim hattından kontrollü reaktif güç çekip gerilim kontrolü yapılmaktadır. Sistem modelinde referans güç değeri 5 kW değerine indirildiğinde kompanze etme hızı Şekil 5.7’de gözlenmiştir.



**Şekil 5.7.** Referans gücün değiştirilmesi durumundaki değişim

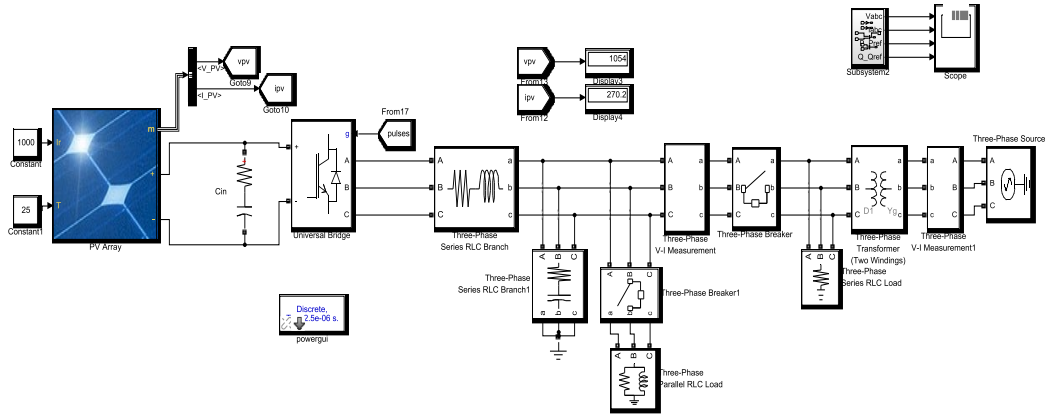
Grafikte görüldüğü üzere referans güç değişimi yapıldığında sistemin tekrar toparlanma hızı yani kompanze edebilme süresi yaklaşık 70 ms’de gerçekleşmektedir. Şekil 5.8’de güneş ışık miktarı değişikçe, sistemdeki gerilim, akım, aktif ve reaktif gücün nasıl değiştiği gösterilmektedir.



**Şekil 5.8.** Sistemin parlaklık oranının değişimi durumunda gözlenen değişim

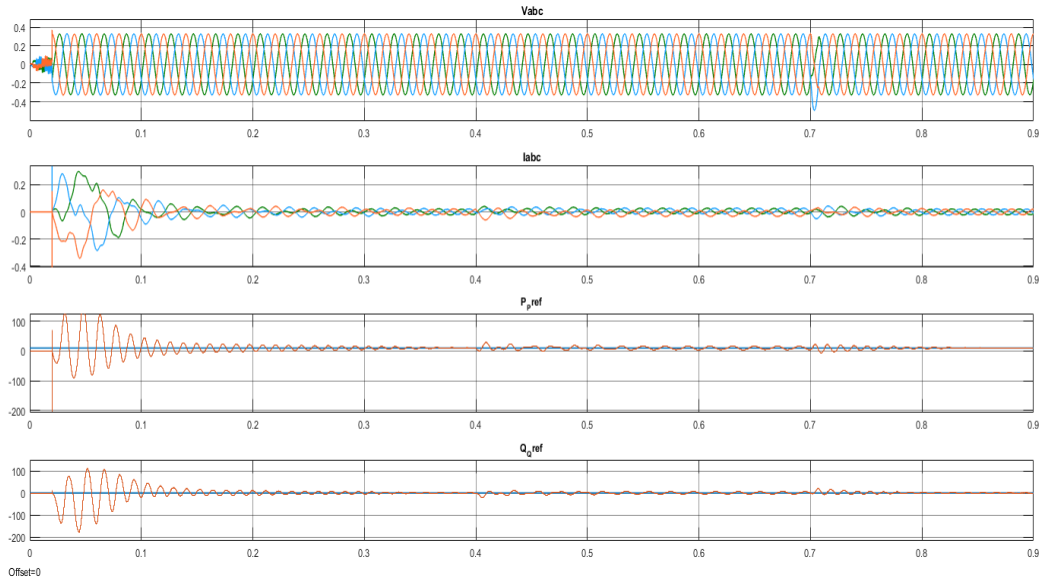
Şekil 5.8’de verilen grafiklerde görüldüğü üzere, güneşten alınan ışık miktarı başlangıçta  $1000 \text{ W/m}^2$  olduğu durumda sistemin aktif gücün referans değere ulaşma süresi 600 ms iken reaktif gücün referans değere ulaşma süresi 500 ms’de gerçekleşmiştir. Bunun nedeni olarak aktif güç üretim miktarı artacak istediğimiz değere gelme süresi reaktif güce göre az bir miktarda uzun olduğu görülmüştür. Daha sonra ışık miktarını  $500 \text{ W/m}^2$  olarak ayarlandığı yaklaşık 100 ms aktif güç referans değere ulaşırken reaktif güç 50 ms’de olduğu gözlenmiştir. Daha sonra ışık miktarı  $2000 \text{ W/m}^2$  olduğunda yaklaşık 160 ms’de referans değere ulaştığı gözlenmiştir.

Şekil 5.9’da Şekil 5.1’deki sistem modeline 0.4 sn de endüktif yük bağlantısı yapıldığında kompanze etme hızı gözlenmiştir.



**Şekil 5.9.** RL yükü eklendiğinde MATLAB modeli

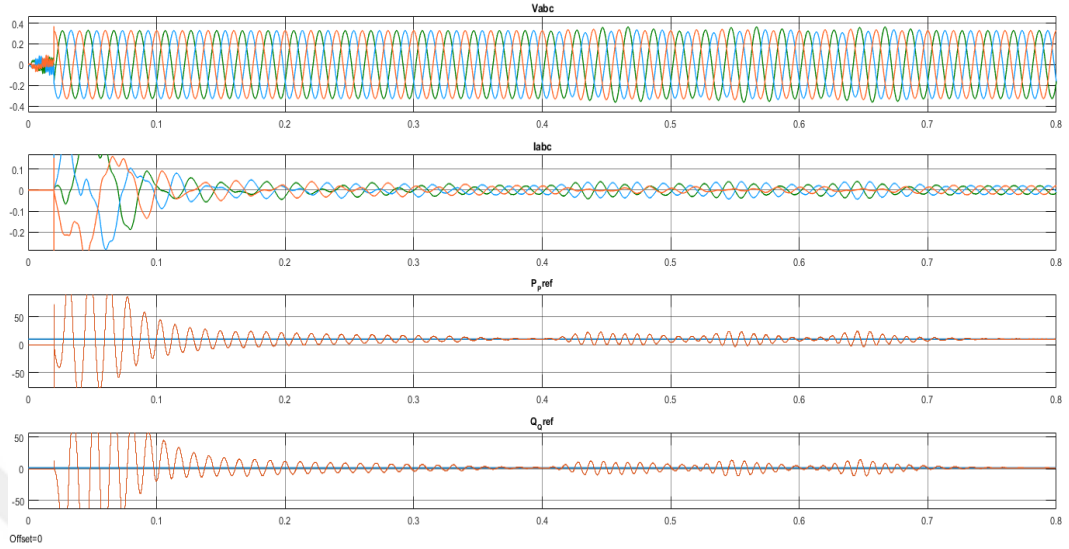
Şekil 5.9’da görüldüğü gibi endüktif yükün etkisini görebilmek için 0.4 sn’de sisteme endüktif yük girilerek sisteme etkisi Şekil 5.10’daki grafikte gözlenmiştir.



**Şekil 5.10.** RL yükü eklendiğinde görülen gerilim, akım ve güç değişimleri

Şekil 5.10’da görüldüğü üzere 0.4 sn’de endüktif reaktif yük etkisi ile aktif ve reaktif güç için belirlenen referans değerlere yaklaşık 420 ms’de ulaşılmıştır. Bu durumun nedeni sisteme eklenen endüktif yükün reaktif güç bileşenine etkisiyle reaktif güçte ani bir artış olmuştur. Burada rezistif yükten gelen az bir reaktif güce ek olarak bir endüktif yükten de gelen reaktif güç etkisiyle çift yüklenme sağlanarak süre uzamıştır.

Sistemin frekansı 0.4 sn'de 60 Hz'e çıkarıldığında meydana gelen değişim Şekil 5.11'de olduğu gibi gözlenmiştir.



**Şekil 5.11.** Frekans değişikliğinde elde edilen gerilim, akım, güç değerleri gösterimi

Sistemin frekansı önce 50 Hz iken 0.4 sn'de sistemin frekansını 60 Hz yaptığımızda yaklaşık 370 ms'de istenilen referans değere aktif ve reaktif güç ulaşır. Bunun nedeni, frekans değeri artınca sistemde reaktif güce etki eden indüktör ve kapasitör elemanlarının değerleri artmış ve buna bağlı olarak reaktif güç artmıştır. Reaktif güç artınca referans değere gelme süresi de uzamıştır. Bu durum  $RL$  ve  $RC$  yükleri  $X_L = 2 * \pi * f * L$  ve  $X_C = 1 / 2 * \pi * f * C$  şeklinde formüle edilmiştir.

Diğer bir durumda ise,  $\cos(\theta)$  0.7'ye düştüğünde sistemin tekrar kompanze edebilme süresine bakılmıştır.  $\cos(\theta)$ 'nın 0.7 düştüğü durum, endüktans (L) değerinin değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Yeni L hesabında:

$$P = 250 \text{ kW}$$

$$\cos(\theta) = 0.7$$

$$V_{\text{hat}} = 34.5 \text{ kV}$$

$Q = P * \tan(\theta)$  ifadesi güç üçgeninde görülmektedir.

$$Q = 250 * \tan(45.572) = 255 \text{ kW}$$

Üç fazlı sistemde  $Q = \sqrt{3} * V_{\text{hat}} * I_{\text{hat}} * \sin(\theta)$ 'dir. Sistemdeki transformatörün primer ucu yıldız bağlıdır. Sekonder tarafı ise üçgen bağlıdır. Hat gerilimi yıldız bağlantıdan üçgen bağlantıya dönüşümü yapılarak sistem beslenmektedir. Bu sebeple yıldız-üçgen dönüşümü yapılmıştır. Üçgen bağlantıda  $U_h=U_f$  ve  $I_h=\sqrt{3}*I_f$ 'dir.

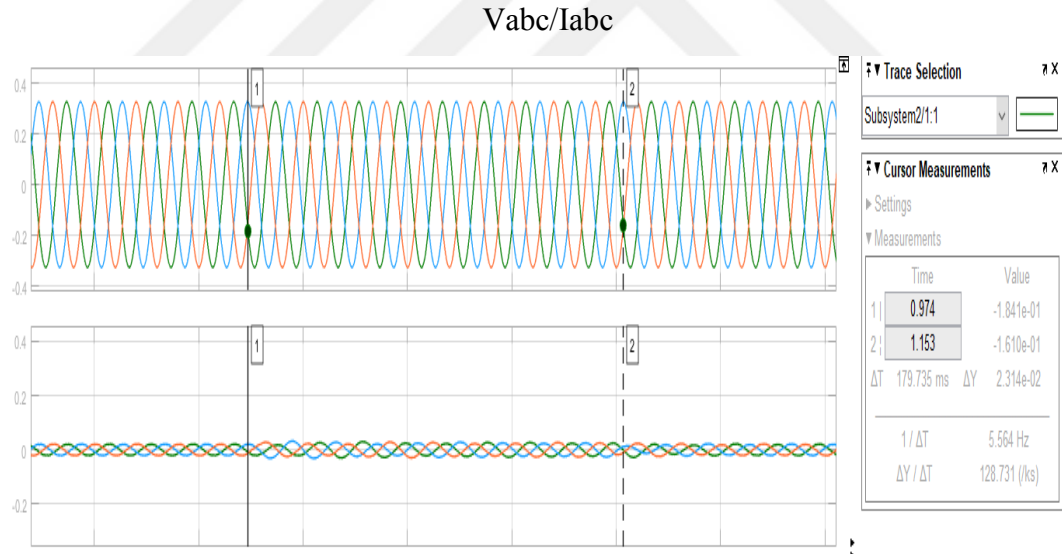
$$I_h = \sqrt{3} * U_h / X_L$$

$$X_L = \omega * L$$

$$Q = \sqrt{3} * U_h * \sqrt{3} * \frac{U_h}{\omega L} \text{ ifadesinden } L \text{ 'yi çekersek,}$$

$$L = \frac{Q * \omega}{3 * V_h^2} \text{ olarak hesaplanır.}$$

$L = 255000 * 314 / 3 * (34500)^2 = 0.0224$  H olur. Burada L değeri sisteme uygulandığında Şekil 4.12'de görüldüğü gibi olmaktadır.

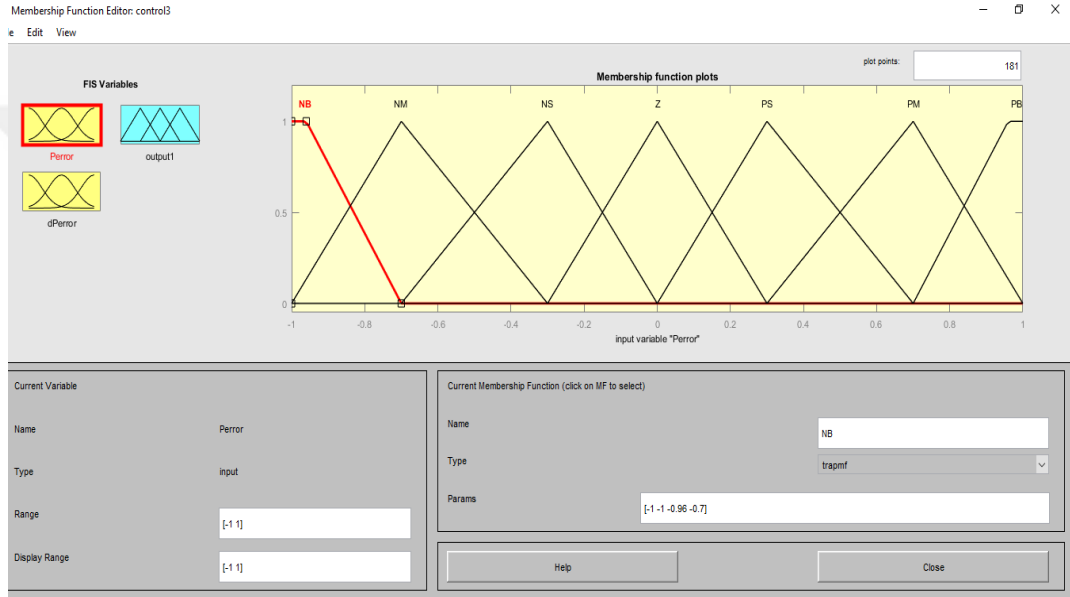


**Şekil 5.12**  $\cos(\theta)$ 'nin değişiminde elde edilen 1.si Vabc ve 2.si Iabc değişimi

Şekil 5.12'de sistem 0 ile 97 ms arasında  $\cos(\theta)$ 'nin değeri yaklaşık 1'dir. Endüktans değeri 97 ms'den sonra girildiğinde tekrar kompanze edilmesi yaklaşık 180 ms'de güç faktörü 1 durumuna gelmiştir. Yani faz farkı ortadan kalkmıştır.

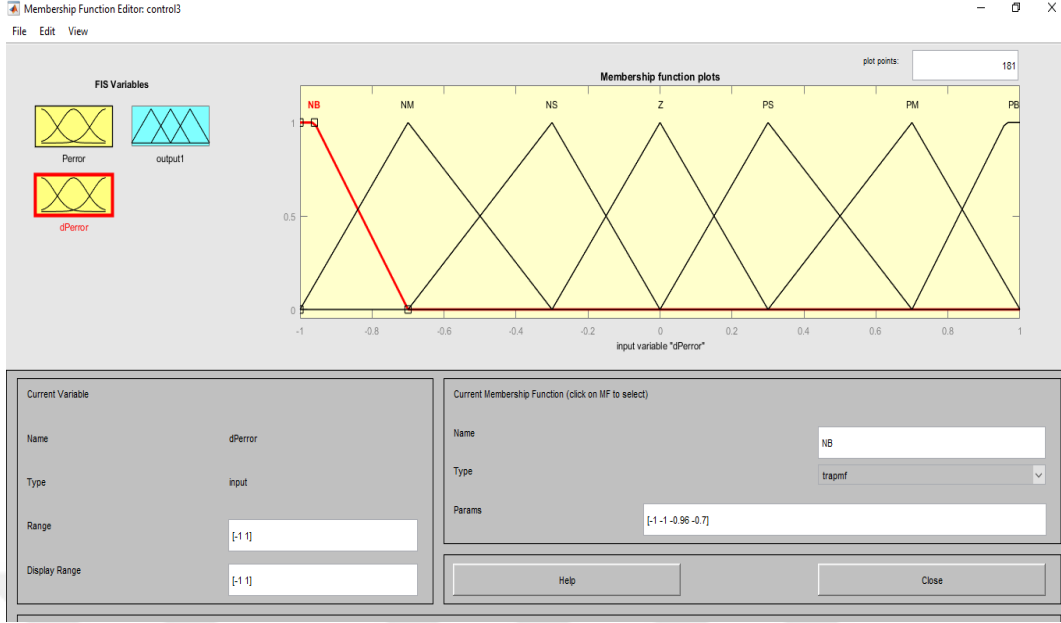
### 5.3. FUZZY ile Kontrol Sistemi ve Aşamaları

Bulanık mantıkta üyelik işlevinden faydalanılarak alınan giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık kümeler ve üyelik dereceleri tespit edilir. Elde edilen değerler en küçük, küçük, sıfır, orta, büyük, en büyük gibi sözel olarak ifade edilir. Burada kontrol sistemi üç aşamada incelenmiştir. Bunlardan ilki  $P\_error$  fuzzy ayarıdır. Bu sistemin üyelik fonksiyonları aşağıda verilmiştir:



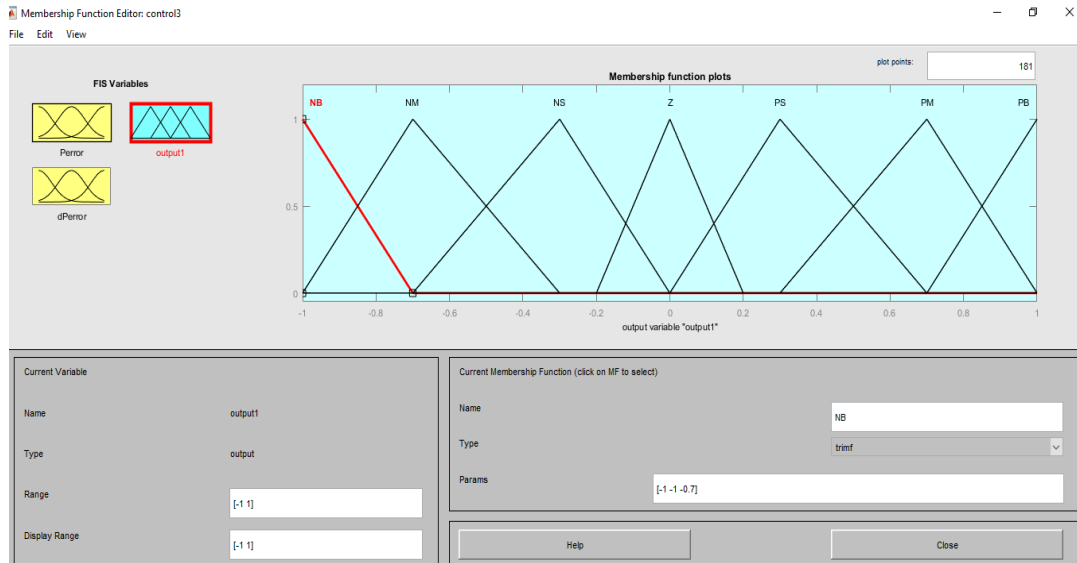
Şekil 5.13.  $P\_error$  giriş üyelik fonksiyonu

Şekil 5.13'te  $P\_error$  giriş üyelik fonksiyonları, 7 örnek ilk girişler NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB şeklindedir. Bu çalışmada üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.



**Şekil 5.14.**  $dP\_error/dt$  değişiminin giriş üyelik fonksiyonu

Şekil 5.14’de  $dP\_error/dt$  değişimi için NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB üyelik girdileri verilmiştir. Şekil 5.15’te çıkış üyelik fonksiyonu verilmiş ve çıkış üyeliği 7 örnek değişken olarak yazılmıştır. Daha sonra bu üyelik fonksiyonları karar verme biriminden geçirilerek 49 kural oluşturulmuştur.



**Şekil 5.15.**  $P\_error$ 'un çıkış üyelik fonksiyonu

**Karar verme birimi:** Giriş ve çıkışlar arasındaki bağlantı kural tabanındaki kurallarla sağlanır. If-then mantıksal ifadeleri kullanılarak bulanık değerler belirlenmektedir.

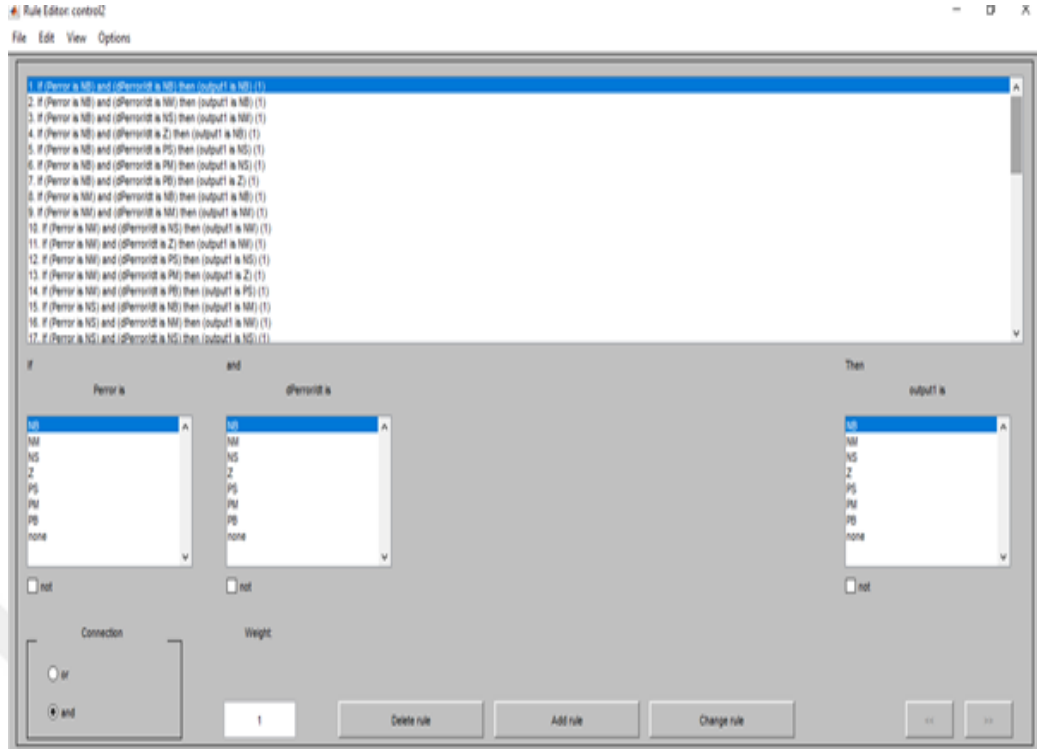
Bu çalışmada planlanan denetleyici için iki giriş seçilmiştir. Bu girişler hata ve hatanın değişimidir. Çalışmada kurallar belirlenirken AND (ve) bulanık operatörü kullanılmıştır. Bu kurallar “Eğer  $e$  NB ve  $\partial e$  PB ise  $u$  Z şeklinde yazılmış, tüm sözel değişkenler kullanılarak 49 kural oluşturulmuştur. Bu kural tablosu Tablo 1’deki gibidir:

**Tablo 1:**  $P\_error/dP\_error$  üyelik girdilerinin çıkış kural tablosu

$e$ $\partial e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NS	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

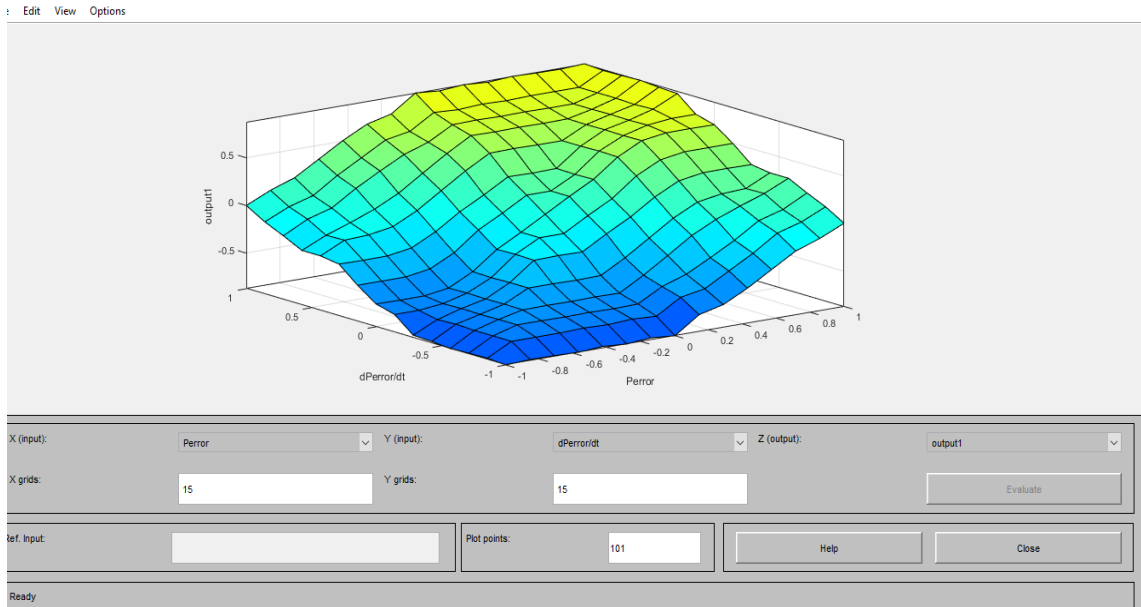
Bulanık mantığın kural işleme biriminde eğer  $P\_error$  NB ve  $d(P\_error)/dt$  NB ise çıkış NB’dir. Bu mantıkla  $7 \times 7 = 49$  örnek yazılmıştır. Şekil 5.16’da sisteme girilen 49 örnek kural işlemi verilmiştir.





Şekil 5.16. Kural tablosunun MATLAB'daki durumu

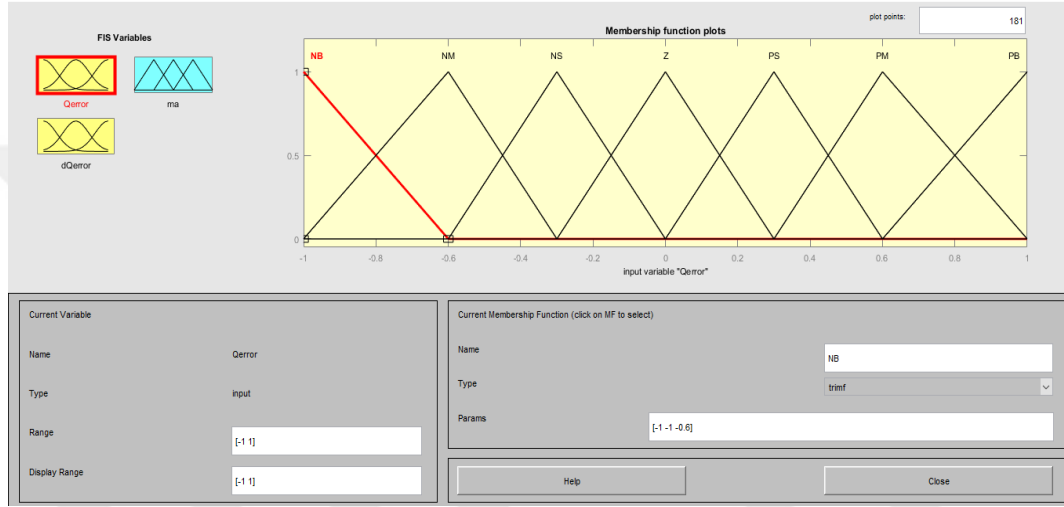
Şekil 5.16'daki kural tablosunun yüzeysel görünümü Şekil 5.17'de elde edilmiştir.



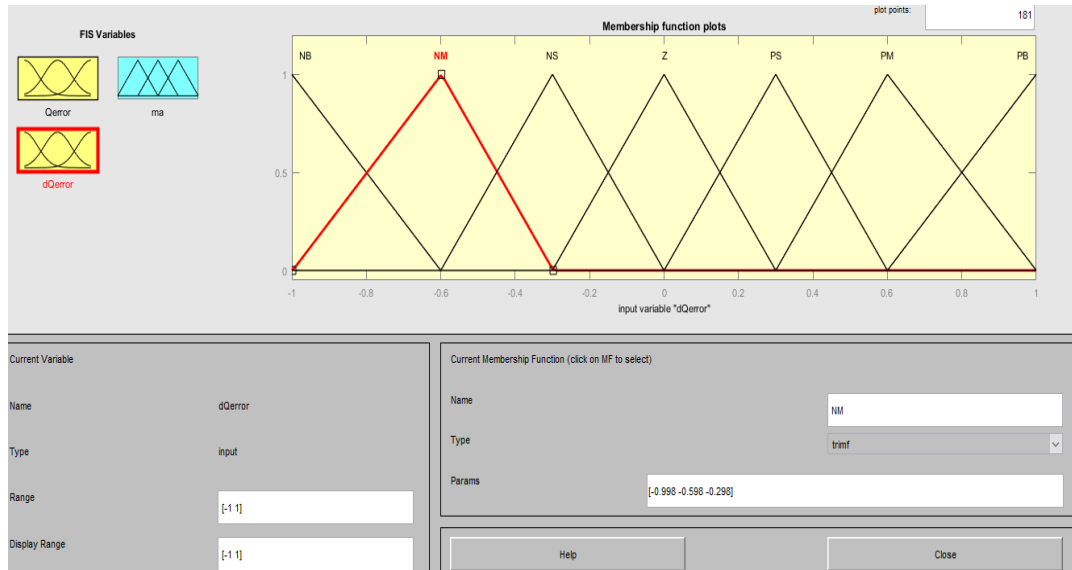
Şekil 5.17.  $P\_error$  için bulanık mantık yüzeysel görünümü

İkinci olarak  $Q\_error$  fuzzy ayarı yapılmıştır. Burada  $Q\_error$  ve  $\partial Q\_error$  için bulanık mantık kural tabanları ve üyelik fonksiyonları incelenmiş,  $Q$ 'nun nominal değerlerine göre bir aralık belirlenmiş ve bu aralığa göre iki girişli bir çıkışlı üyelik fonksiyonları elde edilmiştir.

Şekil 5.18'de 7 üyelik girişi NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB şeklindedir.  $\partial Q\_error$ ,  $Q\_error$ 'un değişim fonksiyonunu vermektedir. Bunun üyelik fonksiyonu Şekil 5.19'da verilmiştir:

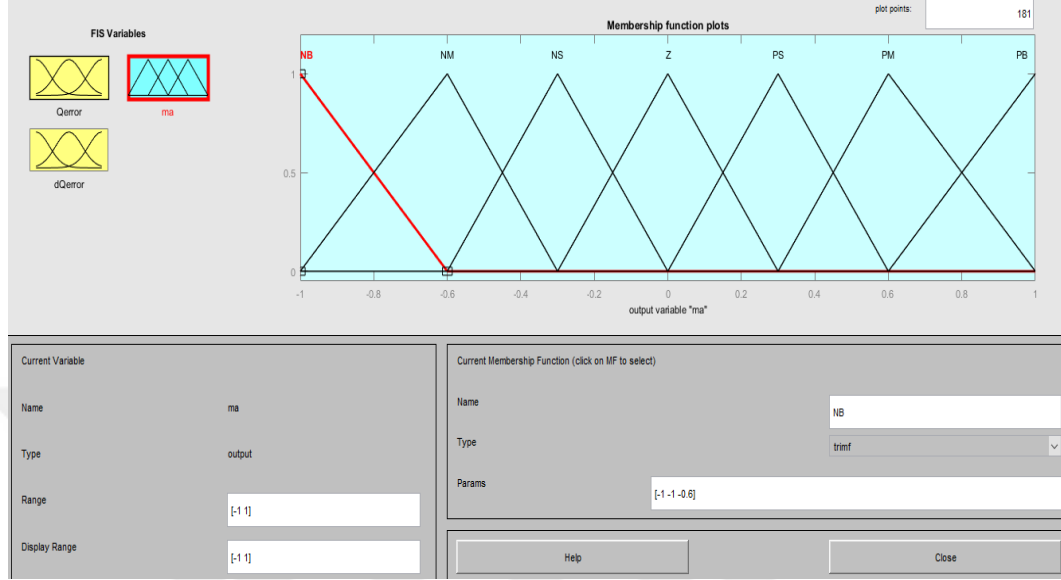


Şekil 5.18.  $Q\_error$  üyelik fonksiyonu



Şekil 5.19.  $dQ\_error$ :  $Q\_error$ 'un değişiminin üyelik fonksiyonu değişimi

Şekil 5.20’de çıkış üyelik fonksiyonu verilmiş ve çıkış üyeliği 7 örnek değişken olarak yazılmıştır. Daha sonra bu üyelik fonksiyonları karar verme biriminden geçirilerek 49 kural oluşturulmuştur.



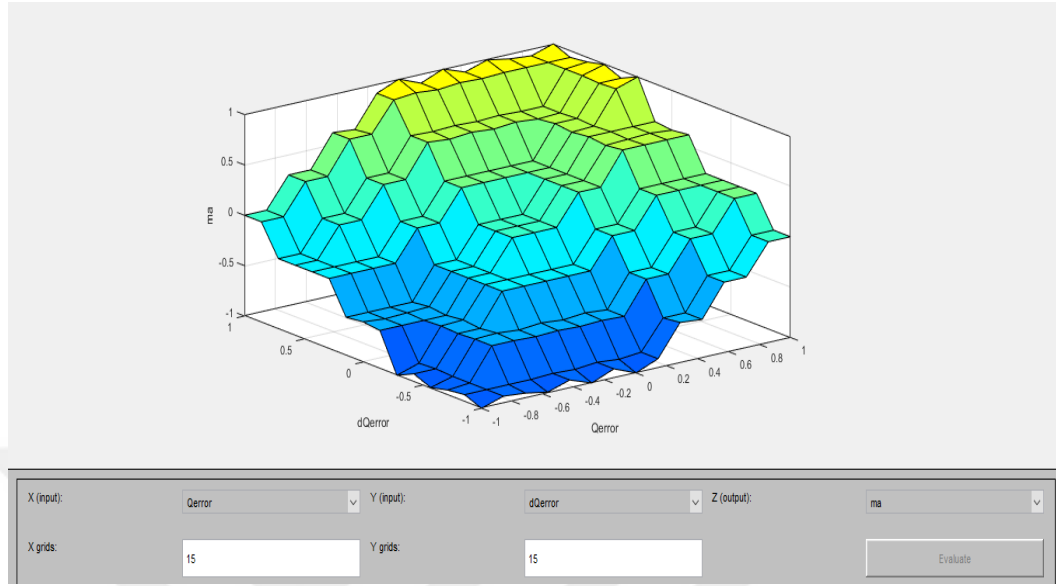
Şekil 5.20.  $Q\_error$  çıkış üyelik fonksiyonu

Burada If then kuralı kullanılarak kural tablosu oluşturulmuştur. Kural Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2.  $Q\_error/dQ\_error$  değişiminin kural tablosu

$e$	N	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
$\partial e$	B	N	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B	N	NB	NB	NM	NS	NS	Z
NM	B	N	NM	NM	NM	NS	Z	PS
NS	B	N	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	B	N	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	M	N	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	S	N	Z	PS	PM	PM	PM	PB
PB		Z	PS	PS	PM	PB	PB	PB

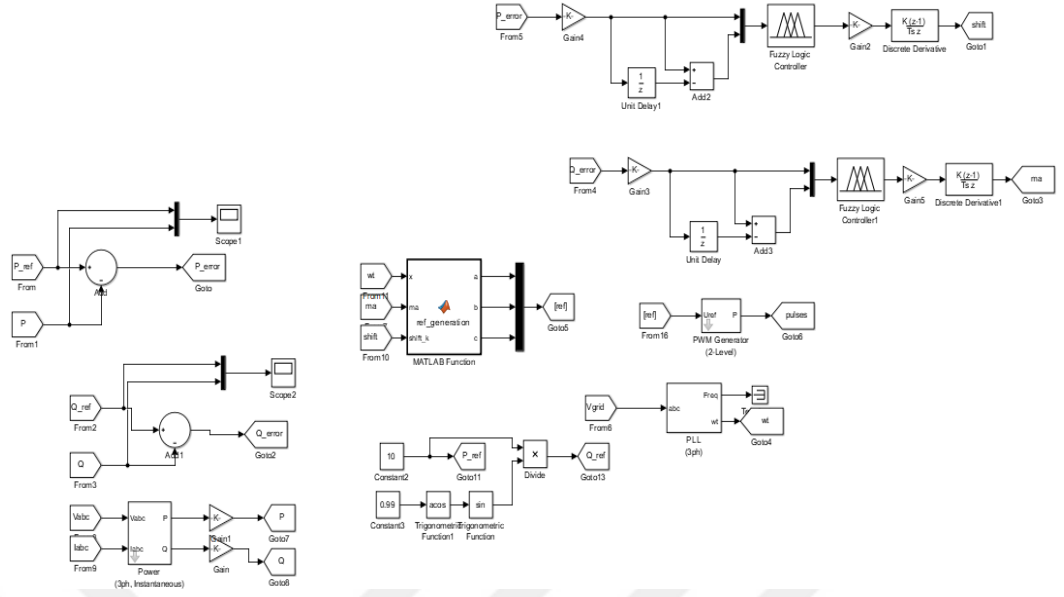
Bu tabloya göre 49 örnekli bir kural oluşturulmuştur. Oluşturulan kural sonucunda yüzeysel görünümü Şekil 5.21'deki gibidir:



**Şekil 5.21.** Q\_error için oluşturulan fuzzy bulanık mantığın yüzeysel görünümü

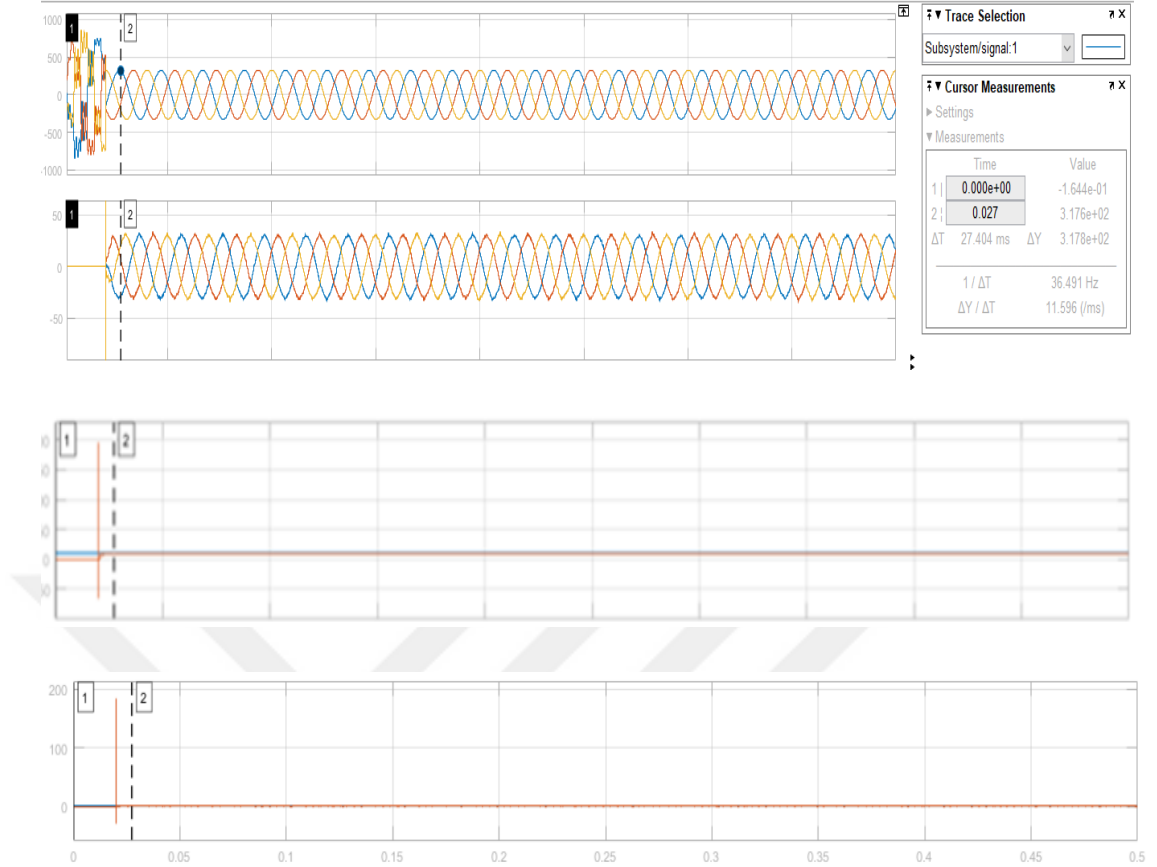
### 5.3.1. Bulanık Mantık Kontrolü ve Grafikler

Bulanık mantık kontrolünün yapısı hakkında bilgi verilmiş ve yapılan modellemede farklı yükler bağlamak suretiyle ortaya çıkan grafikler değerlendirilmiştir. MATLAB/SIMULINK'te modellenen PV-STATCOM'un kontrolünün bulanık mantık kontrol yapısı Şekil 5.22'de verilmiştir.



**Şekil 5.22.** Bulanık mantık kontrollörün yapısı

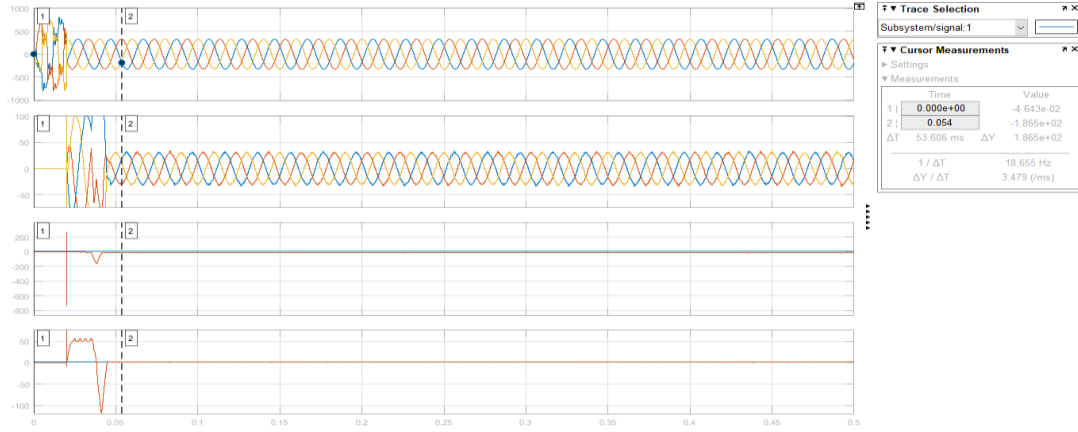
Sistemin bulanık mantık kontrollörün yapısı Şekil 5.22’de gösterilmiştir. İlk olarak denetlenen bloğun akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Ölçülen  $V_{abc}$  ve  $I_{abc}$ ’den şebeke aktif ve reaktif güç elde edilmiştir. Şebeke gerilimi PLL bloğuna bağlanarak PLL, STATCOM’un bağlı olduğu fazın geriliminin ana bileşeninin sıfır noktasına senkronize olmuştur. Yani PLL, a fazının frekansını ve açılma hızını belirlemiştir. Ölçülen aktif ve reaktif güç ile referans olarak belirlenen aktif ve reaktif güç karşılaştırılarak hata sabit değerleri Fuzzy logic denetleyiciye giriş olarak verilmiştir. Fuzzy logic denetleyicinin girişindeki kazançlar normalize işlemi yapıp, giriş değerlerini -1 ile 1 aralığına getirmek için kullanılmıştır. Normalizasyon işlemi P ve Q gerçek değerlerinin ölçülen değer oranı ile yapılmıştır. Fuzzy’nin çıkışına integratör bağlanarak, fuzzy’nin çıkışına gelen değerlerin fazla olması durumunda onu karşılayabilmesi için kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrollörlerin çıkışlarında ma (modülasyon indeksi) ve shift (kayma) değerlerine göre alınıp bu çıkışı SPWM’den geçirerek bir referans değer elde edilmiştir. Bu referans değer bir PWM jeneratörden elde edilen bir anahtarlama darbesi ile invertere bağlanmıştır. Şekil 5.23’te bulanık mantık kontrollörünün etkisi ile reaktif güç değişimi, gerilim ve akımdaki bozulma süreleri gözlenmiştir.



**Şekil 5.23.** Bulanık mantık kontrolörlü sistemin 1. grafik  $V_{abc}$ , 1.grafik  $I_{abc}$  ve 3. grafik aktif güç ve 4. grafik reaktif güç değişimi

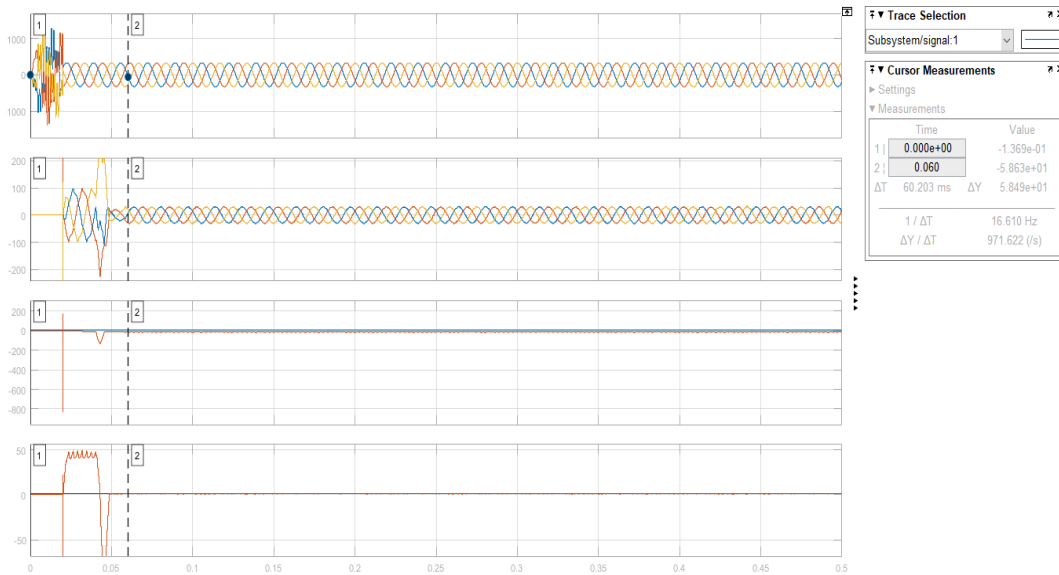
Grafikte görüldüğü üzere reaktif güç değişimi gözlemlenmiştir. Burada reaktif güç değişiminin 27 ms’de hatayı sıfırladığı gözlenmiştir. Ayrıca gerilim ve akım da titremelerin oranının azaldığı ve çok hızlı bir şekilde harmonik bozulmaları düzenlediği de görülmüştür.

MATLAB/SIMULINK’te hazırlanan PV-STATCOM modeli Şekil 5.1’de verilmiştir. Endüktif ve rezistif yükler bağlandığında, yükün değerleri  $P_R: 3 \text{ kW}$  ve  $Q_L: 5 \text{ kVAR}$  değerindedir. Bu durum şekil 5.24’te gösterilmiştir:



**Şekil 5.24.** R ve RL yükü eklendiğinde oluşan 1.grafik  $V_{abc}$ , 2. grafik  $I_{abc}$ , 3. grafik aktif güç 4. grafik reaktif güç değişimleri

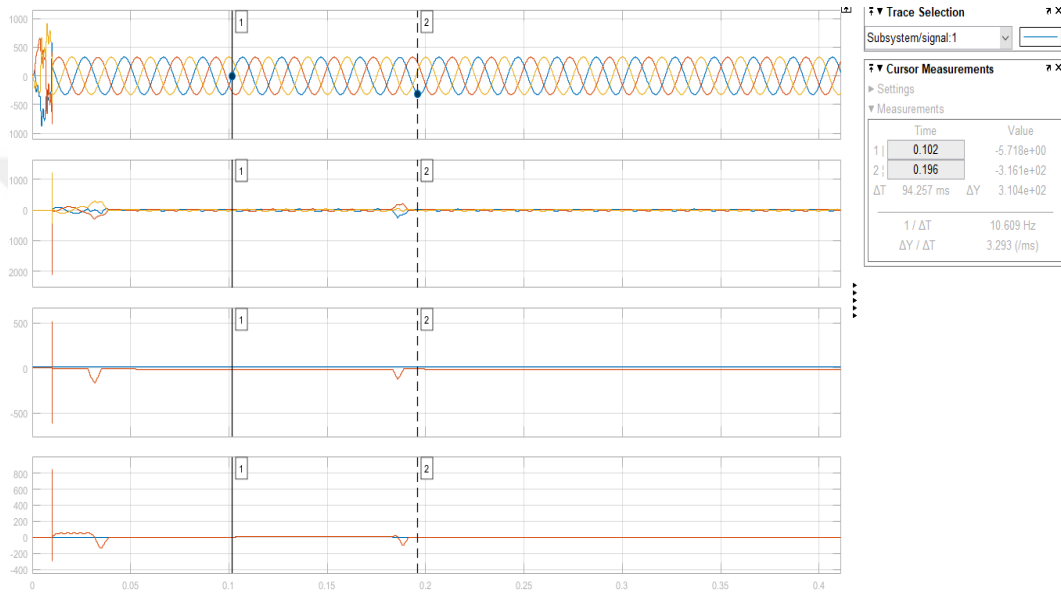
Şekil 5.24'te sisteme R ve RL yükü eklendiğinde, sistemin cevap süresi yaklaşık 54 ms'de olmuştur. Burada sürenin uzamasının nedeni olarak L indüktansının reaktif güce bir etkisi olması sonucunda hatayı sıfırlama süresi normal sisteme göre az da olsa uzamıştır. Daha sonra frekansının değiştirilmesi durumunda ortaya çıkan grafik Şekil 5.25'te verilmiştir.



**Şekil 5.25.** Bulanık mantık kontrolörü ile yapılan sistemde frekans değişikliğinde 1.si  $V_{abc}$ ,2.si  $I_{abc}$ , 3.sü aktif güç ve 4. ise reaktif güç değişimi

Şekil 5.25'te görüldüğü gibi frekans değişimi ile sistemin güç değişimine bakıldığında cevap süresi 60 ms'dir. Bunun sebebi ise frekansın değişimi ile reaktif bileşenleri ve reaktif güç miktarı artmaktadır. Reaktif güç miktarının artması durumunda kompanze etme süresi de uzamaktadır. Ancak yine de çok hızlı bir şekilde cevap vermektedir.

Burada  $\cos(\theta)$  değerinin 0.7 yapılması durumunda elde edilen yeni bir  $L$  değerine göre uygulama yapıldığında Şekil 5.26'deki değişim elde edilmektedir.



**Şekil 5.26.** Bulanık mantık kontrolörü ile  $\cos(\theta)$  değişimi sonucunda elde edilen 1. grafik  $V_{abc}$ , 2. Grafik  $I_{abc}$  ve 3.sü aktif gücü 4.sü reaktif güç değişimi

Grafikte görüldüğü gibi, reaktif güç değişiminin kontrolünün 94 ms'de sağlandığı, sistemin çok hızlı bir şekilde eski haline döndüğü ve sistemin verimli bir şekilde kullanıldığı görülmüştür.



## 5. SONUÇ

Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan STATCOM, son zamanlarda tercih edilen reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kontrolü için sıkça kullanılan bir eleman durumundadır. Bu tez çalışmasında güneş sisteminde gerilim regülasyonunu ve reaktif güç değişimleri incelenmiştir. Tez çalışmasının uygulama bölümü MATLAB/SİMULİNK ortamında gerçekleştirilmiştir. STATCOM kontrolünde Bulanık mantık ve PI denetleyici kullanılmıştır. Reaktif güç kompanzasyonu için güç elektroniği elemanlarından olan STATCOM kullanılmıştır. MATLAB/SİMULİNK ortamında yapılan normal çalışmada 380 ms gibi süre içinde  $P$  ve  $Q$  hata değerleri yaklaşık sıfır olarak tespit edilmiştir. Ayrıca gerilim akım değişim grafiklerine bakıldığında aynı süre içinde aynı fazda oldukları, yani  $\cos(\theta)$ 'nin 1 olduğu gözlenmiştir. Kompanze edilmiş bir sistemde ani referans güç değişiminde tekrar kompanze edilme süresine bakılmış ve 70 ms'de gerçekleştirdiği görülmüştür.

Tezin devamında ikinci adım olarak güneşten gelen ışık miktarını azaltma ve arttırma durumuna göre grafik incelenmiştir. Bu grafik sonucunda başlangıçta 1000 W/m<sup>2</sup> olarak ayarlanmıştır. Daha sonra 500 W/m<sup>2</sup> ve 2000 W/m<sup>2</sup>'e göre değişimler gözlenmiştir.

Üçüncü adım olarak da  $RL$  yükü eklenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafikte  $RL$  yükü eklenmesi sisteme 0.4 sn'de yapılmıştır. Eklenen endüktif yükün reaktif güç bileşenine etkisiyle reaktif güçte ani bir artış olmuştur. Reaktif yükteki artışın ise kısa bir sürede düzeldiği görülmüştür.

Dördüncü adımda sistem frekansının değişiminin etkisine bakılmıştır. Frekans 0.4 sn'de 60 Hz uygulanmış ve sistem cevabının 370 ms gibi bir kısa sürede istenilen referans değere ulaştığı gözlenmiştir.

Beşinci adımda ise  $\cos(\theta)$  değerinin 0.7 yapıldığı durumda, yapılan hesaplamada  $L$  değerinin 0.0224 H değerinde olduğu bulunmuş ve bu etkiye göre grafik incelenmiştir. 0.99 yani faz farkının neredeyse hiç olmadığı, duruma göre çok az bir etkisinin olduğu ve sistemin düzeltme etkisinin iyi olduğu gözlenmiştir.

Daha sonra sistemin kontrolörü değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Denenen ikinci kontrol yöntemi olarak bulanık mantık kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrolörünün değişimde nasıl bir etkisinin olduğu incelenmiş ve aynı adımlar bu kontrolör içinde uygulanmıştır. Bulanık mantık kontrolörde sistemin 27ms gibi çok kısa bir sürede gerçekleştiği görülmüştür. Daha sonra sisteme  $RL$  yükü de eklediğimizde,  $L$  etkisinden dolayı sürenin uzadığı ve 54 ms gibi bir sürede gerçekleştiği görülmüştür. Daha sonra sadece frekans değişimi durumunda nasıl bir etkisinin olacağına bakılıp frekans değiştirilerek grafik gözlenmiştir. Frekansdaki değişimde sistemin alternatif akımda ve sistemdeki  $L_f$  ve  $C_{fmax}$  değerlerinin değişimine neden olduğundan dolayı, onları tekrar düzenleme süresinde az bir artış olmuştur ve değer olarak 60 ms gibi bir süre gözlenmiştir. En son yapılan deney ise  $\cos(\theta)$  değerini 0.7 yaptığımız durumda tekrar sistemi kompanze edebilme süresi gözlenmiş ve bunun sonucunda da 94 ms gibi oldukça kısa bir sürede tekrar toparlandığı görülmüştür. PI denetleyici ile Bulanık mantık denetleyici karşılaştırılması yapılacak olursa bulanık mantığın oldukça hızlı bir şekilde cevap verdiği ve gerilim akım harmoniklerine oldukça iyi cevap verdiği görülmüştür.

Reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde kondansatör bankları yerine FACTS cihazları kullanılarak, sistemin daha hızlı ve verimli olması sağlanabilir. Tasarım yapılırken FACTS cihazlarından STATCOM'un kontrolü için ANFIS gibi yöntemler kullanılarak hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü yapabilen farklı tasarımlar geliştirilebilir.

Çalışmanın sonucunda, STATCOM'un sistem performansını artırabileceği, gerilimi düzenleyebileceği, reaktif gücü dengeleyebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca STATCOM'un aktif gücü kararlı bir şekilde verebileceği ve reaktif güç kompanzasyonu için reaktif güç alışverişini oldukça kısa bir sürede sağladığı gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Yasin İçel, Güneş Enerji Sistemlerinin Performans Tahmini İçin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi Ve Verimliliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 2019
- [2] Arif Koyun, Güneş bacası ile enerji üretiminin incelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2006.
- [3] M. Yılmaz, Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi, Ankara Üniversitesi, Çevre Bilimleri Dergisi 4(2), 33-54, 2012.
- [4] İsmet Akova, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Nobel Yayınevi, 2008.
- [5] Anonim 1, <https://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/pv-inverters-basic-facts-for-planning-pv-systems.html> (Erişim: 20.11.2019).
- [6] H. H. Öztürk, "Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler", V. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, 1, 1-14., 2017.
- [7] E. M. Siavashi, "Smart PV inverter control for distribution systems", The University of Western Ontario, 2017.
- [8] E. Deniz, S. Tuncer, & M. T. Gençoğlu, . "Statcom İle İletim Hatlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu". *EMO II. Enerji Verimliliği Sempozyumu, Kocaeli, Turkey*, 2007.
- [9] K. Rajiv Varma, Hesamaldin Maleki. "PV Solar System Control as STATCOM (PV-STATCOM) for Power Oscillation Damping." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* , pp. 1-11, 2018.
- [10] Hui Li, Huang Yaomei, ve Junwei Lu. "Reactive power compensation and DC link voltage control using Fuzzy-PI on grid-connected PV system with d-STATCOM." In *2016, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1240-1244. IEEE, 2016.
- [11] R. Nivedita Rode, S. R. Gaigowal, ve P. S. Patil. "Cascaded H-Bridge Inverter based PV-STATCOM." In *2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*, pp. 99-104. IEEE, 2018.

- [12] V. Varma and S. T. Nagarajan. "PV solar farm as statcom for voltage regulation." In *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [13] K Tharani, R. Dahiya, "PV module integration with STATCOM for reactive power compensation". In *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)* (pp. 400-404). IEEE. (2014, November).
- [14] A. Çetin, M. Ermis, "VSC-based D-STATCOM with selective harmonic elimination". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(3), 1000-1015, 2009.
- [15] M. Saeedifard, H. Nikkhajoei, R. Iravani, "A Space Vector Modulated STATCOM Based on a Three-Level Neutral Point Clamped Converter," *IEEE Tran. On Power Delivery*, 22(2), pp. 1029-1039, 2007
- [16] M. M. Ertay, Z., Aydoğmuş, "Statcom ile Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü". *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (021), pp.77-90, 2010.
- [17] V. M. Awasth, V.A Huchche, "Reactive power compensation using D-STATCOM". In *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* (pp. 583-585). IEEE. 2016, April.
- [18] Yunus Kara, Statik Senkron Kompanzatörün Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [19] Fevzi Çakmak, Dağıtım Şebekelerinde D-STATCOM ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncüyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye, 2018.
- [20] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays". *IEEE Transactions on power electronics*, 24(5), 1198-1208, 2009.
- [21] V. Türkmenoğlu, F. Güngör, "Matlab Simulink & Gui ile Pv Hücre Simülasyonu MATLAB SIMULINK & GUI with PV Cell Simulation" Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 27 – 29 Kasım 2014, Bursa.
- [22] Burçin Özkaya, Fotovoltaik Sistemlerde Yeniden Düzenleşim İçin Sezgisel Yöntemlerin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilim Enstitüsü, Isparta, 2018.

- [23] A. Kaypmaz, B. Engin, Enerji Verimliliği ve Tasarrufu açısından Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Çalışmaları, EMO Enerji verimliliği ve kalitesi sempozyumu,2009.
- [24] Barış Engin, Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [25] Fatih Bilki, Reaktif Güç ve Kompanzasyon Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [26] Anonim 2 (2013) [http://web.firat.edu.tr/eemuh/download/Laboratuvar/Elektrik\\_Tesis\\_/2013/Elk.Tes.Lab./Deney\\_Föyleri-2013.pdf](http://web.firat.edu.tr/eemuh/download/Laboratuvar/Elektrik_Tesis_/2013/Elk.Tes.Lab./Deney_Föyleri-2013.pdf) (Erişim Tarihi: 10.06.2020).
- [27] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, & R. Domke, “ Reactive power compensation Technologies: State-of-the-art review”. *Proceedings of the IEEE*, 93 (12), 2144-2164, 2005.
- [28] T. Vardar, F. Yildirim, E. Çam, “Yeni Nesil Kompanzasyon Sistemi SVC”. *TMMOB EMO Ankara Şubesi, Haber Bülteni*, 4, 14-17, 2011.
- [29] S. Tosun, A. Öztürk, M. A. Yalçın, K. Döşoğlu, U. Güvenç, “Güç sisteminde SVC ve STATCOM denetleyici etkilerinin incelenmesi”. In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)* (pp. 287-292), 2011.
- [30] R. ÇÖTELİ, Z. AYDOĞMUŞ, DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu. *Politeknik Dergisi*, 10 (2), 123-128, 2007.
- [31] Panhwer, Muhammad Shuaib, Rattar Bilawal vd. Reactive Power Compensation Using Statcom, Mezuniyet Tezi, Mehran University of Engineering & Technology, Jamshoro, Ocak 2014, 62.
- [32] K. YANMAZ, O.Ö. MENĞİ, & İ. H. ALTAŞ, “Çok Seviyeli H-Köprü Temelli Gerilim Kaynaklı Eviricili STATCOM’un BMD’li Kontrolü ve Karşılaştırmalı Benzetimi”. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (14), 106-123.
- [33] M. Dijle, M. M. Ertay, İ. Yücedağ, “Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri”. *Sakarya University Journal of Science*, 20 (2), 265-279, 2016.
- [34] R. Çöteli, E. Deniz, B. Dandıl, S. Tuncer, “Üç-Fazlı Üç-Seviyeli Kaskat Evirici Tabanlı D-STATCOM Kullanılarak Yük Kompanzasyonu”. *Politeknik Dergisi*, 13 (1), 7-13, 2010.

- [35] S. Ozdemir, E. Ozdemir, L. M. Tolbert, S. Khomfoi, "Elimination of harmonics in a five-level diode-clamped multilevel inverter using fundamental modulation". In *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (pp. 850-854). IEEE, 2007, November.
- [36] G. Mohapatra, "Multilevel Inverter; A Review", Dept Of Ee, S'o'a University, 2018
- [37] Anıl Eskin, Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Çok Seviyeli Eviricilerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [38] A. Kazdaloğlu, B. Çakır, M. Demir, A. Güneroğlu, E. Özdemir, M. Uçar, "Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinde Kullanılan Çok Seviyeli Eviricilerin İncelenmesi". *EVK2011*, 4, 12-13, 2011.
- [39] A. Dünder, M. Uçar, "Modüler çok seviyeli dönüştürücülerin incelenmesi". *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5 (2).
- [40] N. O. Çetin, A. M. Hava, "Çok-seviyeli Eviricilerde Seviye Kaydırmalı PWM Anahtarlama Yöntemleri Carrier Level Shift Based PWM Techniques in Multi-level Inverters", ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa
- [41] M. Dursun, M. K. Döşoğlu, "Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici için SDGM, ÜHDGM ve HDGM Tekniklerinin MATLAB/SİMULİNK ile Karşılaştırmalı Analizi". *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4), 983-999, 2018.
- [42] Erkan Deniz, Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Üç Seviyeli H Köprü Evirici Tabanlı D-STATCOM'un Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
- [43] Bilal Coşkun, Statik Senkron Kompanzatorların Yapay Sinir Ağları ile Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2015.
- [44] A. Çetin, Design and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering, PhD Thesis, METU Electrical and Electronic Engineering Department, Ankara, 2007.
- [45] M. F. Keskenler, & E. F. Keskenler, Bulanık Mantığın Tarihi Gelişimi. *Takvim-i Vekayi*, 5 (1), 1-10. 2017.

- [46] Anonim 3, [www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/bul\\_man.doc](http://www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/bul_man.doc) (Erişim Tarihi: 12.10.2020).
- [47] Ömer Keleşoğlu. "Çok amaçlı bulanık optimizasyon tekniği için bir algoritma." *Sakarya University Journal of Science* 7, no. 3 (2003): 37-42.
- [48] Juneed S.Abduljabar, Bulanık Mantık Yöntemleri Kullanılarak Gazlı İçeceklerde Karbondioksit Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [49] Y. Genç, "Statik Senkron Kompanzatorün Bulanık Mantık Temelli Kontrolör ile Tasarımı ve Analizi". *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (1), 7-12, 2016.
- [50] L.O. Mak, Y. X Ni,., C.M. Shen, "STATCOM with fuzzy controllers for interconnected power systems". *Electric Power Systems Research*, 55(2), 87-95, 2000.
- [51] İ. H. Altaş, "Bulanık mantık: Bulanık denetim". *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 64(1999), 76-81, 1999.
- [52] T. Aslan, E. Yılmaz "Bulanık Mantık Yöntemi İle Belirsizlik Şartlarında Faaliyet-Hacim-Kar Analizi", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 2018.
- [53] Agah Turgul Korucu, Bulanık Mantık Problemleri için Türkçe Bir Arayüz Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.

## YAYINLAR

1. Oymak, A.- Mamiş, M. S.; “Control Of Reactive Power Compensation And Voltage With Statcom In Photovoltaic Solar Power Plant” 5<sup>th</sup> International Regional Development Conference, (IRDC), 26-28 September 2019, Turgut Özal Üniversitesi, Malatya/Türkiye, p.618-631.
2. Oymak, A.- Mamiş, M. S.; “Pv-Statcom’da P1 Kontrolör ile Reaktif Güç Kompanzasyonu”4<sup>th</sup> International Congress of Academic Research (ICAR), 7-9 Aralık 2020. [www. icarcongress.org](http://www.icarcongress.org)., Özet, s.127.





## ÖZGEÇMİŞ

**Adı- Soyadı:** Ayşenur OYMAK

**Lisans:** Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde, 2016, ELAZIĞ.

**Deneyimi:** Batman Üniversitesi Mimarlık Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi,