

**ŞEBEKEYE BAĞLI MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ
İÇEREN YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLETİM
SİSTEMLERİNİN KONTROL VE OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

VOLKAN YAMAÇLI

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
ŞUBAT - 2021**

**ŞEBEKEYE BAĞLI MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ
İÇEREN YÜKSEK GERİLİM DOĞRU AKIM İLETİM
SİSTEMLERİNİN KONTROL VE OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

VOLKAN YAMAÇLI

ORCID ID: 0000-0003-0331-8818

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Doç. Dr. Kadir ABACI**

ORCID ID: 0000-0001-5627-0032

**MERSİN
ŞUBAT - 2021**

ÖZET

Şebekeye Bağlı Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü İçeren Yüksek Gerilim Doğru Akım İletim Sistemlerinin Kontrol ve Optimizasyonu

Sistem yükü veya arızaları gibi durumlarda gerilim kararsızlığından kaçınmak amacıyla gerilim dönüştürücülerinin optimum kontrolü, güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen en çok çalışılan doğrusal olmayan sorunlardan biridir. Dönüştürücü kontrolü ile ilgili optimizasyon problemi, sistem parametrelerini telafi etmeye ve optimum miktarda enerji sağlarken yenilenebilir enerji sistemlerinin dahil edilmesiyle daha karmaşık hale gelmektedir. Literatür ve endüstride bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) iletim sisteminin avantajlı durumda olduğu görülmüş ve özellikle güneş ve rüzgâr enerji sistemleri içeren şebekelerle ilgili çalışmalar bu alanda yoğunlaşmaktadır. Özellikle DA-DA ve DA-AA dönüştürücülerle ilgili başarıyla sonuçlandırılan parametre optimizasyonu ve kontrolü sonucunda güç sisteminin istenilene en yakın ve en verimli şekilde çalıştırılması sağlanabilmektedir. Bu tez, YGDA iletim sistemlerine yenilenebilir enerji üretim ve iletim sistemleri öncelikli olmak üzere alternatif akım iletim sistemleri veya diğer bir YGDA iletim hatlarının güvenli biçimde bağlanabilmesi, iletilen enerjinin dalgalanmalardan arındırılabilmesi ve enerjinin kalitesinin korunmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı basit bir yaklaşım önerilmiş ve PI kontrollü güç dönüştürücülerden oluşan yüksek gerilim DA ve yüksek gerilim AA sistemleri ara bağlantılarına uygulanmıştır. Önerilen yöntemi kullanarak, dönüştürücü kontrol parametreleri, kararlı durum ve dinamik gerilim kararlılığını iyileştirmek ve aynı zamanda kısa devre ve aşırı yüklenme durumlarındaki sistem hatalarını önleyebilmek amacıyla farklı durumlar için optimize edilmiştir. Hibrit kontrol içerisinde YSA ve PI kontrolcüler kullanabilmek amacıyla tasarlanan kontrol metodolojisini uygulamak için, ağ sadece sistemin çalıştığı en uygun parametre değerlerine göre değil, tüm olası sistem karakteristiğini yani çözüm uzayını içeren numunelerle en iyi şekilde eğitilmelidir. Bu nedenle yeni bir optimizasyon algoritması; rastgele ve lokalize numuneler kullanarak çözüm uzayını örneklemek ve YSA'yı eğitmek için diferansiyel arama algoritması kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın elde edilen ve sunulan sonuçları, güçlü ve hızlı yanıt nedeniyle, YSA'ların güç sistemi kararlılığı ile ilgili doğrusal olmayan güvenlik ve optimizasyon sorunlarının üstesinden gelmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte sistemlerin aktif ve reaktif güç eğrileri incelenerek gerekli müdahale yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PV, Rüzgâr Enerjisi, Güneş Enerjisi, Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü, Matlab, Simulink, DIgSilent.

Danışman: Doç. Dr. Kadir ABACI, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

Control and Optimization of High Voltage Direct Current Transmission Systems Including Grid Connected Modular Multilevel Converter

Optimum control of voltage converters to avoid voltage instability in situations such as system load or malfunctions is one of the most studied nonlinear problems affecting energy quality in power systems. The optimization problem with converter control becomes more complicated with the inclusion of renewable energy systems to compensate for system parameters while providing the optimum amount of energy. Studies on this subject in the literature and industry have shown that the high voltage direct current (HVDC) transmission system is in an advantageous position, and especially studies on networks containing solar and wind energy systems are concentrated in this field. As a result of the successful parameter optimization and control especially regarding DC-DC and DC-AC converters, it is possible to operate the power system in the most efficient and closest way to what is desired. This thesis aims to safely connect high voltage alternating current (HVAC) transmission systems or other HVDC transmission lines, primarily renewable energy generation and transmission systems, to HVDC transmission systems, to be free from fluctuations in transmitted energy and to maintain the quality of energy. In this study, a simple approach based on artificial neural networks (ANN) is proposed and applied to high voltage DC and high voltage AC systems interconnections consisting of PI controlled power converters. Using the proposed method, the converter control parameters are optimized for different situations in order to improve steady-state and dynamic voltage stability as well as avoid any system errors. In order to apply the hybrid control methodology using ANN and PI control, the network must be well trained with samples containing all possible system characteristics, not just the best parameter values. Therefore, a new optimization algorithm; Differential search algorithm is used to sample solution space using random and localized samples to train ANN. The obtained and presented results of the proposed approach show that due to the strong and fast response, ANNs can be used to overcome nonlinear safety and optimization problems related to power system stability. In addition, the active and reactive power curves of the systems were examined and the necessary intervention was made.

Keywords: PV, Wind Energy, Solar Energy, Modular Multi-Level Converter, Matlab, Simulink, DlgSilent.

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir ABACI, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, değerli bilgilerinden ve akademik tecrübesinden yararlandığım, tez aşamasının planlanmasında ve yürütülmesinde bilimsel anlamda bana yardımcı olup beni yönlendiren, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum çok değerli danışmanım sayın Doç. Dr. Kadir ABACI' ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatımda bugünlere gelmemi sağlayan her daim yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen hayattaki en büyük şansım olan Aileme sonsuz teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLO DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR ve SİMGELER	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1. YGDA İletim Sistemi	4
2.2. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler	6
2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu ve Sistemin Optimal Kontrolü	9
3. MATERYAL ve YÖNTEM	12
3.1. Elektrik Enerji Sistemlerinin Yapısı	12
3.1.1. Alternatif Akım Sistemleri	12
3.1.1.1. Üretim	12
3.1.1.2. İletim	13
3.1.1.3. Dağıtım	13
3.1.2. Doğru Akım Sistemleri	14
3.1.2.1. Doğru Akım İletim Sistemlerinin Avantajları	14
3.1.2.2. Doğru Akım İletim Sistemi Modeli	15
3.1.2.3. Doğru Akım İletim Sistemi Dinamik Modeli	16
3.1.3. Güç Sistemleri Elemanları	19
3.1.3.1. Kademe Değiştirici Transformatör	19
3.1.3.2. Statik Var Kompanzatör	20
3.1.3.2. Statik Senkron Kompanzatör	21
3.1.4. Güç Akışı	21
3.1.4.1. SVC ve STATCOM Cihazlarının Güç Akışına Entegrasyonu	23
3.1.5. Genişletilmiş Güç Akışı	24
3.1.6. Sürekli Güç Akışı	24
3.2. Yenilenebilir Enerji Sistemleri	25
3.2.1. Güneş Enerji Sistemi Modeli	25
3.2.2. Rüzgâr Enerji Sistemi Modeli	28
3.3. Güç Dönüştürücüleri	30
3.3.1. DA-DA Dönüştürücüler	30
3.3.2. DA-AA Dönüştürücüler	31
3.3.2.1. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler	32
3.3.2.1.1. Faz-Kilitlemeli Çevrim	37
3.3.2.2. Dönüştürücülerin Kontrolü	39
3.3.2.2.1. Darbe Genlik Modülasyonu	39
3.3.2.2.2. PI Kontrol Yöntemi	40
3.4. Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları	41
3.4. 1. Yapay Sinir Ağlarının Güç Akışı Problemine Uygulanması	41
3.4. 2. Diferansiyel Arama Algoritması	42
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	44
4.1. Modüler Çok Seviyeli Doğrultucu Filtre Parametre Optimizasyonu	44
4.1.1. Filtrelenmiş Sinyal İçin Performans Parametreleri	46

	Sayfa
4.1.2. Filtre Performansı İçin Karar Verme Yöntemleri	47
4.1.3. Durum 1: Toplam Harmonik Bozulma	47
4.1.4. Durum 2: Sinyalin Genlik Optimizasyonu	48
4.1.5. Durum 3: Öklid Uzaklığı Optimizasyonu	49
4.1.6. Durum 4: Fourier Spektrum Analizi	50
4.2. ÇBAG Rüzgâr Çiftliği İçeren Güç Sisteminin Parametre Optimizasyonu	52
4.2.1. Durum 1: Sistemdeki 575V'luk Bara Üzerindeki 3-Faz AA Gerilimin Sapma Miktarının Azaltılması	52
4.2.2. Durum 2: Yük2 Bloğu İçindeki Motorun Hızının Sapma Miktarının Azaltılması	55
4.2.3. Durum 3: Sistemdeki 575V'luk Bara Üzerindeki 3-Faz AA Gerilimin Ve Yük2 Bloğu İçindeki Motorun Hızının Sapma Miktarının Azaltılması	57
4.2.4. Durum 4: Sistemdeki Yük Artırımı Durumunda Optimizasyon	60
4.3. Genişletilmiş Güç Akışının 3-Baralı Test Sistemine Uygulanması	64
4.4. PV Üretim Santralinin YGDA İletimi Üzerinden YGAA Sisteme Entegrasyonu	66
4.4.1. IEEE 9-Bara Test Sistemi	69
4.4.1.1. IEEE 9-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı	69
4.4.1.2. IEEE 9-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi	71
4.4.2. IEEE 39-Bara Test Sistemi	73
4.4.2.1. IEEE 39-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı	73
4.4.2.2. IEEE 39-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi	74
4.4.3. IEEE 57-Bara Test Sistemi	76
4.4.3.1. IEEE 57-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı	76
4.4.3.2. IEEE 57-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi	77
4.4.4. Test Sistemleri İçin Dinamik Kararlılık İyileştirmesi	78
4.4.5. SVC ve STATCOM Kullanarak Sistemlerin Gerilim Kararlılığının İyileştirilmesi	79
4.4.5.1. Test Sistemlerine Reaktif Güç Desteğinin Sağlanması	80
4.5. SMSG-YGDA İçeren Rüzgâr Çiftliği Sisteminin Gerilim Seviyesinin İyileştirilmesi	81
4.5.1. IEEE 39-Baralı Sistem Duyarlılık Analizi	82
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR	88
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ ve ESERLER	95

TABLÖLER DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Dünya bazında yıllara göre kullanılan yenilenebilir enerji potansiyeli.	2
Tablo 2.1. Dünya bazında işletmeye alınan bazı YGDA projeleri.	4
Tablo 3.1. PV panel karakteristik denklemleri katsayıları.	28
Tablo 3.2. PID kontrolün sistemler üzerine etkisi.	40
Tablo 4.1. Sinyal karakteristiği optimizasyon sonuçları	51
Tablo 4.2. Parametre iyileştirme oranları.	64
Tablo 4.3. Test sitemine ait klasik güç akışı sonuçları.	65
Tablo 4.4. PV entegrasyonu yapılan test sitemine ait genişletilmiş güç akışı sonuçları.	65
Tablo 4.5. Başlangıç parametreleri için gerilim ve güç profilleri.	68
Tablo 4.6. Başlangıç parametrelerine göre PV sistemden çekilebilecek maksimum güç değerleri.6'	68
Tablo 4.7. IEEE 9-bara sistemi klasik güç akışı sonuçları.	70
Tablo 4.8. IEEE 9-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.	73
Tablo 4.9. IEEE 39-bara sistemi genişletilmiş güç akışı sonuçları.	74
Tablo 4.10. IEEE 39-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.	75
Tablo 4.11. IEEE 57-bara sistemi genişletilmiş güç akışı sonuçları.	77
Tablo 4.12. IEEE 57-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.	78
Tablo 4.13. IEEE 57-bara sistemi YSA kullanılarak dinamik kontrol iyileştirme sonuçları.	79
Tablo 4.14. IEEE test sistemlerine SVC ve STATCOM cihazlarının performans etkisi.	80
Tablo 4.15. IEEE 39-bara sisteminin duyarlılık analizi sonuçları.	83
Tablo 4.16. SMSG rüzgâr çiftliği sistemi ve STATCOM eklenen baranın gerilim seviyesinin iyileştirilmesi.	84
Tablo EkA.1. Fotovoltaik hücre parametreleri.	93
Tablo EkA.2. Ziegler-Nichols metodu parametre katsayıları.	93
Tablo EkB.1. YSA parametreleri.	93
Tablo EkB.2. DSA parametreleri.	93
Tablo EkC.1. Sistemin hat parametreleri.	94
Tablo EkC.2. Transformatör parametreleri.	94
Tablo EkC.3. ÇBAG kontrol başlangıç parametreleri.	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. YGDA ve YGAA iletim kapasiteleri.	5
Şekil 2.2. YGDA ve YGAA sistemleri maliyet karşılaştırması.	6
Şekil 2.3. DA ve AA hatlardaki kayıp maliyet oranı.	6
Şekil 2.4. Gerilim kaynaklı dönüştürücü (GKD).	7
Şekil 2.5. Güç dönüştürücülerinin sınıflandırılması.	7
Şekil 2.6. 2-Katmanlı GKD topolojisi.	8
Şekil 2.7. Modüler çok seviyeli dönüştürücü tek faz şematiği.	8
Şekil 3.1. İki-terminalli YGDA iletim sistemi tek-hat eşdeğer diyagramı.	15
Şekil 3.2. İki-terminalli temel dönüştürücü devre diyagramı.	16
Şekil 3.3. GKD-YGDA kontrol genelleştirilmiş blok diyagramı.	17
Şekil 3.4. GKD-YGDA sisteminin tek hat şematik gösterimi.	17
Şekil 3.5. Kademe değiştirici transformatör elektriksel eşdeğer devresi.	19
Şekil 3.6. Statik var kompanzatör elektriksel eşdeğer devresi.	20
Şekil 3.7. Statik var kompanzatör sürekli hâl gerilim-akım karakteristiği.	20
Şekil 3.8. Statik senkron kompanzatör elektriksel eşdeğer devresi.	21
Şekil 3.9. Genişletilmiş güç akılı prosedürü.	24
Şekil 3.10. Güneş hücresi tek diyot eşdeğer devresi.	26
Şekil 3.11. PV sistemin 1000 W/m ² ışınlım için güç-gerilim karakteristiği.	27
Şekil 3.12. PV sistemin güç-gerilim-ışınlım karakteristiği.	27
Şekil 3.13. Çift beslemeli asenkron generatör Matlab/Simulink parametreleri.	30
Şekil 3.14. Yükseltici amaçla kullanılan DA-DA dönüştürücü eşdeğer modeli.	31
Şekil 3.15. MÇSD alt-modülü eşdeğer devre modeli.	32
Şekil 3.16. MÇSD tek-faz eşdeğer devre modeli.	33
Şekil 3.17. MÇSD 3-faz devre blok diyagramı.	35
Şekil 3.18. MÇSD tek-faz devre blok diyagramı yapısı.	36
Şekil 3.19. 4 adet alt-modül içeren 3-faz MÇSD çıkış sinyali.	36
Şekil 3.20. 48 adet alt-modül içeren 3-faz MÇSD çıkış sinyali.	37
Şekil 3.21. Faz-kilitlemeli çevrim genel blok diyagramı.	37
Şekil 3.22. FKÇ simülasyon blok diyagramı.	38
Şekil 3.23. 50 Hz sinyal frekansına sahip bir sinyal için FKÇ frekans çıkış karakteristiği.	38
Şekil 3.24. PI kontrol stratejisi ile DGM kontrolü.	40
Şekil 3.25. Yapay sinir ağı genel tasviri.	41
Şekil 3.26. Diferansiyel arama algoritması genel kodları.	43
Şekil 4.1. Simülasyon amacıyla tasarlanmış üç-faz MÇSD içeren örnek güç sistemi.	44
Şekil 4.2. MÇSD filtrelenmemiş basamak çıkışı.	45
Şekil 4.3. MÇSD filtrelenmiş basamak çıkışı.	45
Şekil 4.4. İdeal sinüzoidal sinyal ile rastgele seçilen değerler için elde edilen filtre çıkış sinyal grafiği.	46
Şekil 4.5. 50 Hz frekansa sahip ideal sinüzoidal sinyal ile 150 Hz harmonik sinyalin birleşimi ile oluşan düzensiz sinüzoidal sinyal.	47
Şekil 4.6. Toplam Harmonik Bozulma değerinin minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyal karakteristiği.	48
Şekil 4.7. Sinyal genlik farkının minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyal karakteristiği.	49
Şekil 4.8. İdeal sinyal ile çıkış sinyali farkının Öklid uzaklığının minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyal karakteristiği.	50
Şekil 4.9. Filtre çıkış sinyali frekans bileşenlerinin optimizasyonu sonucu elde edilen filtre çıkış	

sinyal karakteristiği.	51
Şekil 4.10. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr çiftliği içeren güç sistemi.	52
Şekil 4.11. 575V bara için toplam gerilim sapması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	53
Şekil 4.12. Kısa devre arızası durumunda 575V bara için toplam gerilim sapması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	54
Şekil 4.13. Kısa devre arızası durumunda 575V bara için toplam gerilim sapması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	54
Şekil 4.14. Motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	56
Şekil 4.15. Kısa devre arızası durumunda motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	57
Şekil 4.16. 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	58
Şekil 4.17. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	59
Şekil 4.18. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	60
Şekil 4.19. 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	61
Şekil 4.20. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	62
Şekil 4.21. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.	63
Şekil 4.22. 3-Baralı örnek güç sistemi.	65
Şekil 4.23. IEEE 9-bara sistemi YSA eğitim veri seti.	67
Şekil 4. 24. IEEE 9-bara sistemi YSA eğitim regresyon profili.	67
Şekil 4.25. IEEE-9, 39 ve 57 baralı test sistemleri için sürekli güç akışı sonuçları.	68
Şekil 4.26. PV sistem için ışıınım karakteristiği.	69
Şekil 4.27. IEEE 9-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.	70
Şekil 4.28. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 9-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.	71
Şekil 4.29. IEEE-9 baralı sistem bara-9'un PV ışıınım ve güç değerine bağlı olarak gerilim profili.	71
Şekil 4.30. IEEE-9 baralı sistem bara-9'un PV ışıınımına bağlı dinamik gerilim profili.	72
Şekil 4.31. IEEE-9 baralı sistemin dinamik kontrol sonucundaki frekans tepkisi.	72
Şekil 4.32. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 39-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.	74
Şekil 4.33. IEEE-39 baralı sistem bara-8'in PV ışıınımına bağlı dinamik gerilim profili.	75
Şekil 4.34. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 57-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.	76
Şekil 4.35. IEEE-57 baralı sistem bara-31'in PV ışıınımına bağlı dinamik gerilim profili.	77
Şekil 4.36. Farklı kontrol yöntemlerine göre F_{obj} amaç fonksiyonu değerleri.	79
Şekil 4.37. IEEE 9-Baralı sisteme reaktif güç destekleme cihazları eklenmesi durumundaki maksimum PV güç performansı.	81
Şekil 4.38. MSG tabanlı rüzgâr çiftliğinin ve bağlantılı şebekenin bağlantı şeması.	81
Şekil 4.39. STATCOM bağlanılan yük barasının blok diyagramı.	82

Şekil 4.40. STATCOM kontrolörünün detaylı şematığı.	82
Şekil 4.41. Farklı penetrasyon seviyeleri için STATCOM reaktif güç ve akım değerleri.	84
Şekil 4.42. Farklı penetrasyon seviyeleri için 12 numaralı baranın gerilimi.	85



KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma / Simge	Tanım
AA	Alternatif Akım
ANFIS	Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi
AYG	Alçaltıcı-Yükseltici Dönüştürücü
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	Doğru Akım
DSA	Diferansiyel Arama Algoritması
DSP	Sayısal Sinyal İşleme
FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
FEK	Fosil Enerji Kaynakları
FKÇ	Faz-Kilitlemeli Çevrim
GGA	Genişletilmiş Güç Akışı
GKD	Gerilim Kaynağı Dönüştürücüler
GKD-YGDA	Gerilim Kaynağı Dönüştürücü-Yüksek Gerilim Doğru Akım
GTO	Kapı Kapatma Tristörleri
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistör
KDT	Kademe Değiştirici Transformatör
LCC	Hat Değiştirmeli Dönüştürücü
MATLAB	MATrix LABoratory
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistör
PLL	Faz-Kilitli Döngü
DGM	Darbe Genişliği Modülasyonu
MÇSD	Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü
PID	Oransal-Integral-Türevsel Kontrol
PV	Fotovoltaik
SGA	Sürekli Güç Akışı
SMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
STATCOM	Statik Kompanzatör
SVC	Statik VAR Kompanzatör
THD	Toplam Harmonik Bozunma
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YGAA	Yüksek Gerilim Alternatif Akım
YGDA	Yüksek Gerilim Doğru Akım
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile dünya genelinde enerji ihtiyacının artması fakat buna zıt olarak yer altı fosil yakıt kaynaklarının hızlı biçimde azalması neticesinde yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına olan ilgi ve araştırmalar artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir bölümü enerjisini dolaylı veya doğrudan güneşten almaktadır, bu kaynağın tükenmesinin teorik olarak milyarlarca yıl sonra gerçekleşeceğinin tahmin edilmektedir. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji kaynakları yakın gelecekte üzerine en yoğun biçimde çalışılacak konular arasında yer almaktadır. Günümüzde kullandığımız enerji türlerinin çoğunun kaynağı fosil yakıtlar olup; petrol kömür ve doğal gazdır. Dünyadaki petrol doğal gaz ve kömür rezervlerinin yakın gelecekte tükeneceği tahmin edilmektedir. Ayrıca fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan karbondioksit (CO₂) gazı sera etkisi meydana getirerek küresel ısınmaya ve dolaylı biçimde küresel iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Petrol, kömür ve doğalgaz gibi yakıtlardan enerji üretmek zararlı atıklar sebebiyle yaşam alanları için tehlike oluşturmaktadır. Bu yüzden, artan enerji talebi sonucunda fosil yakıtlar kullanarak elektrik enerjisi üretimi, insanlık için büyük bir endişe kaynağı olmaktadır. Küresel iklimi kötü yönde etkileyen fosil yakıt kullanmak yerine yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli biçimde kullanabilmek, son yıllarda popüler bir çalışma konusu haline gelmiştir [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin çevre ve iklim üzerinde daha olumlu gelişmelere sebep olacağı tahmin edilmektedir. Bu bağlamda rüzgâr ve güneş enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kapsamında son yıllarda en çok kullanılan ve en çok geliştirilen iki enerji türüdür.

Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılan çok sayıda çalışma ve araştırmaya rağmen fosil yakıtlar ve nükleer kaynaklar gibi yenilenebilir olmayan teknolojileri kullanan sistemlerin dünya enerji üretimi içerisindeki payı yaklaşık %76 olarak belirtilmektedir. Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı (Renewable Energy Policy Network'21 – REN21) 2019 yılı raporuna [2] göre dünyada hâlihazırda kullanılan yenilenebilir enerji potansiyeli Tablo 1.1'de verilmiştir. Tablodan, yenilenebilir enerji kaynaklarının 2018 yılı için toplam kurulu gücün yaklaşık %24'üne katkıda bulunduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji sistemleri incelendiğinde; güneş enerji santralleri toplam kurulu güce %5 oranında bir katkı sağlamaktadır. Tahminlere göre, güneş enerjisi alanında kurulacak olan tesisler 2019 ve 2020 yıllarında toplam 310 GW arasında elektrik enerjisi gücü sağlayacak, böylece güneş enerjisi sistemlerinin 2020'nin sonuna kadar dünya elektrik enerjisinin %8'ini üretebilecek düzeye geleceği öngörülmektedir [3]. Bu hızlı artışın neticesinde ise güneş ve rüzgâr enerjisinin özellikle 2050 yılına kadar dünyadaki elektrik enerjisi üretiminin yarısından fazlasına katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Bu durum ise yenilenebilir enerjinin üretim teknolojileri, mikro-şebekeler ve yeni iletim stratejilerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır [4].

Tablo 1.1. Dünya bazında yıllara göre kullanılan yenilenebilir enerji potansiyeli.

Yenilenebilir enerji potansiyeli	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Hidroelektrik enerji (GWe)	970	990	1.018	1.055	1.064	1.094	1.115	1.132
Rüzgâr enerjisi (GWe)	238	283	319	370	433	487	539	491
Güneş enerjisi (GWe)	70	100	138	177	227	303	402	505
Güneş enerjisi (GWth)	232	255	373	406	435	456	472	480
Etanol üretimi (10 ⁹ litre)	86	83	87	94	98	103	106	112
Bio-dizel üretimi (10 ⁹ litre)	21.4	22.5	26	29.7	30	31	31	34
YEK toplam gücü (GW)	1360	1470	1578	1712	1849	2017	2195	2378
FEK toplam gücü (GW)	5250	5600	5800	6150	6500	6700	7220	7600
YEK/FEK oranı (%)	20.5	20.8	21.3	21.8	22.1	23.1	23.3	23.8

GWe: GigaWatt Elektrik, GWth: GigaWatt Termal, YEK: Yenilenebilir enerji kaynakları, FEK: Fosil enerji kaynakları

Fosil yakıtlar ve nükleer enerji gibi çevre kirliliğine yol açan kaynaklara ihtiyaç duyulmadan elektrik enerjisi üreten fotovoltaik (PV) ve rüzgâr enerji sistemlerinin önemi ve kullanımı, yarıiletken teknolojinin gelişmesi ve elektronik malzemedeki gelişmeler sonucunda, her geçen gün artmaktadır. Güneş ve rüzgâr kaynaklı yenilenebilir enerji sistemleri tarım ve doğal yaşam alanlarına zarar verdiği bilinse dâhi, fosil yakıtlara nazaran çok daha az zararlı olduğu için tercih edilmektedir. Tablo 1.1’de de görüldüğü üzere 2011 yılında toplam 308 GW olan güneş ve rüzgâr kaynaklı enerji üretim gücü uluslararası anlaşmalar ve yenilenebilir enerji üretimini teşvik eden politikalar ile 2018 yılında 996 GW olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte PV enerji sistemlerinin üretim miktarının 7 katından fazla oranda artmış olması güneş enerjisi konusundaki çalışmaların ve ilginin arttığını da göstermektedir. Yenilenebilir enerji üretim tekniklerinin yanı sıra endüstriyel üretim ve yarıiletken malzemeler konusundaki ilerleme ile elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım alanında mevcut yöntemlerin verimini arttıracak veya daha yüksek verime sahip ve yeni yöntemler geliştirecek altyapı günümüzde mevcut kılınmıştır.

Elektrik enerjisi iletim sistemlerinin gelişmesi göz önüne alındığında bu senaryoya en uygun olduğu düşünülen yüksek gerilim doğru akım (YGDA) iletim sistemleri büyük oranda ilgi çekmektedir. YGDA iletim teknolojisi özellikle açık denizde kurulması planlanan rüzgâr ve güneş tarlaları ile ülkeler arasındaki yüksek kapasitedeki enerji akışını sağlamak için kilit bir bileşen olarak görülmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik teknolojik gelişmelere rağmen YGDA iletim sistemlerinin diğer DA ve AA enerji üretim veya iletim sistemler ile entegrasyonu konusunda verimlilik ve maliyet açısından çok daha fazla bilimsel çalışma yapılması gerekmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin çıkış terminallerinin YGDA şebekelere veya mikro şebekelere bağlanabilmesi gibi çok terminalli uygulamalarda en uygun teknolojinin gerilim kaynağı dönüştürücüler (GKD) olduğu kabul edilmektedir [5].

YGDA iletim sistemlerinin en önemli parçasını oluşturan GKD tabanlı modüler çok seviyeli dönüştürücüler konusu geniş bir çalışma alanı haline gelmiştir. Genel amaçlı tasarlanan ve kontrol edilen çevricilere ek olarak yenilenebilir enerji sistemleri gibi düzensiz ve dalgalanmalı çıkış veren sistemlerin de YGDA iletim sistemlerine entegrasyonu için farklı giriş karakteristiklerine karşı istenilen tepkiyi verebilen güç elektroniği cihazlarının tasarımı ve optimizasyonu elektrik enerji sistemlerinin geleceği için hayati bir önem arz taşımaktadır.

Bu çalışmada, rüzgâr ve PV tabanlı yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin YGDA iletim sistemleri ile alternatif akım iletim sistemlerine güvenli biçimde bağlanabilmesi için iletilen enerjinin dalgalanmalardan arındırılabilmesi ve enerji kalitesinin korunması amaçlanmaktadır. Bu amacı yönelik olarak YGDA sistemlerin yukarıda belirtilen diğer iletim veya üretim sistemlerine bağlanabilmesini sağlayacak modüler çok seviyeli GKD tabanlı bir dönüştürücü tasarlanarak bununla birlikte kontrol ve optimizasyonunun sağlanması gerçekleştirilmiştir. Böylece, üretim ve iletim sistemlerinin enerji kalitelerinin ve maliyet oranlarının maksimum olması amaçlanmaktadır.

Bu tezde YGDA ve YGAA sistemler incelenerek, yapay sinir ağları ve yapay zeka optimizasyon teknikleri hem tekil hem de hibrit biçimde kullanılarak bu iki tip sistemin bağlantısı ve parametre optimizasyonuna dair çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak yenilenebilir kaynaklı elektrik üretim sistemleri modellenmiş, bu modellere ait ön optimizasyon ve özellik çıkarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve modeller kullanılarak modüler çok seviyeli dönüştürücünün (MÇSD) sisteme entegrasyonu ile literatürde kullanılan IEEE 9, 39 ve 57 baralı güç sistemleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr ve PV içeren sistemlerde statik ve dinamik iyileştirme, optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaların gerilim kararlılığı, maksimum güç noktası ve aktif - reaktif güç eğrisi üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu gözlenerek yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde, yenilenebilir enerji sistemleri ve YGDA iletim sistemlerinin şebekeye entegrasyonu ile ilgili bilgiler verilmiş, sisteme olan katkıları belirtilmiştir. Ayrıca konu ile ilgili optimizasyon çalışmaları incelenmiştir.

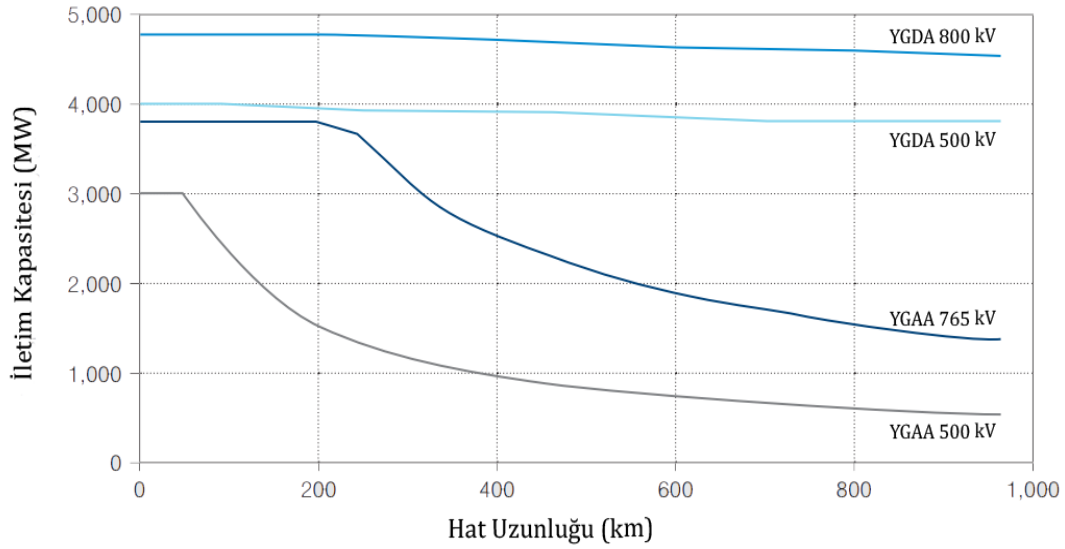
2.1. YGDA İletim Sistemi

YGDA iletim sistemi, yüksek güç ve yüksek gerilim değerlerinde çalışan, elektriğin dönüştürülmesi açısından da yarıiletken ve güç elektroniği teknolojisine dayalı bir sistemdir. Klasik YGAA sistemlerin herhangi bir sebep nedeniyle kullanılamaması veya tercih edilmemesi durumunda hem farklı noktalardaki yenilenebilir üretim tesislerini hem de küçük ölçekli sistemlerin ana şebekeye entegrasyonunu gerçekleştirmek için uygundur [6]. YGDA sistemler ilk olarak deneme ve tanıtım amacıyla 1954 yılında İsviçre'de kullanılmıştır. Doğru akım teknolojisi alternatif akımın dönel manyetik alanları üretmesi ve trafolardaki gelişme nedeniyle arka plana atılmış ve pek fazla kullanım imkânı bulmamıştır [7]. Avrupa'da ilk olarak İsviçre'de kullanılmaya başlanan YGDA sistemlerin sayısı günümüze kadar büyük oranda artmış ve hâlihazırda kullanılan 170'ten fazla YGDA iletim sistemi kurulmuş ve başlatılmıştır [8]. Katı hal elektroniğindeki hızlı gelişme ve yenilikler sayesinde yüksek gerilim ve güç altında dahi olsa istenilen verim alınabilen kırpıcılar, çoklayıcılar ve dönüştürücüler üretilmeye ve endüstriyel olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dünyada günümüze kadar inşa edilen YGDA iletim hattı sayısı 200'ün üzerindedir. Bazı yüksek güç değerine sahip YGDA iletim hatları Tablo 2.1'de verilmiştir [9]. Verilen bu projelerin yanı sıra halen YGDA iletim hatlarının projeleri devam etmektedir.

Tablo 2.1. Dünya bazında işletmeye alınan bazı YGDA projeleri.

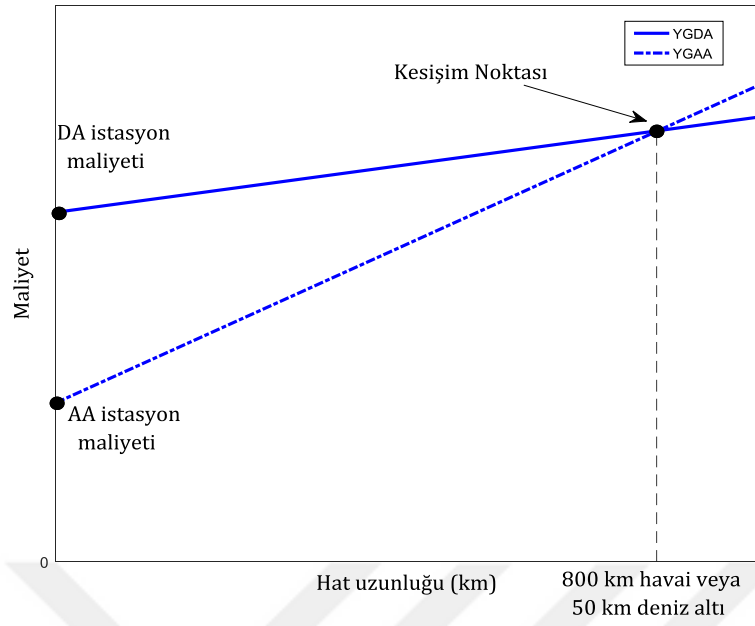
No	Adı	Yeri	Yılı	Güç (MW)	Gerilim (kV)	DA Hat Uzunluğu (km)
1	Hami - Zheng	Çin	2014	8000	800	2192
2	Xiluodo - West	Çin	2014	8000	800	1680
3	Jinping - Sunan	Çin	2013	7200	800	2090
4	Plains & Eastern	ABD	2018	4000	600	1207
5	Plains & Eastern	ABD	2018	4000	600	1207
6	Rock Island	ABD	2018	3500	600	805
7	Grant Belt Exp	ABD	2018	3500	600	750
8	Xingu-Estreito	Brezilya	2017	4000	800	2077
9	Rio Madeira	Brezilya	2013	7100	600	2375
10	Western HVDC	İngiltere	2018	2200	600	422
11	Inelfe	Fransa	2015	2000	320	64
12	BirtNed	Hollanda	2010	1000	450	245

Elektrik enerjisi iletim sistemlerinin gelişmesi göz önüne alındığında bu senaryoya en uygun olduğu düşünülen YGDA iletim sistemleri büyük oranda ilgi çekmektedir. YGDA iletim sistemleri teknolojisi özellikle açık denizde kurulması planlanan rüzgâr ve güneş tarlaları ile ülkeler arasındaki yüksek kapasitedeki enerji akışını sağlamak için kilit bir bileşen olarak görülmektedir [10]. YGDA iletim sistemlerinin ve YGAA iletim sistemlerinin hat uzunluklarına göre kapasiteleri Şekil 2.1 ile verilmiştir [11]. Burada görüleceği üzere hem 765 kV hem de 500 kV çalışma gerilimine sahip YGAA iletim sistemleri kapasitesi yaklaşık 300 km hat uzunluğu sonrasında yüksek oranda düşüşe geçmektedir. Buna karşın 800 kV ve 500 kV çalışma gerilimine sahip olan YGDA iletim sistemlerinin kapasiteleri ise %10'un altında bir düşüş göstererek enerji güvenliği ve kalitesini iyi düzeyde sağlayabilmektedir.



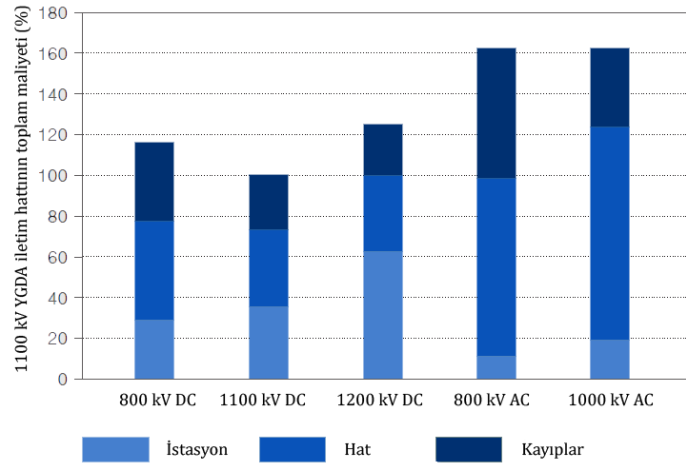
Şekil 2.1. YGDA ve YGAA iletim kapasiteleri.

Son 30 yılda üzerinde birçok çalışma yapılan ve uzun iletim hatları gereken yerlerde kullanılan YGDA sistemlerin maliyet analiz grafiği Şekil 2.2'de görülebilir [12]. Doğru akım (DA) dönüştürücü istasyonlarının yüksek maliyetine rağmen en az 800 km havai veya 50 km deniz altı iletimi gerektiren sistemlerde YGDA iletiminin daha ekonomik olduğu görülebilmektedir. Bunun yanı sıra YGDA sistemlerin frekans senkronizasyonu gerektiren YGAA iletim sistemlerine göre mikro şebekelere bağlanması ve senkronizasyonu çok daha kolaydır. Yakın gelecekte elektronik donanım maliyetlerinin azalması ile YGDA sistemlerinin YGAA sistemlere göre hem ekonomik hem de kullanım kolaylığı yönünden çok daha avantajlı hale geleceği varsayılmaktadır [11].



Şekil 2.2. YGDA ve YGAA sistemleri maliyet karşılaştırması.

Hem teorik hesaplamalar hem de uygulama bazlı yapılan hesaplamalarda YGDA iletim sistemlerinin enerji kayıp oranının YGAA iletim sistemlerine göre kayda değer ölçüde düşük olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.3'te DA ve AA hatların kayıp-maliyet oranlarının gerilim seviyelerine göre değişimleri gösterilmiştir [11].

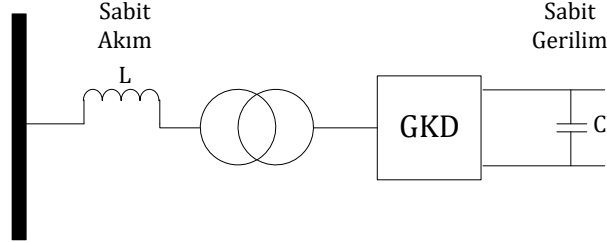


Şekil 2.3. DA ve AA hatlardaki kayıp maliyet oranı.

2.2. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler

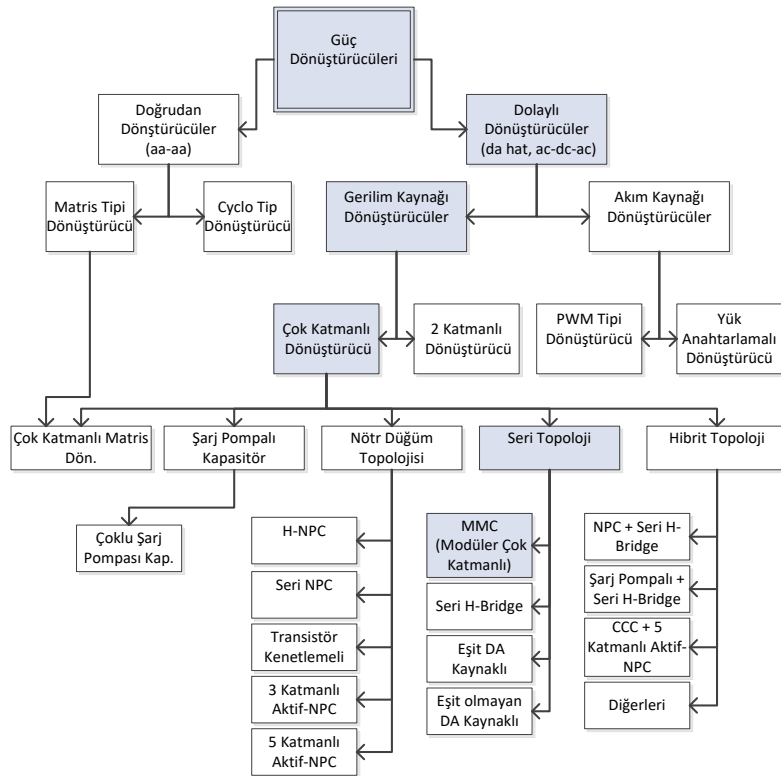
Gerilim kaynaklı dönüştürücüler (GKD) kendiliğinden komuta eden anahtarlardan, örneğin; kontrollü bir şekilde açılabilen veya kapatılabilen kapı kapatma tristörlerinden (GTO)

veya yalıtımlı bipolar transistörlerden (IGBT) oluşur. Bu tip dönüştürücüler darbe genlik modülasyonu (DGM) tekniğini kullanarak yüksek anahtarlama frekansında çalışmaktadır. Basit yapıda gerilim kaynaklı dönüştürücü örneği Şekil 2.4 ile gösterilmiştir.



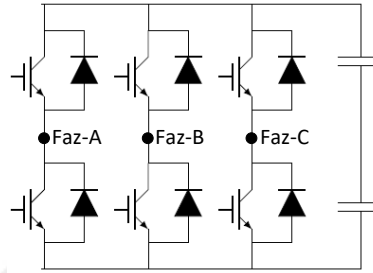
Şekil 2.4. Gerilim kaynaklı dönüştürücü (GKD).

İletim ve dağıtım sistemlerinde, YGDA ve YGAA iletim sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin birbirlerine dönüştürülmesi ise sistemin getirdiği bir zorunluluktur. Bu amaca yönelik olarak kullanılan güç elektroniği cihazları genel adıyla çevirici veya dönüştürücü olarak anılmaktadır. YGDA iletim sistemleri için GKD tabanlı çok seviyeli dönüştürücü konusunda akademik makaleler ve tezler mevcuttur [13-16]. Yüksek güç ve akım ileten sistemlerde seri veya paralel olarak bağlanan birçok alt modülden oluşan çok seviyeli dönüştürücüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç dönüştürücülerine ait sınıflandırma Şekil 2.5'te verilmiştir [17].



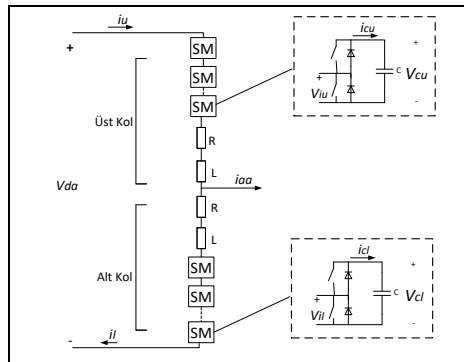
Şekil 2.5. Güç dönüştürücülerinin sınıflandırılması.

GKD'ler zamanla tasarım ve kullanım açısından farklılaşmalar ve gelişmeler yaşamıştır. Şekil 2.6'da gösterilen ilk nesil GKD'ler, yüksek anahtarlama frekanslarına sahip DGM teknikleri kullanılarak iki katmana dayanıyordu. Bununla birlikte, en yeni GKD topoloji önerisi, Prof. Marquardt'ın [18] önerisine dayanan modüler çok seviyeli dönüştürücüdür (MÇSD). Bu cihazda gerilim ve güç seviyesine bağlı olarak istenilen sayıda ve seviyede katman kullanılabilmektedir. MÇSD yaklaşımı, modüler özelliği sayesinde teorik olarak modül sayısı [19] üzerinde herhangi bir sınır koymamaktadır. Dolayısıyla MÇSD'ler hem enerji verimliliği, hem sinyal kalitesi hem de güç kararlılığı için literatürde yerini almayı başarmıştır.



Şekil 2.6. 2-Katmanlı GKD topolojisi.

Modüler çok seviyeli bir dönüştürücü elemanı genellikle faz başına alt ve üst koldan oluşmaktadır. Her bir alt ve üst kol ise seri olarak bağlanmış alt modüllerden (SM) oluşmaktadır. Bu alt modüller dönüştürücünün yapısı ve amacına göre tristör, transistör, diyot gibi güç elektroniği elemanlarından oluşabilmektedir. Modüler çok seviyeli dönüştürücünün tek-faz şematiği Şekil 2.7'de gösterilmiştir [15]. Bu şekil incelendiğinde her bir alt modülün anti-paralel diyotlardan, kondansatörden ve genellikle IGBT olarak seçilen anahtarlama cihazlarından oluştuğu görülebilmektedir. Bu cihaz DA-AA dönüşümü amacıyla tasarlanmış bir dönüştürücüdür. Üst koldan giren ve alt modüllerden geçen doğru akım I_u alt koldan I_l olarak çıkmaktadır. Modeldeki rezistif elemanların tamamı R olarak, parazit ve dalgalanmaları engellemek amacıyla kullanılan endüktör elemanları ise L ile gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Modüler çok seviyeli dönüştürücü tek faz şematiği.

2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu ve Sistemin Optimal Kontrolü

Yarı iletken teknolojileri ve güç sistemleri konusundaki teknolojik gelişmelere rağmen, YGDA iletim sistemlerinin diğer DA veya AA güç üretim veya iletim sistemleri ile entegrasyonunda verimlilik, kararlılık ve enerji güvenliği açısından daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren sistemde, YGDA iletim sistemleri ile iletim yapabilmek için, çok terminalli uygulamalarda en uygun teknolojilerden birinin gerilim kaynağı dönüştürücüler (GKD) olduğu kabul edilmektedir [20]. Genel amaçlı tasarlanmış ve kontrollü dönüştürücülere ek olarak, yenilenebilir enerji sistemleri gibi düzensiz ve dalgalı çıkış sistemlerinin YGDA iletim sistemlerine entegrasyonu için güç elektroniği cihazlarının tasarımı ve optimizasyonu, elektrik enerjisi sistemlerinin geleceği için hayati önem taşımaktadır. Literatürde YGDA bağlantıları konusunda yapılan çalışmaların bazıları incelendiğinde; [21]'de, YGDA ara bağlantıları için bir hibrit dönüştürücü topolojisi önerilmiştir. Ayrıca, PV ve rüzgâr enerjisi sistemleri de dâhil olmak üzere YGDA ara bağlantısının frekans kontrolü incelenmiştir [22]. Sistem kararlılığını ve gerilim sapmasını etkileyen YGDA ve YGAA iletim sistemleri için GKD tabanlı çok seviyeli dönüştürücülerin geçici hâl kararlılığını ve kararlı durum hatasını iyileştirmeye yönelik çalışmalar vardır [23-26]. Bununla birlikte, rüzgâr ve PV elektrik enerjisi sistemlerinin YGDA sistemlerine uygulanmasına yönelik yeni birçok çalışma bulunmaktadır [27-33]. [27]'de, YGDA uygulamalarında PV sistemlerini başarılı bir şekilde kurmak için bir hibrit kontrolör topolojisi kullanılmıştır. Bir rüzgâr tarlası için çift kapalı döngü vektör kontrol stratejisi incelenmiş ve [28]'de rüzgâr çiftliği sistemine uygulanmıştır. Bununla birlikte, arıza akımını sınırlamak ve gerilim kararlılığını artırmak için YGDA ve rüzgâr çiftliklerine yerleştirilen süper iletken bobin optimizasyonu sisteme uygulanmıştır [29]. Bununla birlikte literatürdeki bazı çalışmalar, rüzgâr gücünün artan penetrasyonunun güç sisteminin reaktif güç gereksinimi üzerindeki etkisini ve gerilim kararlılığı problemini ele almıştır [30-33]. Başka bir çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin entegrasyonunun etkisi, uzun vadeli gerilim kararlılığı için sunulmuştur [34]. Öte yandan, uzun mesafeli kurulu rüzgâr çiftlikleri, AA iletim sistemleri aracılığıyla birbirine bağlıdır ve reaktif güç gereksinimleri için daha büyük kapasiteli kompanzasyon cihazlarına ihtiyaç duyarlar [35-38]. Bununla birlikte, rüzgâr enerjisi penetrasyon senaryosunda YGDA iletim sistemi aracılığıyla AA sisteminin en zayıf alanı için gerilim kararlılığını korumak için etkili bir reaktif güç rezerv kontrol yöntemi kullanılmalıdır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında, yüksek rüzgâr enerjisi penetrasyonunda invertörlerin artan reaktif güç gereksinimleri nedeniyle AA şebekelerinin reaktif güç değişimine en duyarlı olan kritik barada gerilim kararlılığını sağlamak ve geliştirmek için kademe değiştirici transformatör (KDT) ve statik kompanzatör (STATCOM) koordinasyonu incelenmiştir.

Şönt kapasitörler ile koordine edilmiş KDT transformatörleri, reaktif gücü destekleyen ve reaktif güç rezervini artıran statik var kompanzatör (SVC) veya STATCOM cihazları kullanılarak çeşitli gerilim kontrol sorunları çözülmektedir. Birçok araştırmacı, KDT ve STATCOM koordinasyonu için farklı yaklaşımlar ve teknikler önermiştir. Paserba ve arkadaşları [39], KDT ve STATCOM için ilk koordinasyon denetleyicilerinden birine, kademe konumunun STATCOM'un ölü bandında kısıtlanan STATCOM çıkışına bağlı olarak anahtarlama kontrollü olduğunu önermiştir. Son ve arkadaşları [40], dağıtım trafo merkezindeki KDT ve SVC arasında koordineli kontrol önermektedir. Bu yöntem, kademe konumunu değiştirmeden SVC çalışma marjını ayırmaya yardımcı olur, ancak SVC çıktısının sıfırlanması dikkate alınmaz ve incelenmez. Mansour ve arkadaşları [41] SVC için iki aşamalı bir kontrol stratejisi geliştirdi, SVC'nin reaktif güç çıkışını sınırladı ve reaktif güç rezervini sürekli olarak istenen değerde tutmaktadır. [42]'de KDT trafo etkinleştirilir ve STATCOM çıkışını bir ölü bölge ile geciktirerek çevrimiçi olarak sağlanır. [43]'te YSA, KDT ve STATCOM cihazları arasındaki koordinasyonu kontrol etmek için kullanılır; KDT'nin optimum kademe konumu, STATCOM'un reaktif güç talebine yanıt vermesinin hemen ardından YSA kullanılarak elde edilir. [44]'te sunulan koordinasyon kontrol yönteminde, KDT'nin referans gerilimi STATCOM çıkışına göre belirlenir, ayrıca istenen çalışma noktasında salınımları önlemek için doğrusal olmayan bir ölü bölge bloğu kullanılır. STATCOM'un KDT ve kapasitör gibi diğer cihazlarla koordinasyonu ve kontrolü için yeni bir yöntem [45]'te sunulmuştur. STATCOM'un [46] kontrol sisteminde referans geriliminin ayarlanmasını sağlayan bazı modifikasyonlar önerilerek etkili bir koordinasyon sağlanmıştır. Rüzgâr enerjisinin entegre olduğu güç sistemlerinde son yıllarda STATCOM ve SVC cihazları ile KDT trafoları arasında koordinasyon çalışmaları birçok araştırmacı tarafından önerilmiştir. Mursi ve arkadaşları [47], bir rüzgâr tarlasında birincil ve ikincil gerilim kontrolü sağlayan ve STATCOM'un reaktif güç marjını acil durumlar için yüksek tutmayı başaran bir koordinasyon önerdi. Liang ve arkadaşları, [48], dağıtık üretimi (DG) içeren bir dağıtım sistemi için SVC ve KDT arasında Neuro-Fuzzy tabanlı bir koordinasyon önermiştir. Önerilen yaklaşımda, SVC'nin ve rüzgâr türbininin reaktif güç çıkışları, KDT'nin aşama konumunu belirlemek için kullanılır. Bu tez çalışmasında, KDT ve STATCOM kontrolörü arasında önerilen koordinasyon, GKD-YGDA aracılığıyla güç sisteminin en zayıf kısmına nüfuz eden rüzgâr türbinlerinin reaktif güç talebinin neden olabileceği olumsuz etkiyi ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Önerilen koordinasyon, STATCOM cihazının reaktif güç rezervini özellikle yüksek penetrasyon seviyelerinde destekler ve gerilim kararlılığının iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Yenilenebilir enerji sistemleri de dahil olmak üzere yüksek gerilim bir DA bağlantısını tasarlamak ve işletmek için bazı çalışmalar, farklı kontrol yaklaşımları ve optimizasyon yöntemleri kullanarak dönüştürücü özelliklerini optimize etmeye odaklanmıştır. [49]'da, dinamik yükler sağlayan DA-DA dönüştürücüler incelenmiş ve verimliliği artırmak için optimize

edilmiştir. Larouci ve arkadaşları, AA-DA güç dönüştürücülerin multifizik kısıtlamalar altında optimizasyonu üzerine çalışmıştır [50]. Geometrik programlama [51], çok seviyeli DA-AA dönüştürücülerin amaç fonksiyonunu optimize etmek için de kullanılmıştır. [52]'de ise geçici hâl kararlılık kısıtlı optimal güç akışı, evrimsel algoritmalar kullanılarak optimizasyon uygulamıştır. Ayrıca literatürde, DA-DA ve DA-AA dönüştürücü çıkışlarının, PID veya LQR kontrol sistemleri uygulanarak istenen sınırdaki tutulması için yorulduğuna dair çalışmalar mevcuttur [53-55]. [56]'da rüzgâr enerjisi sistemlerinde PI kontrolü ile birlikte birleşik bir güç akışı kontrolörü kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi sistemleri için bir kısmi-sıralı orantısal kontrolör kullanılmış ve geleneksel PI kontrolörü [57] ile karşılaştırılmıştır. Mosaad ve arkadaşları [58], bir hibrit güç sisteminin performansını artırmak için en uygun PI denetleyici yöntemi uygulamıştır. Birçok çalışmada [43, 48, 49, 52, 53, 58] en iyi performansı ve verimliliği elde etmek için kontrol parametreleri genellikle klasik veya sezgisel yöntemler kullanılarak optimize edilmiştir. [59]'da, sezgisel optimizasyon yöntemleri güç dönüştürücülere uygulanmıştır ve ayrıca sistem performansını iyileştirmek için Anfis-PID tabanlı hibrit kontrolör de alçaltıcı dönüştürücülerde kullanılmıştır [60]. Bununla birlikte literatürde, DSP tabanlı PID ve DA-DA dönüştürücüler için bulanık denetleyiciler [61] incelenmiştir. [62]'de doğrusal-doğrusal olmayan çeviricilerle dönüştürücü performansını artırmak için PID denetleyicide kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle ideale yakın bir sinüzoidal sinyalin karakteristiği ve bu karakteristiğin optimizasyonuna dair çalışmalar gerçekleştirilmiş, sonraki kısımlarda ise rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinin test sistemlerine bağlanması neticesinde istenilen amaca yönelik kontrolör parametre optimizasyonu neticesinde gerilim kararlılığını iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, güneş enerji sisteminin YGDA üzerinden YGAA sisteme bağlı olduğu durumda hem dönüştürücü parametrelerinin hem de sistemin gerilim kararlılığının iyileştirilmesi için yapay sinir ağları ve sezgisel yöntemlerle çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca reaktif gücü ve sistem gerilim kararlılığını destekleyen güç elektroniği cihazları da sisteme eklenerek simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Elektrik enerjisi talebi gün geçtikçe artmaktadır. Son yıllarda enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla, hem doğayı mümkün olduğunca kirletmeyecek hem de insanların yaşam koşullarını kısıtlamayacak şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarını elektrik enerjisine dönüştüren rüzgâr, güneş enerjisi ve dalga enerjisi santralleri gibi elektrik üretim tesisleri kurulmaktadır. Dolayısıyla, enerjinin hem kalite hem de maliyet bakımından en uygun biçimde sağlanabilmesi için enerji üretim ve iletim tesislerindeki kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilebilmesi neticesinde sistemin matematiksel modellemesinin yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında MÇSD ve hibrit optimizasyon tekniklerini kullanarak enerji kalitesinin kontrol edilmesi ve enerji iletiminin YGDA iletim sistemlerinin de entegre edildiği sistemlerde geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde alternatif akım ve doğru akım iletim sistemleri ile birlikte güç dönüştürücüleri, kontrol ve optimizasyon teknikleri ile sistem modeli detaylandırılmıştır. Bu çalışmada öncelikle MÇSD üzerine ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) içeren temel bir sistem üzerinde optimizasyon örnekleri gösterilmiş ve daha sonra literatürde sıklıkla kullanılan IEEE-9, 39 ve 57 baralı güç sistemleri üzerine rüzgâr ve PV sistemlerin entegrasyonu ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.1. Elektrik Enerji Sistemlerinin Yapısı

Elektrik enerji sistemleri; üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. İletim sistemlerinin farklı kısımları farklı gerilim seviyelerinde çalışmakla birlikte genellikle gerilim değeri 1 kV'un altında alçak gerilim, 1 ile 100 kV arasında ise orta gerilim, 100 kV değerinden yüksek gerilim değerleri ise yüksek gerilim olarak adlandırılmaktadır.

3.1.1. Alternatif Akım Sistemleri

3.1.1.1. Üretim

Alternatif akım sistemlerinde elektrik enerjisi klasik tip yani hidroelektrik, kömür, petrol, doğal gaz kullanan tesislerde genellikle bir türbinin dönüş kuvveti ve aktarma organlarındaki elektriksel etkileşim neticesinde üretilmektedir. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü genellikle senkron generatörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Senkron generatörler tarafından 10 ile 20 kV arasında olan gerilim seviyesinde üretilen sinyal yükseltici transformatörler kullanılarak yükseltilir ve iletim hattına gönderilir. Son yıllarda faaliyete alınan üretim tesislerinde, anma güçleri yüksek olan generatörler kullanılmaya başlanmıştır. Bu

yaklaşım sonucunda daha düşük maliyetli üretim alanları ve güç istasyonları ile daha küçük ekipmanlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte bazı ülkelerde son yıllarda doğal gaz çevrimli santrallerin kullanımı artmıştır. Genel olarak bir senkron generatör iletim hattına yükseltici bir transformatör ile bağlıdır. Düşük güçteki generatörler kablolar, daha büyük olanları ise güçlü sorunsuzca aktarmaya yarayan baralar ile bağlanır. Generatör transformatörleri genellikle tank tipidir [63].

3.1.1.2. İletim

Bir enerji iletim hattında kayıplar hattın empedansı nedeniyle aktarılan enerji akımının ikincil kuvveti ile orantılı olması sebebiyle gerilim yükseltilir ve akım düşürülerek iletim sağlanmaktadır. Elektrik şebekesi tüm güç istasyonlarının yük merkezlerine bir iletim-dağıtım hatları bağlantılarından oluşmaktadır. Genellikle iletim şebekesi generatörden tüketicilere elektrik enerjisini birçok mümkün olan bağlantılarla güvenilir ve esnek bir biçimde gönderecek şekilde bağlanır.

Elektrik enerjisi üretimin yük merkezlerine yakın olduğu yerlerde direkt olarak bir alt dağıtım şebekesine bağlanarak iletilir. Bir güç sistemine yeni ilaveler yapılacağı zaman eski hatlar daha düşük gerilim seviyelerine bağlanır ve bu hatlar alt iletim şebekesinin bir parçası olabilir.

3.1.1.3. Dağıtım

İletim hatları, transformatörler, kontrol cihazlarının bulunduğu bölge dağıtım bölgesi olarak adlandırılır. Elektriksel güç transferi burada kontrol edilir; gerilim düzeyleri belirlenir; sistem ve enerji güvenliği, koruma aygıtları tarafından burada sağlanır. Üretilen enerjinin büyük bir kısmı direkt olarak tüketiciye orta ve yüksek gerilim şebekeleri vasıtasıyla iletim veya alt iletim hatlarından iletilmektedir edilir. Dağıtım şebekeleri genellikle taşıma sistemlerinde kullanılan birleşik yapıya uyması için radyal yapıda bağlanırlar. Bazı endüstriyel tüketiciler kendi enerji gereksinimlerini kendileri karşılayabilirler. Tipik olarak generatör terminalinden çıkan elektrik enerjisinin yaklaşık %8'i iletim ve dağıtımda kaybolmaktadır [64]. Dağıtım şebekeleri çoğunlukla 380 kV, 154 kV ve 66 kV gerilim altında çalışmaktadır. Güç, yüksek güçlü servis istasyonlarından dağıtım şebekelerine gönderilir. Giriş gerilimine karşın genellikle 33 kV ve 15 kV gerilim seviyelerine dönüştürülerek şehir elektrik dağıtım şebekesindeki yük noktalarına bağlanır. Dağıtım şebekelerinde son kullanıcılara elektrik gücünün ulaşması için trafo postalarında 33 kV veya 15 kV seviyesi 0.4/0.231 kV alçak gerilim seviyesine indirilir [65]. Dağıtım tesisleri çok sayıda gelen ve giden hatların birleştiği nokta olması sebebiyle gelen

akımlar belirli bir baraya gelir ve herhangi bir arızaya karşı korunmak amacıyla sürekli olarak kontrol edilmektedir.

3.1.2. Doğru Akım Sistemleri

Doğru akım iletim sistemleri yüksek güç iletimini amaçlayan; yüksek gerilim değerlerine sahip ve son yıllarda üzerinde çokça çalışılan yarıiletken ve güç elektroniği teknolojisini kullanan bir iletim sistemidir. YGDA iletim sistemlerde havaî iletim hatları, yer altı ve deniz altı iletim hatları kullanılarak uzun mesafedeki güç iletimi sorunsuz biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte YGDA, geleneksel olarak kullanılan YGAA iletim sistemlerinin düşük verime sahip olacağı veya kullanılamayacağı durumlarda iki merkez arasındaki iletimi sağlayabilmek için de uygundur. Bu tip sistemlerin YGAA iletim sistemlerine nazaran olumlu veya olumsuz durumları mevcuttur; bunlardan en önemlisi DA ve AA sinyal dönüşümleri için yüksek maliyetli ve kararlı bir dönüştürücü sisteminin modellenmesi gerekmesinden kaynaklanmaktadır. Bu tezde farklı dönüştürücü topolojileri ve yenilenebilir enerji kaynakları içeren sistemlerin iletim ağına entegrasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.

3.1.2.1. Doğru Akım İletim Sistemlerinin Avantajları

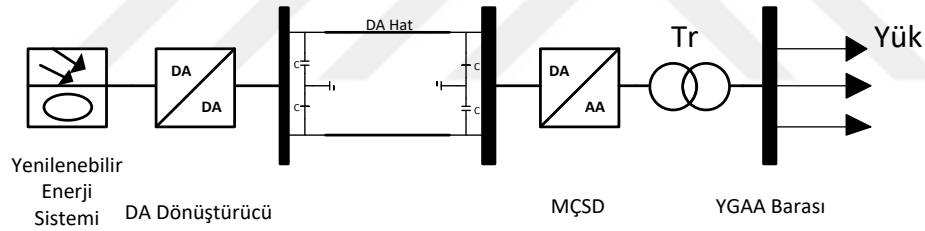
Güç ve iletim sistemlerinin tasarımı klasik açıdan bakıldığında, tüketiciden uzak olan üretim tesislerini içermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı bu sistemi devam ettirmekte ve güvenilir ve verimli bir şekilde güç iletiminde yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla hem klasik hem de yenilenebilir enerji santrallerinin sisteme entegrasyonu şebekeyi daha karmaşık hale getirmektedir. YGDA sistemler tasarım ve kontrol yetkililerine kayıpsız ve özellikle uzun hatlar için daha düşük maliyetli bir güç aktarımı teknolojisi sunmaktadır. YGDA iletim teknolojisinin uygun sistemlerde kullanıldığı takdirde; toplu elektrik dağıtımı, uzun mesafeli iletim, asenkron ara bağlantılar, iletim maliyetleri ve çevre konusunda YGAA sistemlere nazaran çok daha verimli ve düşük maliyetli olabilmektedir.

YGDA iletim sistemlerinin önemli avantajları uzak noktalarda kurulan yenilenebilir enerji üretim tesislerinin klasik şebeke entegrasyonu ve ayrık AA sistemlerini birbirine bağlamak için bağlantı hattı olarak kullanılabilir olmasıdır. Frekansları veya faz açıları farklı olan iki ayrı asenkron AA sisteminin mevcut olduğu durumda, DA bağlantısını kullanarak iki AA sistemini birbirine bağlamak en pratik yöntemdir. DA iletim sistemlerinin frekans ve göreceli fazdan bağımsızdır bağımsız olması neticesinde; YGDA ara bağlantıları AA sistemleri güç dalgalanmalarından ve aşırı yükten kaynaklanan koruma amacıyla da kullanılabilir. YGDA ara bağlantıları performans AA ara bağlantısından çok daha iyidir; asenkron ara bağlantı da olumsuz bir anda çok hızlı bir şekilde iletilen gücün kesilmesi veya korunması noktasında

önemlidir. 14 Ağustos 2003, Kuzeydoğu Amerika'da meydana gelen tarihi elektrik kesintisinde YGDA iletimi sayesinde kuzey New York ve Kanada'ya enerji sağlanabilmesi örneği irdelenebilir [66]. Bahsedilen bu arızada enterkonnekte sistemdeki hata sebebiyle frekans düşmesi yaşanmış; koruma elemanlarının devreye girmesi ve yükün azaltılması neticesinde elektrik sinyalinin frekansı aksi yönde hızı bir artış göstermiş ve sistem büyük oranda çökmüştür [67]. Dolayısıyla, YGDA ara bağlantıları vasıtasıyla AA sistemlerine ek güç tedarik etmek bu sistemlerin ve aradaki enterkonnekte bağlantının tesisi ve geliştirilmesi için önemlidir.

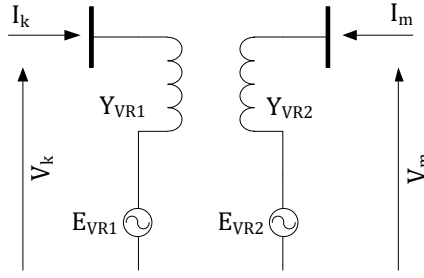
3.1.2.2. Doğru Akım İletim Sistemi Modeli

Bir YGDA iletim sistemi genel olarak dönüştürücüler, transformatörler, kapasitörler, filtreler ve faz reaktörlerinden oluşmaktadır. Eğer hat başı gerilim tipi alternatif akım ise burada AA-DA dönüştürücü; doğru akım ise DA-DA dönüştürücüler kullanılmaktadır. Dolayısıyla giriş gerilimine göre sistemin özellikleri ve içereceği elemanlar değişebilmektedir. Doğru akım üretim sistemine bağlanan ve alternatif akım dağıtım sistemine entegre edilmek istenilen bir YGDA iletim sistemi genel diyagramı Şekil 3.1. ile verilmiştir.



Şekil 3.1. İki-terminalli YGDA iletim sistemi tek-hat eşdeğer diyagramı.

Verilen tek-hat eşdeğer devresinde, DA hattın görevi verimi ve kontrol edilebilirliği yüksek olan dönüştürücüden DA-AA dönüştürücü istasyonuna sabit ve kararlı DA iletimi sağlamaktır. Bu bir gerilim kaynağı dönüştürücü olarak tanımlanabilir ve hat başı ve hat sonu güçleri sağlayarak DA iletimin devamlılığını sağlamakla yükümlüdür. Dönüştürücü kayıpları, hat başı ve hat sonu güçleri hesaplandığında sistemde iletilen DA akım sebebiyle oluşacak kayıplar ve hatalar hesaplanabilmektedir. Böyle bir sistem bir aktif güç kısıtlama denklemi ile birbirine bağlanmış iki paralel bağlantılı gerilim kaynağı ile ifade edilebilmektedir. Verilen sistemde her iki tarafta da alternatif akım kullanılırsa yani hat başı geriliminin de alternatif akım üreten bir kaynağa bağlı olduğu düşünülürse buna ait diyagram Şekil 3.2'deki gibi verilebilir. Ayrıca sisteme ait admitans denklemleri de Eşitlik (1) ile verilmiştir [68].



Şekil 3.2. İki-terminalli temel dönüştürücü devre diyagramı.

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{VR1} & -Y_{VR1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{VR2} & -Y_{VR2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ E_{VR1} \\ V_m \\ E_{VR2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.1.2.3. Doğru Akım İletim Sistemi Dinamik Modeli

Bu tezdeki bazı çalışmalarda sisteme yenilenebilir kaynaklar tarafından enjekte edilen aktif gücün yanı sıra sonraki bölümlerde detaylandırılan reaktif güç destekleme cihazları kullanılarak gerilim kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Böyle bir sistemde GKD-YGDA, aktif ve reaktif gücü bağımsız ve dinamik olarak kontrol edebilir. Reaktif güç, gerekli AA gerilimi ile her dönüştürücüde ayrı ayrı kontrol edilebilir veya manuel olarak ayarlanabilir. Aktif güç akışı, DA gerilimi, AA tarafındaki frekans değişimi ile kontrol edilebilir veya manuel olarak ayarlanabilir. Dolayısıyla GKD-YGDA kullanılırken aktif güç akışı, reaktif güç akışı, AA gerilimi, DA gerilimi ve frekansın kontrol edilebileceği anlamına gelir. GKD-YGDA kontrol sistemi kademeli bir kontrol sistemidir ve tipik olarak daha hızlı bir vektör kontrolörden oluşur. Ayrıca vektör kontrolörü, vektör kontrolörü için referansları sağlayan ek kontrolörler tarafından tamamlanır. Bu nedenle, vektör kontrolörü dış döngüdeki ek denetleyiciler tarafından kapsanan bir iç döngüde yer almaktadır [69]. Bu çalışmadaki ek kontrolörler, dış kontrolörler olarak anılacaktır. Dış kontrolörler arasında DA gerilim kontrolörü, AA gerilim kontrolörü, aktif güç kontrolörü, reaktif güç kontrolörü veya frekans kontrolörü bulunur. Kontrol stratejisini gösteren bir diyagram Şekil 3.3 ile verilmiştir. Burada Pmd ve Pmq sırasıyla d- ve q- eksenini darbe genliğidir. Gerilim ve akımlardaki statik hataları gidermek için PI düzenleyicilerini kullanarak üç fazlı büyüklükleri sabit durumda sabit vektörler olarak temsil etmek için dq senkron referans çerçevesini kullanılmaktadır [70]. Vektör akımı kontrol yöntemi, Şekil 3.4'te gösterilen şebekeye bağlı bir GKD'nin tek hat diyagramı gösterimi kullanılarak formüle edilebilir.

İç kontrolör veya akım kontrol döngüsü, dış kontrolörlerden çok daha hızlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu, mevcut denetleyicilerin ve hiyerarşide daha yüksek olan ilgili tüm

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = v_{S_{\alpha\beta}} - v_{C_{\alpha\beta}} - R_v i_{\alpha\beta} \quad (2)$$

(2) numaralı eşitlik senkron koordinatlara dönüştürülürse;

$$L_v \frac{di_{dq}}{dt} = v_{S_{dq}} - v_{C_{dq}} - (R_v + j\omega_e L_v) i_{dq} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te verilen $j\omega L_v i_{dq}$ ifadesi dq referans çerçevesinin senkron dönüşünün zaman düzlemindeki türevini ifade etmektedir. Aynı eşitlik elemanlara ayrılarak yazılırsa (4) ve (5) elde edilir.

$$L_v \frac{di_d}{dt} = -R_v i_d + \omega L_v i_q - v_{C_d} + v_{S_d} \quad (4)$$

$$L_v \frac{di_q}{dt} = -R_v i_q + \omega L_v i_d - v_{C_q} + v_{S_q} \quad (5)$$

dq referans çerçevesi (6)'daki gibi ayarlanırsa AA sistem tarafındaki aktif ve reaktif güç Eşitlik (7)'deki gibi oluşturulabilir. DA tarafındaki aktif güç eşitliği ise (8)'deki gibi elde edilmektedir.

$$v_{S_d} = v \quad v_{S_q} = 0 \quad (6)$$

$$P = v_{S_d} i_d \quad Q = -v_{S_d} i_q \quad (7)$$

$$P_{DA} = u_{DA} i_{DA} \quad (8)$$

Eşitlik (9) kullanıldığı durumda dönüştürücü tarafından sisteme enjekte edilen görünür güç (10) ile elde edilebilmektedir. Bununla birlikte GKD-YGDA tarafından sağlanan aktif ve reaktif güç eşitlikleri ise (11) ve (12)'de verilmiştir.

$$i_C = i_{DA} - i_{hat} \quad (9)$$

$$S_{dön} = \frac{1}{2} (V_{S_d} - jV_{S_q}) (i_d - ji_q) \quad (10)$$

$$P_{dq} = \frac{3}{2} V_d i_d \quad (11)$$

$$Q_{dq} = -\frac{3}{2}V_d i_q \quad (12)$$

İç ve dış kontrolörlere ait eşitlikler sırasıyla (13) ve (14) ile verilmiştir. Şekil 3.3'te verilen kontrol blok diyagramları verilen eşitliklerden faydalanarak oluşturulmuştur.

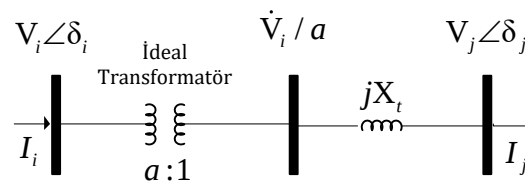
$$L_v \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} - R_v \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega L_v \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} i_d \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} i_q \begin{bmatrix} V_{sq} \\ -V_{sd} \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.1.3. Güç Sistemleri Elemanları

3.1.3.1. Kademe Değiştirici Transformatör

Kademe değiştirici transformatörler (KDT) güç akışı çalışmalarında gelen ve giden hatlardaki gerilimi ayarlamak ve istenilen düzeyde tutabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu cihazlar genellikle Şekil 3.5'teki gibi i. ve j. güç baraları arasındaki ideal bir transformatör ve jX_t ile ifade edilen sabit kaçak reaktansa sahip devre elemanları olarak gösterilirler. Güç akışı çalışması yapılırken iki kapılı bir devre olarak modellenip akım ve gerilim bağıntıları elde edilerek orijinal bara admitans matrisinin içerisine katılabilir. Verilen diyagram için kirchoff akım yasası kullanılırsa Eşitlik (15)'te verilen temel denklem elde edilmektedir.



Şekil 3.5. Kademe değiştirici transformatör elektriksel eşdeğer devresi.

$$I_i = \frac{I_j}{a} = \frac{V_i - aV_j}{a^2} Y_{KDT} \quad (Y_{KDT} = \frac{1}{X_t}) \quad (15)$$

Bu eşitlik kullanılarak şönt admitans değerleri aşağıdaki gibi elde edilir [68]. Bununla birlikte i ve j numaralı baralar arasına bağlanan bir KDT durumunda admitans matrisinin değişimini içeren matematiksel model ise Eşitlik (16)-(19)'da mevcuttur.

$$y_{ij} = \frac{Y_{KDT}}{a} \quad (16)$$

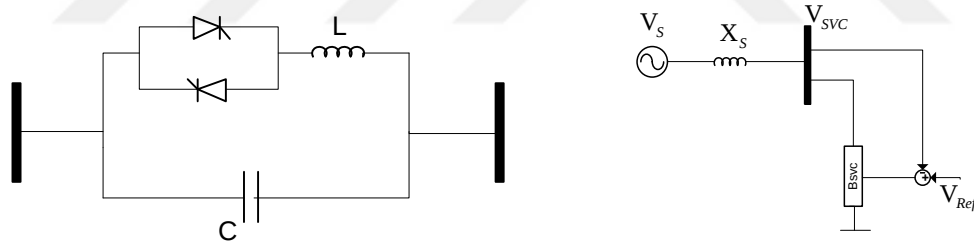
$$y_{i0} = Y_{KDT} \left(\frac{1-a}{a^2} \right) \quad (17)$$

$$y_{j0} = Y_{KDT} \left(1 - \frac{1}{a} \right) \quad (18)$$

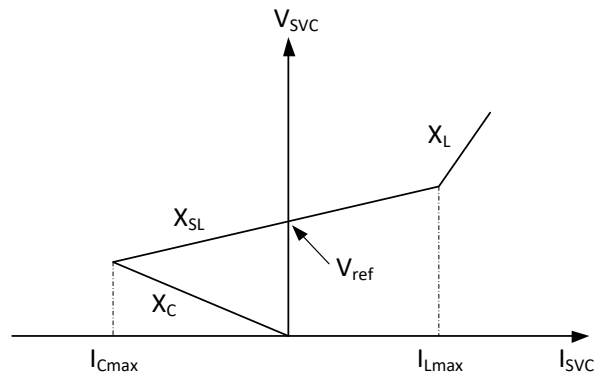
$$Y_{\text{BaraYeni}} = \begin{bmatrix} y_{ii} + y_{i0} + y_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ii} + y_{j0} + y_{ij} \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.1.3.2. Statik Var Kompanzatör

Statik var kompanzatör (SVC) sabit bir kapasitör ile bir tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kapasitör ile tristör kontrollü reaktör'dür. Tristörler simetrik bir şekilde ateşlenirler, α açısı $\pi/4$ ile $\pi/2$ arasında kontrol edilerek kapasitör gerilimi ayarlanır. SVC genellikle iletim hattına kademe düşürücü transformator üzerinden bağlanır [73]. SVC'ye ait genel diyagram ve güç modeli Şekil 3.6 ile verilmiştir. Bununla birlikte SVC'nin sürekli hâl gerilim karakteristiği ise Şekil 3.7 ile gösterilmiştir. SVC'nin gerilim bazında Eşitlikleri (20) ve (21) ile tanımlanmaktadır.



Şekil 3.6. Statik var kompanzatör elektriksel eşdeğer devresi.



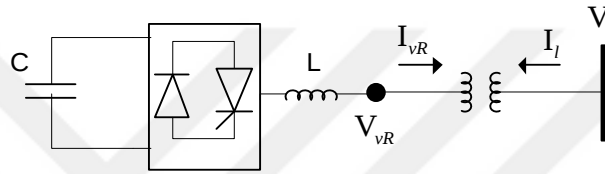
Şekil 3.7. Statik var kompanzatör sürekli hâl gerilim-akım karakteristiği.

$$V_S = V_{SVC} + X_S I_{SVC} \quad (20)$$

$$V_{SVC} = V_{ref} + X_{SL} I_{SVC} \quad (21)$$

3.1.3.2. Statik Senkron Kompanzatör

Statik senkron kompanzatör (STATCOM) SVC ile benzer olarak reaktif güç takviyesi ve düzenlemesi yapmak amacıyla kullanılmaktadır. SVC'den farklı olarak bağlantı transformatörü, dönüştürücü ve kapasitörden oluşmaktadır [74]. Cihaza ait genel diyagram Şekil 3.8 ile verilmiştir.



Şekil 3.8. Statik senkron kompanzatör elektriksel eşdeğer devresi.

Diyagramdaki V_l bara gerilimini; V_{vR} STATCOM çıkış gerilimini, L ise cihazın öz empedansını ifade etmektedir. STATCOM çıkışında bağlı şebeke frekansında, kontrol edilebilen genlikte ve faz açısında gerilimler elde edilmektedir. STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü alternatif akımın yani bağlı olunan baranın geriliminden büyükse akım transformatör üzerinden alternatif akım sistemine akar ve cihaz iletim hattı için reaktif güç üretir ve cihaz kapasitif modda çalışmış olur. STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü alternatif akımın yani bağlı olunan baranın geriliminden büyükse akım alternatif akım sisteminden STATCOM'a akar ve cihaz iletim hattından reaktif güç tüketir ve cihaz endüktif moda çalışmış olmaktadır. Sistemden çekilen reaktif güç Eşitlik (22)'de verildiği biçimde gibi hesaplanır [75, 76].

$$Q_{vR} = \frac{|V_l|^2 - |V_l||V_{vR}|}{|X_{vR}|} \quad (22)$$

3.1.4. Güç Akışı

Yük akışı olarak da bilinen güç akışı sorunu, güç sistemleri ile ilgili en çok incelenen sorunlardan biridir. Gerçek sistem davranışına en yakın olan en iyi sonucu elde etmek için, sistem değişkenleri optimize edilir ve çözülür [77]. Güç akışı, Newton-Raphson ve Gauss-Siedel yöntemleri gibi iteratif teknikler kullanılarak kararlı durumda sistem değişkenlerinin

hesaplanması olarak tanımlanır. Özellikle çalışılan sistem hakkında anlık bilgi sahibi olmak ve bunun sonucunda iyi başlangıç tahminleri yapmak iterasyon bitiminde daha iyi sonuç verir [78]. Bir çözüm elde etmek için gerekli iterasyon sayısı sistemin boyutundan farklıdır, fakat her iterasyonda daha fonksiyonel değerlendirmeler gereklidir. Bu çalışmada Newton-Raphson iteratif çözüm yöntemi literatürde en çok tercih edilen yöntem olması nedeniyle kullanılmıştır. Güç akışı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\text{Elde edilmek istenilen: } f(x, u) = 0 \text{ ve } h(x, u) \leq 0$$

Burada f ve g sırasıyla amaç fonksiyonunu ve güç akışı denklemlerini gösterir. h , sistem kısıtlama vektörünü temsil eder.

$$\mathbf{x}^T = [P_s, V_L, Q_G, S_L] \quad (23)$$

x vektörü sistemin salınım barasının aktif gücü P_s , yük barası gerilim değerleri V_L , üretilen reaktif güç vektörü Q_G ve iletim hattı kapasiteleri S_L bileşenlerinden oluşmaktadır.

$$\mathbf{u}^T = [V_G, P_G, R_{LTC}, Q_{SH}] \quad (24)$$

u vektörü ise generatör barası gerilimleri V_G , aktif üretim gücü P_G , kademe değiştirici transformatör oranı R_{LTC} ve enjekte edilen reaktif güç Q_{SH} vektörlerinin bileşiminden oluşmaktadır.

Örnek bir güç sisteminde i . baraya giren veya baradan çekilen hat akımı Y_{ij} ve V_j hattın admitansı ve baranın gerilimi olmak üzere aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (25)$$

Bara admitans matrisi kullanılırsa, i . bara için aktif ve reaktif güç eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (26)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (27)$$

Yukarıda verilen eşitliklerin Taylor serisi açılımı neticesinde aşağıdaki gibi lineer denklem takımı elde edilir. Bu eşitlikteki türevsel elemanlardan oluşan matris Jacobian matrisi adı da verilmektedir [74].

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

3.1.4.1. SVC ve STATCOM Cihazlarının Güç Akışına Entegrasyonu

İdeal bir SVC modelinde rezistif elemanların bulunmadığı varsayılarak sadece reaktif gücü kontrol ederek bara gerilimini ayarlanması gerçekleştirilir. B_{SVC} cihazın şönt admitansı ve V_l ise bara gerilimi olmak üzere, sistemden çekilen reaktif güç eşitlik (29) ile hesaplanır. SVC cihazının güç akışı matrisine eklenmiş hali Eşitlik (30) ile verilmiştir.

$$Q_{SVC} = -|V_l|^2 B_{SVC} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q^{SVC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial Q^{SVC}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q^{SVC}}{\partial |V|} & \frac{\partial Q^{SVC}}{\partial B_{SVC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta B_{SVC} \end{bmatrix} \quad (30)$$

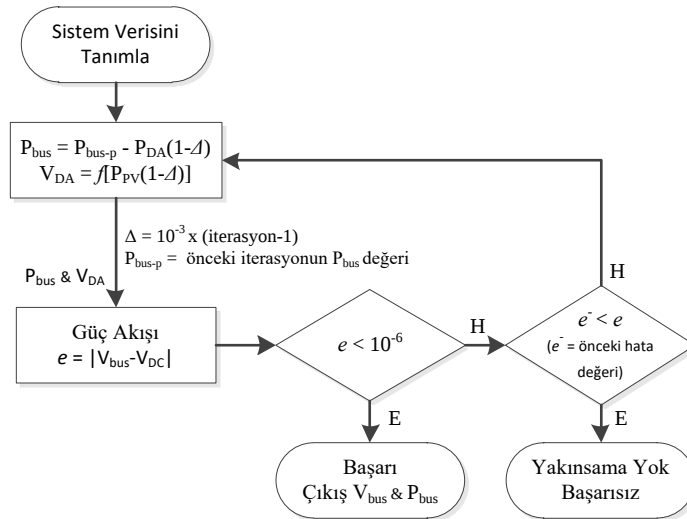
STATCOM için ise kontrol edilecek bara gerilimini eşitlikte durum değişkeni olarak kullanılmaktadır. B_{vR} , V_{vR} ve V_l sırasıyla STATCOM cihazının şönt admitansı, gerilimi ve bağlanan güç barasının gerilimi olmak üzere, sistemden çektiği reaktif güç ve güç akışı matrisine eklemesi aşağıdaki gibi olur.

$$Q_{vR} = -|V_{vR}|^2 B_{vR} + |V_{vR}| |V_l| B_{vR} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_{VR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial Q_{VR}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{VR}}{\partial |V|} & \frac{\partial Q_{VR}}{\partial |V_{VR}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta |V_{VR}| \end{bmatrix} \quad (32)$$

3.1.5. Genişletilmiş Güç Akışı

Güç sistemi cihazlarından veya DA bağlantılarından oluşan bir güç sistemini çözmek için, ya sistemin matematiksel modelini ve türev matrislerini değiştirmek ya da öngörücü ve düzeltici bir yaklaşım kullanmak gerekir. Bu çalışmada sisteme bağlı harici bir DA-hat olacağından; yinelemeli bir yaklaşım olan genişletilmiş güç akışı (GGA) kullanılmıştır. Bu yöntemin tahmin etme ve düzeltme olmak üzere iki ana fazdan vardır. İlk olarak, güç akışı sonuçları DA bağlantısının gönderen ucuyla karşılaştırmak için bir tahmin aracı olarak test sistemine uygulanır. Yapılan bu tahmini takiben, düzeltme fazı hata değerini, e , kabul edilebilir bir değerin altına düşürmek için bara gerilimini ve gücünü ayarlar. GGA prosedürü Şekil 3.9'da verilmiştir. Burada P_{bus} ve V_{bus} , sırasıyla YGDA barasının aktif gücünü ve gerilimin genliğini temsil eder. Ayrıca P_{DA} ve V_{DA} ise sırasıyla DA baraya bağlı olan ve güç sağlayan tercihen yenilenebilir bir santral olarak seçilen bölgenin barasının aktif gücünü ve geriliminin genliğini ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Genişletilmiş güç akışı prosedürü.

3.1.6. Sürekli Güç Akışı

Bir güç sisteminin gerilim kararlılığını analiz etmek ve desteklemek için en yaygın yöntemlerden biri sürekli güç akışı (SGA) yöntemidir [78]. Bu yöntem, değişen ve artan yük

talepleri altında sistem tahmini ve düzeltmesine yardımcı olan çatallanma teorisine dayanmaktadır. SGA kullanılarak, her bir güç barasının P-Q-V eğrileri elde edilebilir ve olası eylemler gerçekleştirilerek sistem kararlılığını artırmak için analiz edilmelidir. Güç akışı çalışmalarında ilgili verileri elde etmek için, sistem değişen güç faktörlü yüklemeye kabul edilir. Herhangi bir güç sistemi için (33) ve (34) kullanılarak SGA sonuçları alınabilir.

$$P_D = P_{D0}(1 + \lambda) \quad (33)$$

$$Q_D = Q_{D0}(1 + \lambda) \quad (34)$$

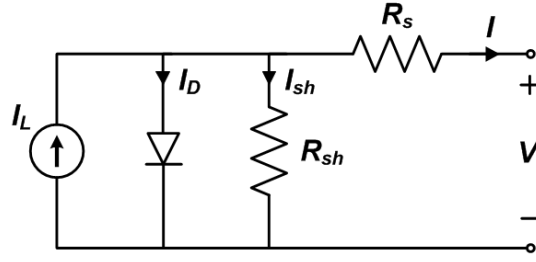
Burada P_{D0} ve Q_{D0} sırasıyla başlangıç aktif ve reaktif güç talebidir. λ , gerilim kararlılık çalışmalarında kullanılan adım parametresini gösteren bir yüklemeye faktörüdür. Bu çalışmada, aktif ve reaktif yük artışları için çökmeye en yakın barayı belirlemek için sistemin karşılık gelen eğrilerini elde etmek için SGA yöntemi kullanılmıştır.

3.2. Yenilenebilir Enerji Sistemleri

3.2.1. Güneş Enerji Sistemi Modeli

Güneş enerji sistemleri güneşin ışıma enerjisini elektrik, mekanik veya başka herhangi bir türüne çeviren enerji sistemlerinin genel adıdır. Güneş enerjisi ile elektrik üreten sistemler ise fotovoltaik (PV) sistemler olarak tanımlanmaktadır. PV etki ışığın yani fotonların elektriğe dönüştürme işlemi anlamına gelmektedir. Güneş ışığı, ekonomik büyümeyi sürdürülebilir bir şekilde güçlendirmek için güvenli ve temiz bir enerji kaynağı olması sebebiyle dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır. PV sistemler doğası gereği üzerinde düşen ışık miktarı, ortamın sıcaklığı ve sistemden çekilen güce bağlı bir gerilim-akım karakteristiği göstermektedir. Dolayısıyla bu tip sistemlerden maksimum oranda verim alabilmek ve bununla birlikte enerji kalitesini istenilen seviyede tutabilmek amacıyla gerilim dönüştürücüleri ve güç elektroniği elemanları dinamik olarak kullanılmakta ve kontrol edilmektedir.

PV hücrelerinin ve panellerinin elektrik devresi modellenmesi, bir PV sisteminin elektriksel karakteristiğini belirlemek için en önemli kriterlerden biridir. Hem matematiksel modelin geliştirilebilmesi hem de simülasyon çalışmaları için modelin tanımlanmasını sağlayan ölçülen veya simüle edilen veriler için model parametrelerini tahmin etmek kilit noktadır. Bu çalışmada literatürde en yaygın kullanılan PV hücre modellerinden biri olan 5-parametrelili model kullanılmıştır [79]. Modelin eşdeğer devre diyagramı Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Güneş hücresi tek diyot eşdeğer devresi.

Bu eşdeğer devre, ışınlıma bağlı olarak çalışan bir akım kaynağı, bir p-n bağlantı diyotu ve iki dirençten oluşur. Devredeki akım-gerilim ilişkisi Eşitlik 35 ile ifade edilir. Burada q , k ve T_c sırasıyla elektriksel yük, Boltzmann sabiti ve sıcaklıktır. Herhangi bir PV hücrenin karakteristiği modele beş model parametresi (I_L , I_o , a , R_s , R_{sh}) ile ifade edilebilir [80].

$$I = I_L - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{a V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (V_T = \frac{k T_c}{q}) \quad (35)$$

$$a = a_{ref} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right) \quad (36)$$

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} (I_{L,ref} + (T_c - T_{ref})) \quad (37)$$

$$I_o = I_{o,ref} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\left(NCS \cdot \frac{T_{ref}}{a_{ref}} \right) \left(\left(\frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{E_g}{T_c} \right) \right) \right) \quad (38)$$

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \left(\frac{S_{ref}}{S} \right) \quad (39)$$

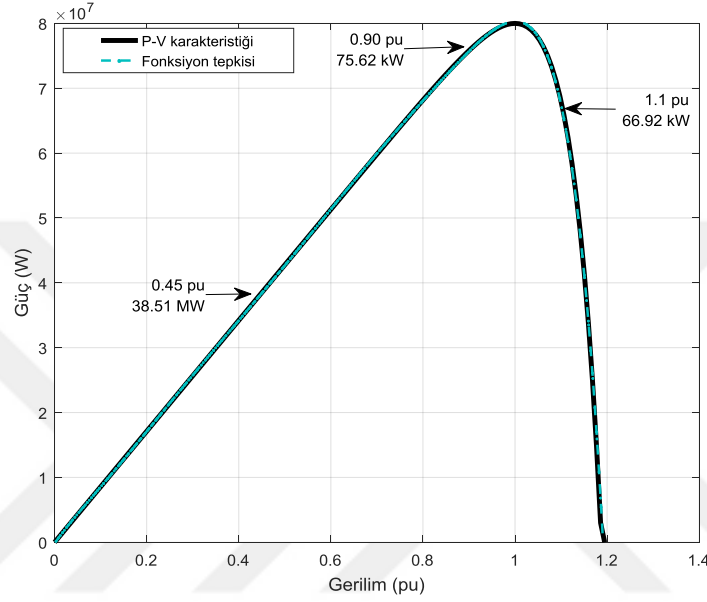
$$R_s = R_{s,ref} \quad (40)$$

$$E_g = E_{g,ref} \left(1 - 0.0003174 \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right) \right) \quad (41)$$

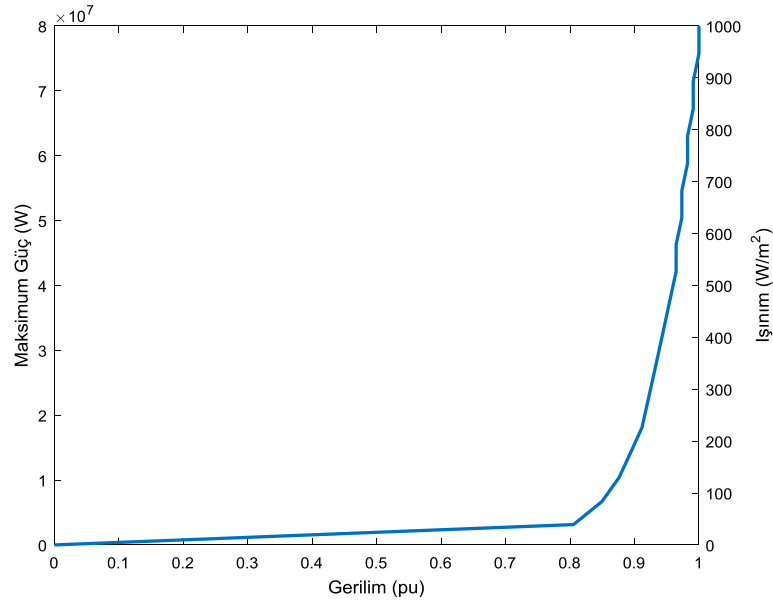
Yukarıdaki eşitliklerdeki *ref* notasyonu, genel olarak sıcaklık ve güneş ışınlımının sırasıyla 25°C ve 1000W/m² olduğu standart test koşullarındaki (STK) parametreleri tanımlar. NCS ve E_g , sırasıyla hücre sayısını ve bant aralığı enerjisini temsil eder [81].

Bu tezde, YGDA ve YGAA sistemlerin güvenli ve kararlı bir şekilde çalışabilmesi için önerilen kontrol stratejisini doğrulamak ve verimliliğini göstermek için gerçeğe en yakın bir

PV enerji santrali modeli kullanılmaktadır. Eşdeğer model, doğrusal olmayan bir güç-gerilim (P-V) eğrisi karakteristiği üreten birkaç seri ve paralel bağlı PV panelleri içerir. Ekler bölümünde verilen PV hücre parametreleri kullanılarak, Şekil 3.11'de görüldüğü gibi 1000 W/m^2 ışıınım için elde edilen PV karakteristik eğrisi oluşturulmuştur. Bu çalışmanın ana amacı güç ve gerilim kararlılığı problemlerini incelemek olduğundan, PV sistemi çeşitli ışıınım değerleri için sabit bir sıcaklıkta çalıştığı varsayılır. Ayrıca, güç-gerilim-ışıınım (P-V-Ir) eğrisi, ışıınıma karşılık gelen maksimum güç ve gerilim değerlerinin bulunabileceği Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. PV sistemin 1000 W/m^2 ışıınım için güç-gerilim karakteristiği.



Şekil 3.12. PV sistemin güç-gerilim-ışıınım karakteristiği.

Bununla birlikte dinamik kontrolörün eğitimi ve doğrulanması için yukarıda verilen P-V ve maksimum P-V-Ir eğrilerini verimli bir şekilde kullanabilmek için, 9. ve 5. derece fonksiyonlar formüle edilmiş ve (42) ve (43)'de verilmiştir.

$$P_{PV}(v_{PV}) = \sum_{n=1}^{10} (c_n v_{PV}^{10-n}) \quad (42)$$

$$v_{PV}(ir) = \sum_{n=1}^6 (c_n ir^{6-n}) \quad (43)$$

Burada P_{PV} , v_{PV} ve ir , sırasıyla aktif PV tesisi için aktif güç değeri, gerilim değeri ve ışıınımdır. Her iki fonksiyon için ters problemler eğri belirleme yöntemi kullanılarak çözülmüş ve katsayılar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. PV panel karakteristik denklemleri katsayıları.

Katsayı	P-V	V-Ir
C ₁	-2.67973006e8	1.44871718e4
C ₂	-2.61613999e9	6.79740380e4
C ₃	1.25519628e10	-2.26204672e5
C ₄	-2.11520170e10	2.03190624e5
C ₅	1.80428346e10	-5.84644322e4
C ₆	-8.46549297e9	2.69079274e-05
C ₇	2.16390888e9	-
C ₈	-2.76365300e8	-
C ₉	9.97381349e7	-
C ₁₀	-1.52308126e5	-

3.2.2. Rüzgâr Enerji Sistemi Modeli

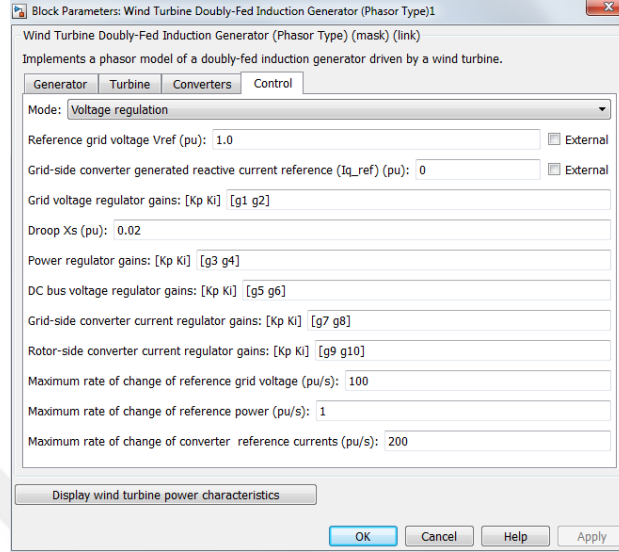
Rüzgar türbinleri genellikle bir senkron/asenkron makineye (jeneratör) bağlı çeşitli komponentlerden oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Bununla birlikte rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan sıklıkla kullanılan bir diğer makine de çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) modelidir. Bunlar hem alan mıknatısı sargılarının hem de armatür sargılarının makinenin dışındaki ekipmana ayrı ayrı bağlandığı makineleri olarak bilinmektedir. Alan sargılarının ayarlanabilir frekanslı AA akım ile besleyerek, manyetik alanın değişimi ve dolayısıyla jeneratörün asenkron olarak farklı hızlarda da maksimum enerji çıktı vermesi sağlanabilmektedir. ÇBAG tabanlı türbinler statoru doğrudan şebekeye bağlı olmasına rağmen, senkronize bir jeneratör gibi ve değişken hızda çalışabilir. Dönüştürücü, rotora uygulanan gerilimi yeterince kontrol edebilir ve bunun sonucunda manyetik alanın frekansını veya hızını kontrol edebilir. Senkron jeneratörlerde kullanılan DA uyarma gibi, aslında değişken

frekanslı bir AA uyarımı oluşturur. Bu işlem bir senkron jeneratörün faydalarını sağlar. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızına kolaylıkla adapte olmaları ve aktif ve reaktif gücü kontrol etme kabiliyetleri sebebiyle de son yıllarda kullanım alanı artan makineler arasında yer almaktadır. Bu tip makinelerde statorun doğrudan şebekeye bağlanması ve nominal stator gücünün yaklaşık %25'i oranında seçilebilen rotor devresindeki güç elektroniği devresi nedeniyle, değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan diğer generatör topolojilerine göre yüksek verim ve düşük kurulum maliyetine sahiptir. Ayrıca, stator aktif ve reaktif gücü, rotor devresi üzerinden dört bölgede kontrol edilebilir. ÇBAG'lar bu sebeple rüzgâr enerji sistemlerinde son yıllarda en çok kullanılan generatör tipi olarak öne çıkmaktadır [82]. Bununla birlikte alt veya süper eşzamanlı olarak değişken hızda çalışabilir. Rotora uygulanan gerilimin frekansı ve fazı ayarlanarak optimum hız seçilebilir ve farklı rüzgar hızlarında rüzgar tarafından maksimum güç elde edilecek şekildedir. Senkron jeneratör olarak çalışabildiğinden, büyük güçteki rüzgâr türbinlerinin önemli bir avantajı, bir arıza meydana geldikten sonra sistemin kararlılığına katkıda bulunabilmeleridir. Bununla birlikte, bu büyük ölçüde güç dönüştürücü tarafından verilen kontrol seçeneklerine dayanır. Ayrıca, bir ÇBAG rüzgâr türbini, mekanik parça çalışmadığında ve aktif güç sağlamadığında bile reaktif güç üretebilir. Diğer değişken hızlı generatörlere kıyasla, güç dönüştürücüsü daha düşük güçte derecelendirilmiştir, çünkü rüzgâr türbini tarafından sağlanan toplam gücün yalnızca bir kısmı dönüştürücü yoluyla aktarılır. Bu, rüzgâr türbinini daha ucuz ve daha hafif hale getirir.

Yukarıda bahsedilen güç, rotor tarafından türbin senkron hızdan daha yüksek bir hızda döndüğünde iletilebilir veya hızı senkronizasyon hızının altında olduğunda emilebilir. Bu çift mod, bu cihaza senkronizasyon hızının yaklaşık %50'si kadar daha düşük veya daha yüksek hızlarda çalışma yeteneği verir, ancak gerçekte daha düşük varyasyonlar seçilir. Değişken hızı izin vermek için harici rotor dirençleri kullanan değişken hızlı diğer jeneratörlerle karşılaştırıldığında, dönüştürücüde çok az güç harcandığından ÇBAG daha enerji verimlidir. Güç dönüştürücüsünün rotora uygulanan gerilimin hem büyüklüğünü hem de fazını ayarlayabilmesi nedeniyle doğru bir şekilde kontrol edilebilir. Rüzgâr türbinlerinde adım kontrolü ile birleştirilen bu özellik, operatöre, özellikle yüksek güç çıkışının ekipmana ciddi hasar verebileceği yüksek rüzgârlarda daha doğru güç kontrolü sunar.

Matlab/Simulink ara yüzünde bulunan ÇBAG modeli incelenmiş ve bu model baz alınarak rüzgar çiftliği içeren AA güç sistem modeli kurulmuştur. Bu modelin çalışma parametreleri incelendiğinde; Şekil 3.13'te görülen generatör, türbin, çevirici ve kontrol parametrelerinin kullanıcı isteği dâhilinde değiştirildiği görülebilmektedir. Bu çalışmada kontrol sekmesi altındaki şebeke gerilim düzenleyici kazançları (GVRG), güç düzenleyici kazançları (PRG), DA bara gerilim kazançları (DCBVRG), şebeke tarafı dönüştürücü düzenleyici kazançları (GSCCRG)

ve rotor dönüştürücü düzenleyici kazançlarını (RSCCRG) içeren 10 parametreyi optimize ederek sistemin kararlı hale getirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Çift beslemeli asenkron generatör Matlab/Simulink parametreleri.

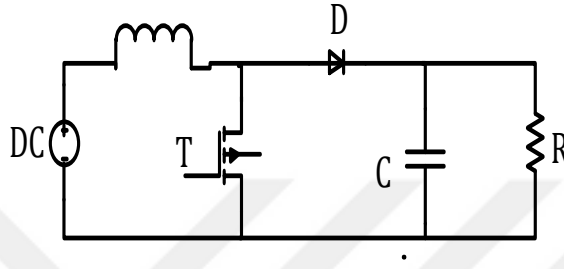
3.3. Güç Dönüştürücüleri

3.3.1. DA-DA Dönüştürücüler

DA-DA dönüştürücüler doğru akım sinyalinin herhangi bir genlikten başka bir genliğe dönüştürebilmek için; giriş gerilimine karşılık istenilen oranda çıkış gerilimini vermek için kullanılan devrelerdir. Bu tip devreler güç elektroniği sistemlerinde genellikle transformatörler aracılığı ile kullanıldıkları gibi bazı durumlarda ise yüksek gerilimdeki sistemlerin gerilimlerini dönüştürmek için kullanılmaktadır. Bu tip dönüştürücüler yükseltici, alçaltıcı ve yükseltici-alçaltıcı olarak istenilen amaca yönelik kullanım alanı sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji üretim sistemlerini YGDA iletim hattı ile enterkonnekte biçimde çalıştırabilmek için sistemin ve bağlantı yapılacak kısmın gerilim seviyelerinin eşit olması gerekmektedir. Bu sebeple, özellikle PV elektrik üretim sistem çıkışı DA-DA dönüştürücü modülleri ile anlık ve sürekli olarak kontrol edilmelidir. Farklı topoloji ve çalışma modu ile kullanılabilen dönüştürücüler, PV sistemlerde maksimum verimin elde edilmesi amacıyla gerilimi kademeli olarak yükseltmek veya alçaltmak amacıyla kullanılan elektrik devreleridir. Bu tip dönüştürücü devrelerinde anahtarlama amacıyla genellikle IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistör) yarıiletken elemanları kullanılmaktadır [83]. Yükseltici tip dönüştürücü giriş gerilimini yükselterek çıkış verirken, alçaltıcı tip dönüştürücü tam tersi olacak biçimde gerilimi düşürür ve çıkış sinyali

olarak aktarır. Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü ise hem yükseltici hem de alçaltıcı dönüştürücü olarak çalışmaktadır ve transformatör yerine tek bir indüktör kullanan bir geri dönüşümü dönüştürücüye eşdeğerdir. Yükseltici ve alçaltıcı dönüştürücülerde giriş ve çıkış gerilimin polaritesi aynı iken, alçaltıcı-yükseltici dönüştürücüde çıkış geriliminin polaritesi giriş geriliminin tersidir. Bu dönüştürücü, görev döngüsü %50'den fazla olduğunda yükseltici dönüştürücü olarak aksi halde alçaltıcı dönüştürücü olarak çalışmaktadır. DA-DA yükseltici dönüştürücülere ait devre şemaları Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Yükseltici amaçla kullanılan DA-DA dönüştürücü eşdeğer modeli.

Verilen şekildeki giriş geriliminin bir IGBT ve diyot ikilisi aracılığı ile ayarlandığı ve çıkış olarak verildiği görülebilmektedir. Statik üretim ve yük sistemleri için dönüştürücüyü kontrol etmeye yarayan DGM sıklığı sabit olsa da DGM sinyali çeşitli metotlar ile ayarlanabilmekte ve farklı yük taleplerine optimal tepki verilmesi sağlanmaktadır. Bir PV üretim sisteminde maksimum güç noktası eldesi için; ışıınım, ortam şartları, değişken yük ve diğer parametrelere bağlı olarak dönüştürücüye etkiyen DGM sinyalinin anlık olarak kontrolü gerekmektedir. Bu çalışmada DGM kontrollü IGBT dönüştürücünün çıkış gerilimini istenilen seviyede tutabilmek amacıyla PID kontrolör kullanılacaktır.

3.3.2. DA-AA Dönüştürücüler

Evirici olarak da tanımlanan DA-AA dönüştürücüler, AA yükleri beslemek, AA motorları kontrol etmek veya AA şebekeye bağlı DA cihazları çalıştırabilmek amacıyla DA kaynağını sinüzoidal AA gerilimine dönüştüren bir devredir. Giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve frekansı ve genel güç kapasitesi, bu cihazın veya devrenin tasarımına bağlıdır. Evirici kendisi herhangi bir güç üretmez sadece DA kaynak tarafından sağlanan gücü istenilen formata dönüştürmekle görevlidir. Bir DA-DA dönüştürücüye benzer şekilde, bir eviriciye giriş, pil, güneş pili veya yakıt hücresi gibi doğrudan bir kaynak olabilir veya bir AA kaynağından sağlanabilen bir ara DA bağlantısından olabilir. Böyle bir cihaz tamamen elektronik olabilir veya mekanik etkiler (döner aparat gibi) ve elektronik devrelerin bir kombinasyonu olabilir. Statik eviriciler, dönüştürme

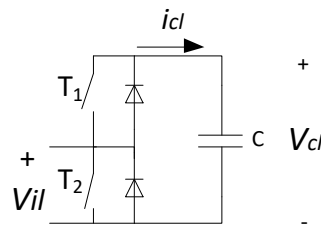
işleminde hareketli parçalar kullanmaz. Güç eviriciler öncelikle yüksek akımların ve gerilimlerin mevcut olduğu elektrik gücü uygulamalarında kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji üretim teknolojisinin gelişmesi ve bu tip üretim santrallerinin artması neticesinde YGDA her zamankinden daha uygulanabilir hale gelmiştir. Daha fazla stokastik enerji üretimi, gücü yüksek üretimli alanlardan düşük üretimli alanlara taşıyabilen çözümler gerektirir. Kıyıda uzak açık deniz rüzgâr çiftlikleri veya yüksek güç üretebilen PV sistemler YGDA iletimi ve büyük güç kapasitesine sahip kompakt ve güvenilir dönüştürücü teknolojisi gerektirir. Kullanılabilirliği sağlayabilmek amacıyla filtre ihtiyacı en aza indirilmelidir. Ortaya çıkan bu ihtiyaçların birçoğunu karşılayan topoloji ise modüler çok seviyeli dönüştürücüleri işaret etmektedir.

3.3.2.1. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler

Modüler çok seviyeli dönüştürücü, ölçeklenebilir bir teknolojiye sahip gelişmekte olan bir topolojiyi temsil eder. MÇSD, birbiriyle aynı fakat ayrı ayrı kontrol edilebilen alt modüllerden oluşturulur. Bu nedenle, dönüştürücü, çok sayıda mevcut ayrık gerilim adımıyla kontrol edilebilir bir gerilim kaynağı olarak hareket edebilir. Bu özellik, modellemeyi hem matematiksel hem de hesaplamalı olarak karmaşıktır.

Üç fazlı bir MÇSD'de, faz birimlerinin her biri iki çoklu valflerden oluşur ve her çoklu valf, seri olarak bağlanmış N tane alt-modülden oluşur [84]. Yarım köprü alt modülü, iki valf ve bir kapasitörden oluşmaktadır ve buna ait görsel Şekil 3.15'te verilmiştir. Valfler, bir IGBT ve anti-paralel olarak bir diyottan oluşmaktadır. Normal çalışmada, belirli bir anda anahtarlardan yalnızca biri açılır. Akım yönüne bağlı olarak kondansatör şarj veya deşarj olabilir.



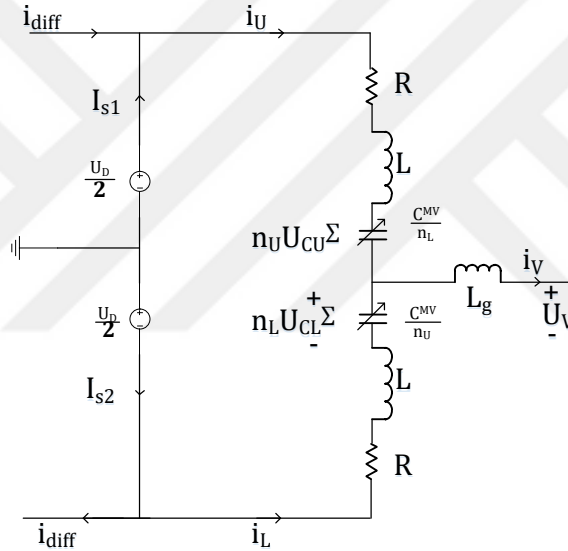
Şekil 3.15. MÇSD alt-modülü eşdeğer devre modeli.

Böyle bir alt-modülde üç farklı anahtarlama durumu mevcuttur;

1. *ON* durumunda; T_1 açık ve T_2 kapalıdır. Alt-modül çıkış gerilimi V_{il} kapasitör gerilimi olan V_{cl} 'ye eşittir ve valfin akım yönüne göre kapasitör şarj veya deşarj olur.
2. *OFF* durumunda; T_2 açık ve T_1 kapalıdır. Alt-modül çıkış gerilimi V_{il} sıfırdır ve kapasitör yük durumunu korur.

3. *Engellenmiş* durumunda; T_1 ve T_2 kapalıdır. Akım sadece diyotlar üzerinden geçer ve kapasitör yük durumu değişmez. Bu durumda sadece üst veya alt modüllerden gelen tepkiler diğer modüllere iletilir.

Her faz birimindeki engelleme gerilimi, DA geriliminin iki katıdır. Bu, üst çoklu valfteki tüm alt-modüllerin baypas edildiği ve DA gerilimine eşit bir faz gerilimi verdiği durumdan açıklanabilir. Altındaki çoklu valfin gerilimi kendi içinde, yani DA gerilimini bloke edebilmelidir. Dolayısıyla üzerinde çalışılacak sistemin geriliminin kullanılan alt-modüllerin gerilim seviyesine oranı kaç adet modül kullanılması gerektiği sonucunu vermektedir. N sayıdaki alt-modül içeren sistemler için geliştirilen model Şekil 3.16'da verilmiştir. Bu devre şemasına ait eşitlik dizisi ise Eşitlik (44)-(51) ile verilmiştir [85]. Bu eşitliklerde verilen m katsayısı kapasitör bloklarının baypas edilmesine göre 0 veya 1 çarpanı olarak değişmektedir.



Şekil 3.16. MÇSD tek-faz eşdeğer devre modeli.

$$i_U + i_L = i_V \quad (44)$$

$$i_U = I_{S1} + i_{diff} \quad (45)$$

$$i_L = I_{S2} - i_{diff} \quad (46)$$

$$i_V = I_{S1} - I_{S2} \quad (47)$$

$$i_U - i_L = I_{S1} - I_{S2} + 2i_{diff} \quad (48)$$

$$U_{ctotal} = \sum_{i=1}^N (U_{ci} \times m) \quad (49)$$

$$\frac{U_D}{2} - U_{ctotal,upper} - U_V - \left(Ri_{diff} + L \frac{di_{diff}}{dt} \right) - L_g \frac{di_V}{dt} = RI_{s1} + L \frac{dI_{s1}}{dt} \quad (50)$$

$$-\frac{U_D}{2} + U_{ctotal,lower} - U_V + Ri_{diff} + L \frac{di_{diff}}{dt} - L_g \frac{di_V}{dt} = RI_{s2} + L \frac{dI_{s2}}{dt} \quad (51)$$

I_{s1} ve I_{s2} 'nin eşit olduğu varsayıldığı durumda Eşitlik (50) ve (51)'in birleştirildiği durumda aşağıdaki diğer eşitlikler elde edilir.

$$I_{s1} = I_{s2} = \frac{i_V}{2} \quad (52)$$

$$i_{diff} = \frac{i_U - i_L}{2} \quad (53)$$

$$R(i_U + i_L) + L \frac{d(i_U + i_L)}{dt} + 2L_g \frac{di_V}{dt} + 2U_V = U_{ctotal,lower} - U_{ctotal,upper} \quad (54)$$

$$U_D - U_{ctotal,upper} - U_{ctotal,lower} = 2 \left(Ri_{diff} + L \frac{di_{diff}}{dt} \right) \quad (55)$$

$$L' = \frac{L}{2} + L_g \quad (56)$$

$$U_V = 0.5(U_{ctotal,lower} - U_{ctotal,upper}) - \frac{R}{2} i_V - L' \frac{di_V}{dt} \quad (57)$$

Üst ve alt kollardaki gerilimlerin farkı alternatif bir gerilim olarak kabul edilebilir ve e_V ile tanımlanabilir. Bu durumda e_V 'ye ait eşitlik ve yukarıda verilen eşitliklerde yerine yazılması neticesinde,

$$e_V = 0.5(U_{ctotal,lower} - U_{ctotal,upper}) \quad (58)$$

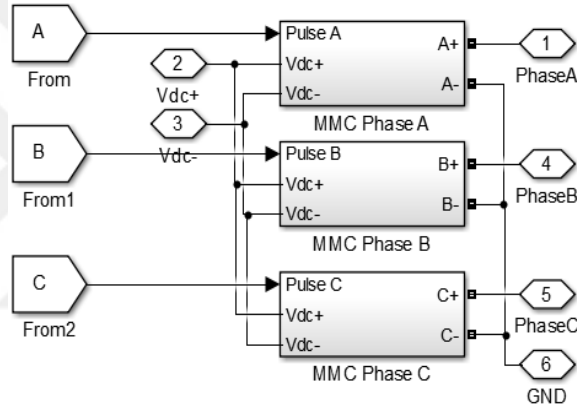
$$U_V = e_V - \frac{R}{2} i_V - L' \frac{di_V}{dt} \quad (59)$$

Verilen eşitlikler dq referansı ve Laplace düzeliminde yazılmak istenirse Eşitlik (60) ve (61)'deki durum elde edilir.

$$v_d = e_{vd} - \left(\frac{R}{2} sL'\right) i_d - \omega L' i_q \quad (60)$$

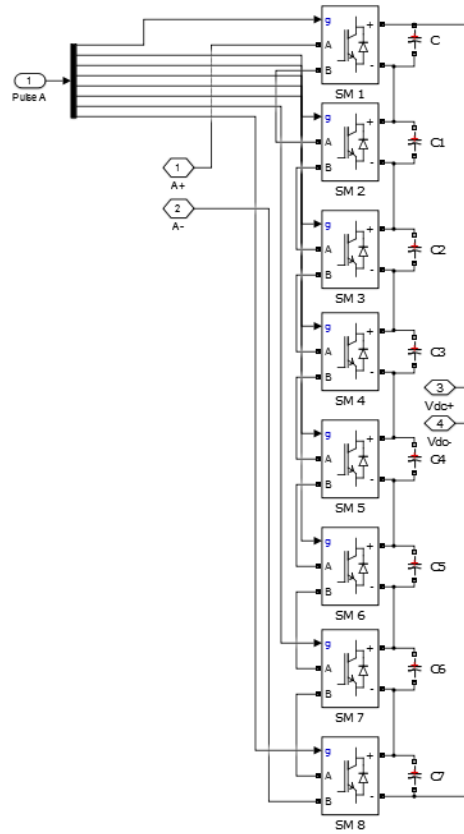
$$v_q = e_{vq} - \left(\frac{R}{2} sL'\right) i_q - \omega L' i_d \quad (61)$$

MÇSD matematiksel modelini güç akışına entegre edebilmek amacıyla oluşturulan sistemin blok diyagramına ait görseller Şekil 3.17 ve 3.18 ile verilmiştir. Bu modelde örnek olarak verilen 8-seviyeli modeldeki alt-modül sayıları sistemin kontrolü ve performansını iyileştirmek amacıyla artırılıp azaltılabilmektedir. Model tetikleyici devresi, güç elektroniği elemanları (IGBT), kapasitör blokları, alt-modüller, alt-modüllerden oluşan valfleri içermektedir. Bununla birlikte sistemin çıkışına sistemdeki elektriksel dalgalanmaların önüne geçebilmek adına filtre eklenebilmektedir.

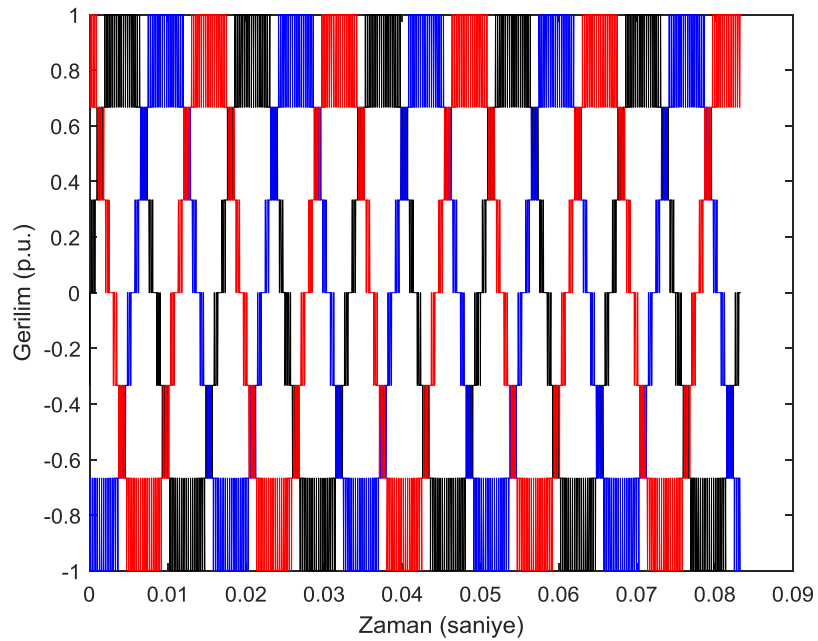


Şekil 3.17. MÇSD 3-faz devre blok diyagramı.

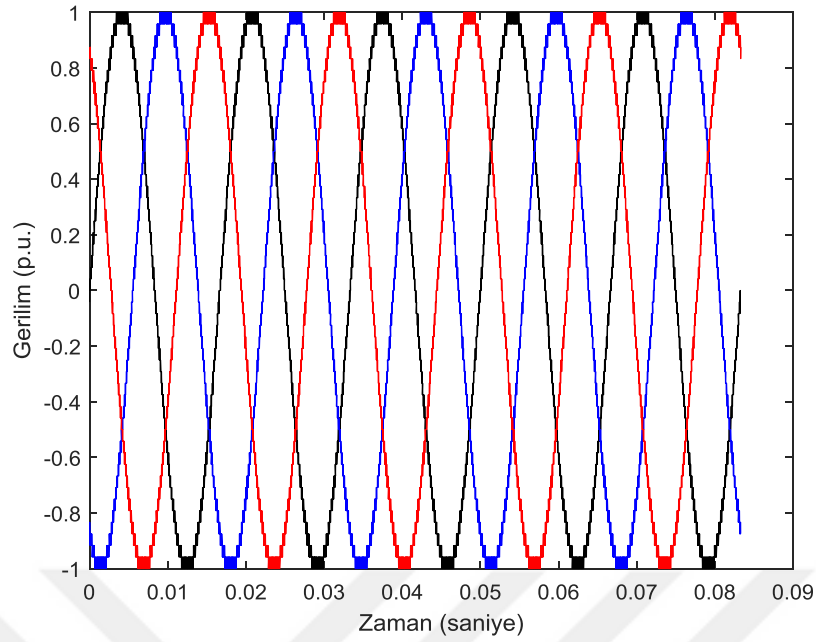
MÇSD kullanılan bir sistemdeki valf başına düşen alt-modül sayısının önemini gösteren grafikler Şekil 3.19 ve 3.20 ile verilmiştir. Üç fazlı bu sistemlerin ilkinde 4 adet alt modül; diğerinde ise 48 adet alt-modül mevcuttur. Alt-modül sayısı arttıkça arzu edilen gerilim sinyal şekli sinüzoidal sinyale yakın olmaktadır. Sisteme uygulanacak DGM sinyaline de bağlı olarak sistemlerin verdiği çıkış gerilimlerini düzeltebilmek için uygun filtreler kullanılması gerekmektedir.



Şekil 3.18. MÇSD tek-faz devre blok diyagramı yapısı.



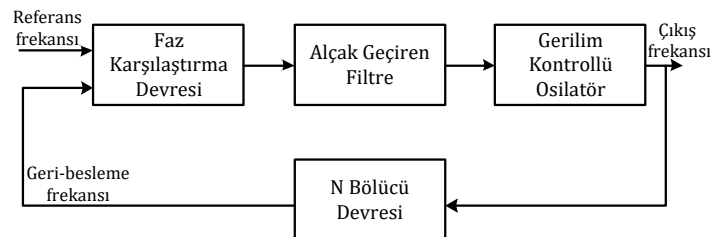
Şekil 3.19. 4 adet alt-modül içeren 3-faz MÇSD çıkış sinyali.



Şekil 3.20. 48 adet alt-modül içeren 3-faz MÇSD çıkış sinyali.

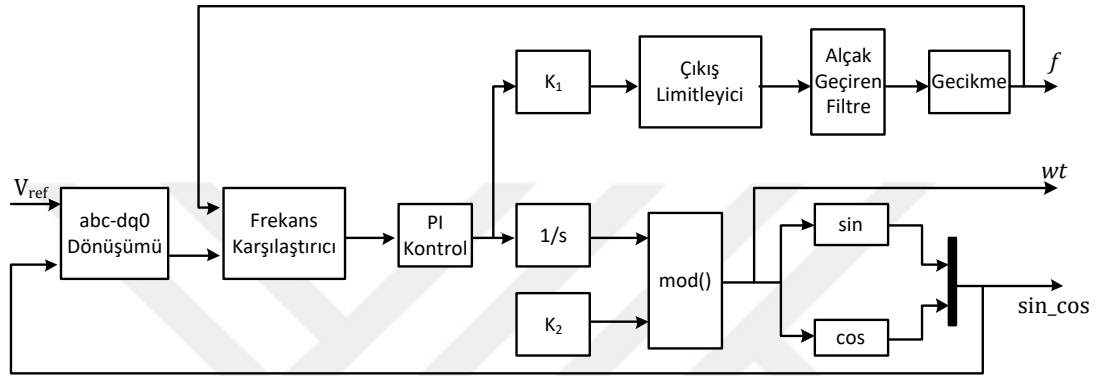
3.3.2.1.1. Faz-Kilitlemeli Çevrim

Faz-Kilitlemeli Çevrim (FKÇ), frekans ve giriş işaretin fazı ile ilişkili çıkış işareti üreten, kapalı döngülü bir frekans kontrol sistemidir. Bir faz-kilitleme devresi, frekans ve fazın her ikisinin de referansla eşleşene kadar, frekans ve giriş işaretlerinin fazına tepki gösterir. Tümüleşik devre teknolojisinin getirdiği üretim avantajları sayesinde bu çevrim tekniği güç elektroniğin alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. FKÇ'nin genel blok diyagramı Şekil 3.21 ile gösterilmiştir [86]. Bu şekil incelenirse temel bir FKÇ devresi, f_g frekansına sahip bir sinyal ile gerilim kontrollü osilatör (GKO) tarafından üretilen işaretin fazlarının ve frekanslarının karşılaştırıldığı bir yapıdadır. Faz ve dolayısıyla frekanstaki sapmayı belirleyen hata işareti; faz karşılaştırma devresi, alçak geçiren filtre, V_{GKO} gerilimine bağlı olarak F_{GKO} frekansında işaret üreten GKO ve frekans bölen N-bölücü devreden oluşmaktadır. Bununla birlikte bir FKÇ devresi simülasyon ortamında da benzer biçimde tasarlanabilmektedir.



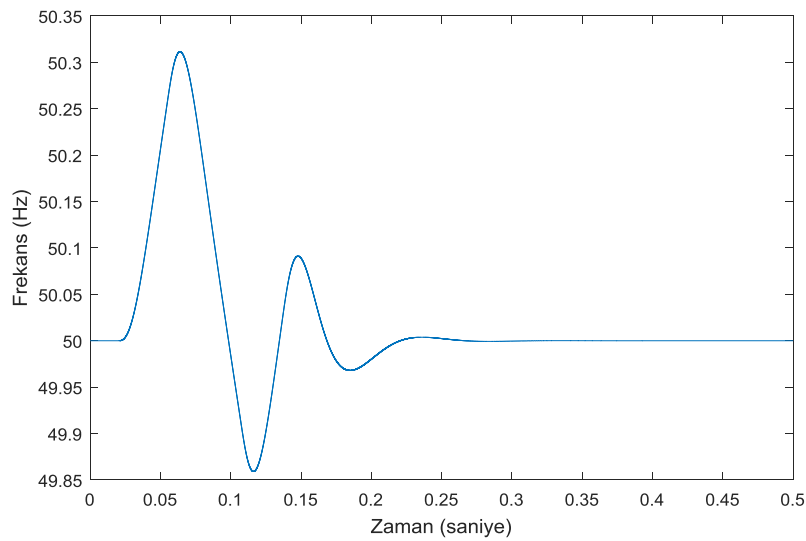
Şekil 3.21. Faz-kilitlemeli çevrim genel blok diyagramı.

Şekil 3.22’de ise Matlab/Simulink programı ara yüzünde bulunan FKÇ blok diyagramı gösterilmiştir. Burada K_1 ve K_2 katsayıları sırasıyla 0.5π ve 2π ’dir. Referans sinyali olan V_{ref} 3-fazlı bir sinüzoidal sinyali ifade etmektedir ve çevrim tarafından üretilen çıkış sinyali ile karşılaştırılarak fazların kilitlenmesi sağlanmaktadır. Çevrim çıkışındaki f ve wt değişkenleri ise modüler çok seviyeli dönüştürücünün arzu edilen faz ve frekans değerinde çıkış sinyali üretmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.22. FKÇ simülasyon blok diyagramı.

Verilen simülasyon blok diyagramı kullanılarak 50 Hz frekans değerine sahip bir sinyal için yapılan çalışmanın frekans çıkış karakteristiği Şekil 3.23’te verilmiştir.



Şekil 3.23. 50 Hz sinyal frekansına sahip bir sinyal için FKÇ frekans çıkış karakteristiği.

3.3.2.2. Dönüştürücülerin Kontrolü

3.3.2.2.1. Darbe Genlik Modülasyonu

Darbe genlik modülasyonu (DGM), sinyalin ortalama gücünün darbesel yani tıpkı bir dirac pulse sinyali tipindeki sinyallerle girişteki elektriksel sinyali parçalara bölerek istenildiği zaman aralığında aktarılan gücü azaltmanın veya anahtarlamanın sağlandığı bir yöntemdir. DGM'nin uygulanabilmesi için sistemin bu tip bir kontrole elverişli ve uygun olması gerekmektedir. DGM tarafından sağlanan darbenin sıklığı ne kadar yüksekse giriş sinyali çıkışta o oranda aktarılmaktadır. Anahtar kapalı dönemlere kıyasla ne kadar uzun süre açık kalırsa, yüke sağlanan toplam güç o seviyede yüksek olur. DGM sinyalleri ile kontrol genellikle girişe karşın hızlı tepki verebilen cihazlar ve sistemler için uygundur. Eğer DGM sinyal sıklığı alıcı cihaz tarafından anlık olarak algılanamıyorsa istenilen sonuç alınamayacaktır. Dolayısıyla özellikle dönüştürücü devrelerinde yüksek frekansta çalışabilen IGBT veya MOSFET yarıiletken elemanları kullanılması sebebiyle DGM yöntemi kolaylıkla ve rahatlıkla uygulanabilmektedir.

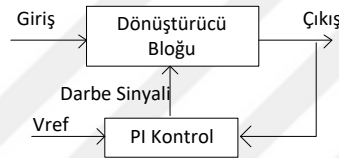
DGM'nin en temel avantajı IGBT veya MOSFET gibi anahtarlama cihazlarındaki güç kaybının düşük olması yani aktarılan sinyalin ve dolayısıyla kontrolün başarısının artmasıdır. DGM ile kontrol edilen bir anahtar kapalı durumda iken sistemde herhangi bir enerji kaybı olmaz, bununla birlikte anahtar aktif hale getirildiği zaman ise anahtarlama elemanı üzerinde kayda değer bir gerilim düşümü gözlenmez. DGM yöntemi genellikle analog veya sayısal kontrolörlerle çalışır hale getirilmektedir.

Görev döngüsü sistemin aktif olduğu yani darbenin verildiği sürenin toplam periyoda oranı olarak tanımlanır. Örneğin zamanın yarısında dijital darbe sinyali aktif olduğunda, %50 oranda bir görev döngüsüne sahip olduğu söylenebilir ve kare dalga gibi davranır. Bir dijital sinyal açık durumda kapalı durumdan daha fazla zaman harcadığında, %50'nin üzerinde bir görev döngüsüne sahiptir. Bir dijital sinyal, kapalı durumda açık durumdan daha fazla zaman harcadığında, %50'nin altında bir görev döngüsüne sahiptir.

Bu tezde, sistemi doğru bir şekilde simüle etmek ve kontrol edebilmek için, hem DA hem de AA tarafındaki dönüştürücülerin çıkış sinyali özellikleri kullanılır. Basit bir DGMkontrollü DA-DA alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü (AYD) ve GKD tabanlı DA-AA modüler çok seviyeli dönüştürücü (MÇSD) modellemesi yapılmıştır [87]. Bu yaklaşımda, AYD ve MÇSD dönüştürücülerinin çıkış değeri ve sinyal özellikleri YSA kontrollü PI kontrolör bloğu tarafından belirlenir.

3.3.2.2. PI Kontrol Yöntemi

PI kontrol yöntemi kontrol edilebilen herhangi bir sisteme uygulanan; oransal ve integral bileşenleri ile sistemi istenilen duruma getirmeyi amaçlayan bir kontrol yöntemidir. PI kontrolde çıkış sinyali oransal ve integral işlemler aracılığıyla sistem girişine etkiyerek istenilen ve arzu edilen çıkışı almayı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Dönüştürücü çıkışını dinamik olarak kontrol etmek için, PI denetleyici bloğu dönüştürücü alt sistemine yerleştirilir. AYD için en iyi DGM darbesini işleyerek ve belirleyerek, geçici ve dinamik kararlılık durumundaki aşımı, çökme süresini ve sabit durum hatasını azaltmak amacıyla optimum sistem çıktısı elde edilebilir. PI kontrollü IGBT dönüştürücünün kapalı döngü blok diyagramı Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. PI kontrol stratejisi ile DGM kontrolü.

Birçok sistemde genellikle PID kontrol kullanılabilmektedir. PID kontrolün işlevlerine yönelik açıklama Tablo 3.2'de verilmiştir. Literatürde, PID kontrol katsayıları belirli bir sistem için belirlenir, bu nedenle benzer sistemler için bile aynı kontrol katsayıları sistem kararlılığını ve verimliliğini sağlamak için kullanılmaz. Kontrol katsayıları, düşük karmaşıklığı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan Ziegler-Nichols yöntemi [88] kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntemde, bir başlangıç P değeri atanır ve sistem çıkışı belirlenir. Hesaplamalardan sonra sinyalin P katsayısına ve salınım süresine bağlı olarak I ve D değerleri de elde edilir. Ekler kısmında Ziegler-Nichols yöntem parametrelerinden oluşan bir tablo verilmiştir; ayrıca düzeltme ve hata sinyalleri arasındaki ilişki Eşitlik (62)'de verilmiştir. Bu çalışmada PI kontrolörü kullanıldığından, türevsel bileşen hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

Tablo 3.2. PID kontrolün sistemler üzerine etkisi.

Parametre	Yükselme zamanı	Aşma Oranı	Yerleşme Zamanı	Kararlı Durum Hatası
K_p	Azalır	Artar	Etkisi düşüktür	Etkisi düşüktür
K_i	Azalır	Artar	Artar	Azalır
K_d	Etkisi düşüktür	Azalır	Azalır	Etkisi yoktur

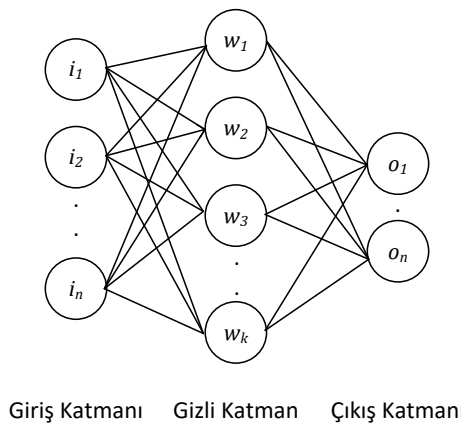
$$u(t) = PI_p(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (62)$$

3.4. Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları

3.4.1. Yapay Sinir Ağlarının Güç Akışı Problemine Uygulanması

YSA, girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal olmayan bir ağ oluşturmak için ağırlıklar ve eşik değerleri de dâhil olmak üzere yapay nöronları kullanan matematiksel bir model olarak tanımlanabilir. YSA'lar çoğunlukla doğrusal olmayan ve dışbükey olmayan görüntü işleme, kümeleme, tahmin ve matematiksel modellerin simülasyonu gibi gerçek dünya problemlerini çözmek için kullanılır [89]. Bir ağın bir giriş ve bir çıkış katmanı ve ayrıca sayısı söz konusu problemin karmaşıklığına bağlı olan en uygun çıktıyı belirlemek için kullanılan herhangi bir sayıda gizli katman vardır. YSA'lar öncelikle belirli bir veri seti ile eğitilmeli ve yine benzer bir test seti ile test edilmelidir. Fakat dikkat edilmelidir ki ağ eğitildikten sonra farklı sınır koşullarında girdiler verilirse veya çözüm uzayı homojen olarak örneklenemezse gerçek sistem probleminde istenilmeyen sonuçlar ve çıktılar verebilir.

Sisteme uygun ve yüksek oranda başarı ile çalışabilen bir YSA kullanmak için; ağ, sistemin parametre sayısına, karmaşıklığına ve doğrusal olmayışına bağlı olarak tasarlanmalı ve gerçek sistem davranışına yakın bir özelliğe sahip olmaya uygun bir veri kümesi kullanılarak eğitilmelidir. Bu çalışmada, Şekil 3.25'te verilen bir çekirdek topoloji kullanılmıştır. Şekilde gösterilen YSA, üç katmana sahiptir: Giriş, gizli ve çıkış katmanları. İlk nöron katmanına giriş katmanı ismi verilir. Giriş katmanı, fazla bir işlem yapmadan, öncelikle giriş sinyallerini bir sonraki katmanın girişlerine dağıtır. İkinci katmanda, giriş sinyalleri belirli bir şekilde işlenir ve ardından sonraki katmanlara doğru yoluna devam eder. Ağdaki son katmana çıkış katmanı denir [90].



Şekil 3.25. Yapay sinir ağı genel tasviri.

Bir iletim veya güç sistemi giriş, çıkış ve durum değişken kümeleri içerdiğinden; sürekli olarak yinelemeli yöntemler kullanılarak istenen sistem parametrelerinin hesaplanması mümkün veya verimli olmayabilir. Ayrıca, bir güç sistemine entegre edilecek olan güç elektroniği elemanlarının bilgisayar ortamındaki simülasyon problemi de genellikle yerel ve küresel optimal sonuçları olan dışbükey olmayan bir problemdir. Bu nedenle YSA, yinelemeli yaklaşımlar ve sayısal hesaplamalar kullanmaktan daha hızlı bir şekilde sistem kararlılığını artırmak amacıyla dönüştürücü parametrelerini kontrol etmek için eğitilmiş ve kullanılmıştır. Güç akışı probleminin doğrusal bir problem olmaması sebebiyle bu çalışmada en iyi ve en kötü sonuçları da kullanarak YSA'yı gerçeğe en yakın ve en doğru biçimde eğitebilmek amacıyla sezgisel bir algoritma olan diferansiyel arama algoritması (DSA) kullanılmıştır.

3.4. 2. Diferansiyel Arama Algoritması

DSA, canlı bir organizmanın göç etmek için kullandığı Brownian benzeri rastgele yürüyüş hareketini simüle eden yeni geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Çayır, göl gibi doğada bulunan besin kaynaklarının kalitesi ve verimi, bir yıl, on yıl veya asırdaki iklim değişiklikleri nedeniyle değişiklik gösterebilir. Canlı organizmalar kaliteli besin kaynakları bulmak ve kıtlığın üstesinden gelmek için aralıklarla mevsimsel olarak göç ederler. Bu davranış, organizmanın gıda kaynağının yüksek kalitede ve çeşitlilikte olduğu yeni bir ortama taşınmasını sağlar.

Göç eden organizmalar, çok sayıda bireyden oluşan bir süper organizma oluşturur ve süper organizma, yüksek kaliteli besin kaynakları içeren alanlara taşınarak yerini değiştirmeye başlar. Bir süper organizmanın hareketi Brownian benzeri rastgele yürüyüş modeli ile tanımlanabilir. Süperorganizmaların davranışı, parçacık sürü optimizasyonu, guguklu arama, karınca kolonisi ve yapay arı kolonisi gibi bir dizi hesaplamalı zekâ algoritmaları kullanılarak modellenmiştir. Birçok canlı türü, bir bölgeye taşınmadan veya göç etmeden önce, buranın verimliliğini kontrol eder. Başka bir deyişle, bir süperorganizma ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni bir siteye taşınmak isterse, bu süperorganizma bu yeni siteye en azından bir süre yerleşir. Bununla birlikte, daha verimli bir alan bulunursa, süperorganizma göçüne devam eder [91].

DS algoritmasında, ilgili sorunun rastgele çözümlerinden oluşan bir popülasyonun, göç eden yapay bir süperorganizmaya karşılık geldiği varsayılır. Yapay süperorganizma, sorunun küresel minimum değerine geçer. Bu göç sırasında, yapay süperorganizma, göç sırasında geçici olarak rastgele seçilen bazı konumların uygun olup olmadığını test eder. Eğer test edilen böyle bir konum göç sırasında geçici bir süre için durmaya uygunsa, bu tür keşfi yapan yapay süperorganizma üyeleri hemen keşfedilen konuma yerleşirler ve tarihinde bu konumdan

göçlerine devam ederler. DS algoritmasını ifade eden kod bütünü Şekil 3.26 ile verilmiştir, burada N popülasyon boyutu, D problemin boyutudur ve G ise maksimum iterasyon sayısıdır.

```

1: SüperOrganizma = Başla(), SüperOrganizma = [YapayOrganizmai]
2:  $y_i = Hesapla(YapayOrganizma_i)$ 
3: için döngü = 1: G
4: donor = SüperOrganizmaRasgeleÖteleme(i)
5: Ölçek = randg[2 × rand1] × (rand2 - rand3)
6: YinelemeOrganizması = SüperOrganizma + Ölçek × (donor - SüperOrganizma)
7:  $p_1 = 0.3 \times rand_4, p_2 = 0.3 \times rand_5$ 
8: eğer rand6 < rand7
9:   eğer rand8 < p1
10:    r = rand(N, D)
11:    için Counter1 = 1: N
12:      r(Counter1, :) = r(Counter1, :) < rand9
13:    son
14:  son
15:  r = ones(N, D)
16:  için Counter2 = 1: N
17:    r(Counter2, randi(D)) = r(Counter2, randi(D)) < rand10
18:  soniçin
19:  soneğer
20: son
21: r = ones(N, D)
22: için Counter3 = 1: N
23:   d = randi(D, 1, [p2 × rand × D])
24:   için Counter4 = 1: size(d)
25:     r(Counter3, d(Counter4)) = 0
26:   soniçin
27: soniçin
28: soneğer
29: üretilenleri,j ← ri,j > 0 | I ∈ i, J ∈ [1 D]
30: YinelemeOrganizması(individualsi,j) := SüperOrganizma(üretilenleri,j)
31: eğer YinelemeOrganizmasıi,j < lowi,j veya YinelemeOrganizmasıi,j > upi,j
32:   YinelemeOrganizmasıi,j := rand × (upj - lowj) + lowj
33: soneğer
34:  $y_{Yineleme,i} = Hesapla(YinelemeOrganizması_i)$ 
35:  $y_{Süperorganizma,i} := \begin{cases} y_{Yineleme,i} & \text{if } y_{Yineleme,i} < y_{Yineleme,i} \\ y_{Süperorganizma,i} & \text{aksi durumda} \end{cases}$ 
36: YapayOrganizma :=  $\begin{cases} YinelemeOrganizması_i & \text{if } y_{Yineleme,i} < y_{Süperorganizma,i} \\ YapayOrganizma_i & \text{aksi durumda} \end{cases}$ 
37: soniçin

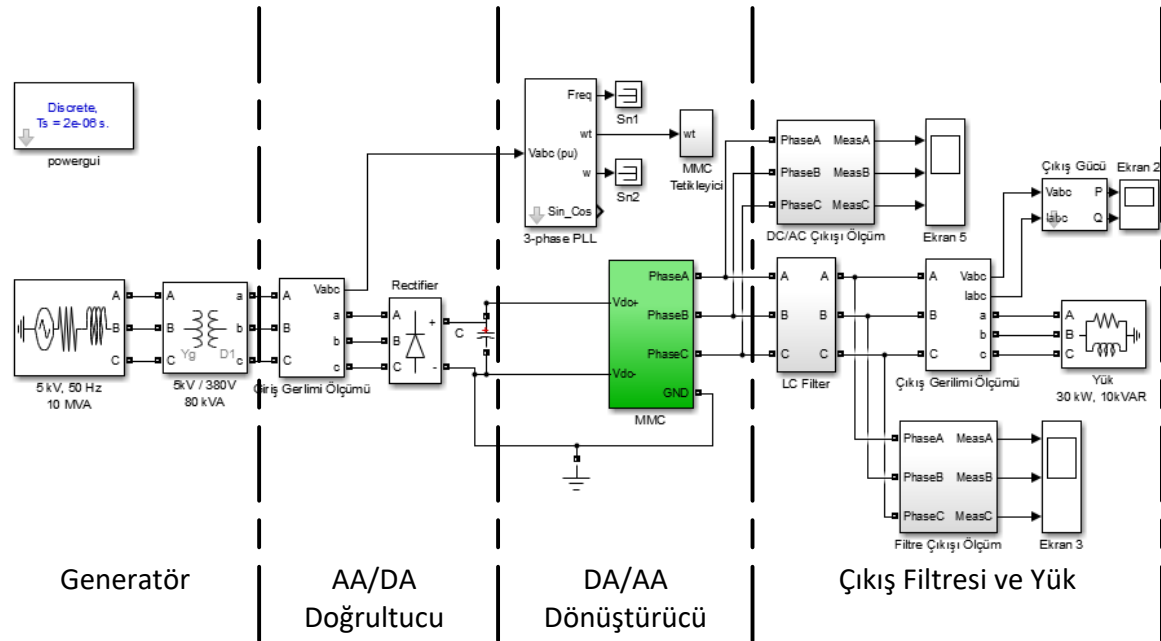
```

Şekil 3.26. Diferansiyel arama algoritması genel kodları.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

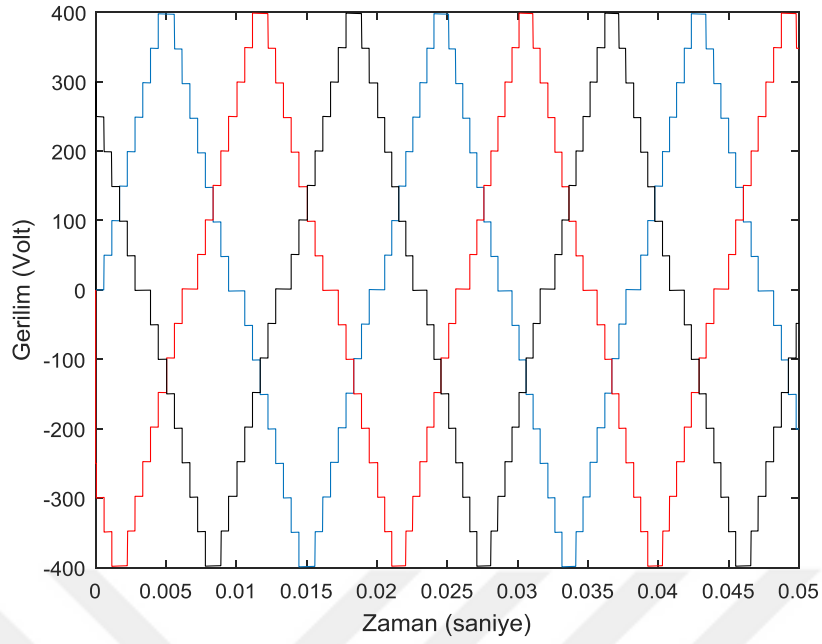
4.1. Modüler Çok Seviyeli Doğrultucu Filtre Parametre Optimizasyonu

Modüler çok seviyeli dönüştürücüye ait Matlab/Simulink ortamında oluşturulan şematik diyagramına ait görsel Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu diyagramda görüleceği üzere 3 faz AA gerilim kaynağı, 3-faz akım ve gerilimölçer bloğu, yük ve güç ölçer bloğu ve modüler çok seviyeli dönüştürücüye ait seri olarak sıralanmış alt modüller mevcuttur.

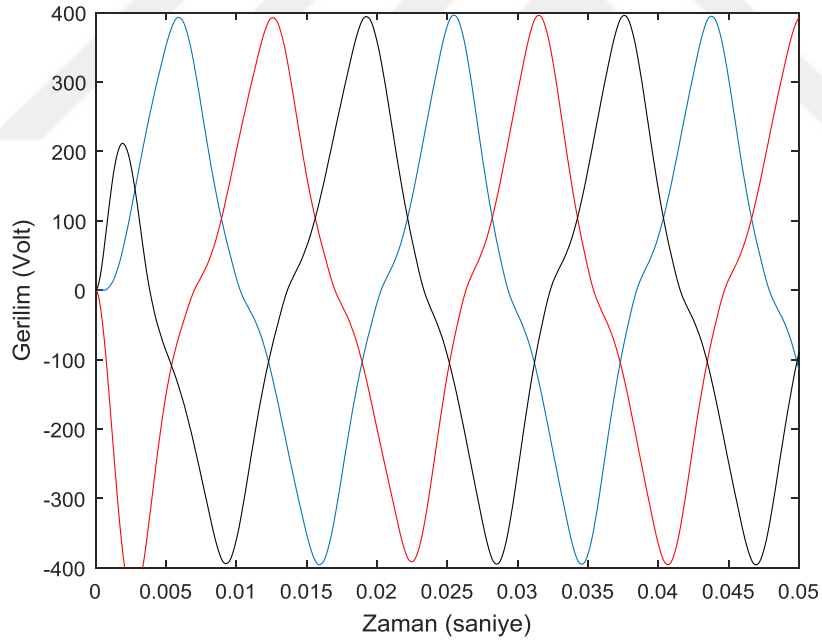


Şekil 4.1. Simülasyon amacıyla tasarlanmış üç-faz MÇSD içeren örnek güç sistemi.

Bu diyagramda üzerinde durulması gereken iki önemli bölüm modüler MÇSD alt sistemi ve her bir alt modülü tetikleme görevi olan tetikleme devresidir. Bu çalışmada kullanılan dönüştürücüye ait tetikleyici devresi örneği önceki bölümde Şekil 3.17 ile verilmiştir. Kurulan şematığın standart şartlar altında simüle edilmesi ile ortaya çıkan ve gerilim değerlerini gösteren grafik ise Şekil 4.2 ve 4.3 ile verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde DA-AA çevirici modülde mevcut olan filtre elemanlarının sinyalin sürekliliğini ne şekilde etkileyebildiği açıkça ortadadır. Şekil 4.3'te görülen filtre çıkışındaki düzensiz karakteristiği gidebilmek amacıyla hem dönüştürücü içindeki modüllerde mevcut olan kapasitör değerleri hem de filtrede mevcut olan L ve Q değerlerinin değiştirilmesi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Güç sistemlerinde kullanılan filtrelerdeki hesaplamalar yüksek güç ve akım sebebiyle C (kapasitans) cinsinden değil, pratikte kullanılmasının daha uygun olması amacıyla enjekte reaktif güç Q üzerinden yapılmaktadır.

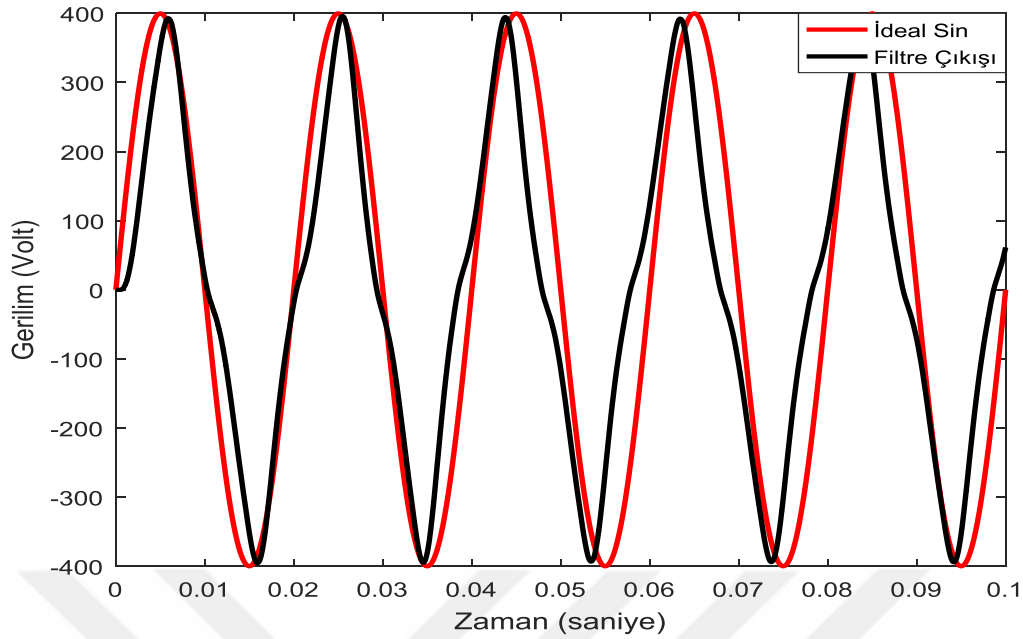


Şekil 4.2. MÇSD filtrelenmemiş basamak çıkışı.



Şekil 4.3. MÇSD filtrelenmiş basamak çıkışı.

Dönüştürücü çıkış portuna bağlanan sinyalin tam sinüzoidal olması gerekmektedir. Bu durumla ilgili görsel Şekil 4.4'te verilmiştir. Kırmızı renkli olan grafik ideal sinüzoidal sinyali gösterirken diğer sinyal ise rastgele seçene filtre çıkışındaki sinyal karakteristiğidir. Yani bu aşamadaki çıkış sinyallerinin ideal sinüzoidal sinyale yaklaştırılması amaçlanmaktadır.



Şekil 4.4. İdeal sinüzoidal sinyal ile rastgele seçilen değerler için elde edilen filtre çıkış sinyal grafiği.

4.1.1. Filtrelenmiş Sinyal İçin Performans Parametreleri

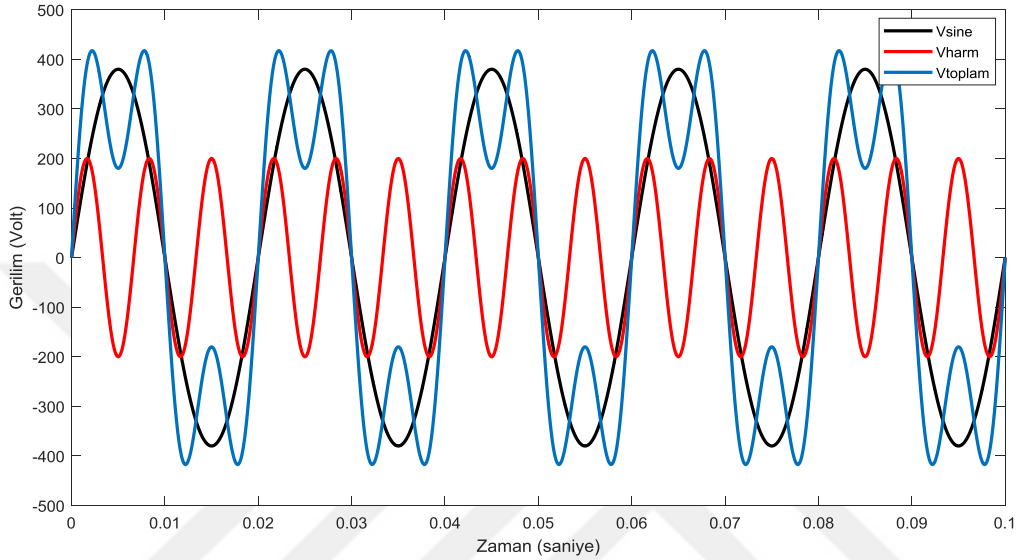
Sinyal Temel Frekansı: AA-DA-AA dönüştürücü tabanlı iletim sistemlerinde üretilen, iletilen ve dağıtılan elektrik sinyalinin frekans değerinin de belirli sınırlar kapsamında ele alınması gerekmektedir. Bu çalışmada oluşturulan dönüştürücü, çıkış sinyalinin frekans değeri 50Hz olacak biçimde tasarlanmıştır. Bununla birlikte genellikle üretim esnasındaki çalışma frekansı 50Hz olan bir sinyalin dağıtım sonrasında 48 ile 52Hz arasındaki değerleri de limitler içinde kabul görmektedir [92].

Sinyal Genliği: Dönüştürücü çıkışındaki sinyal genliğinin filtreleme sonrasında dağıtım şebekesine bağlaşımlı olabilmesi için genlik değerinin de 0.95 ile 1.05 pu yani orijinal sinyal genliğinin %95'i ile %105'i arasında olduğu değerler kabul edilebilir olarak tanımlanmaktadır.

Sinyal Karakteristiği: Çıkış alınan saf sinyalin (basamak kademeli AA sinyal) karakteristiğinin sinüzoidal sinyale yakınsaması ve ideal sinüs sinyaline erişebilmesi gerekmektedir.

Harmonik Faktörler: Birçok periyodik sinyalde olduğu üzere elektrik sinyalindeki harmonik faktörler de literatürde geniş bir çalışma alanına sahiptir. DA-AA dönüşümü yapılan

sinyalin birçok yüksek frekans bileşeni içerebileceği (3.harmonik, 5.harmonik, 7.harmonik vb.) göz önüne alınırsa, bu faktörlerin de minimum seviyeye indirgenmesi için optimizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. İdeal sinyal, harmonik sinyali ve ikisinin vektörel toplamı ile elde edilen harmonik içeren bozuk bir sinüs sinyaline ait görsel Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. 50 Hz frekansa sahip ideal sinüzoidal sinyal ile 150 Hz harmonik sinyalin birleşimi ile oluşan düzensiz sinüzoidal sinyal.

4.1.2. Filtre Performansı İçin Karar Verme Yöntemleri

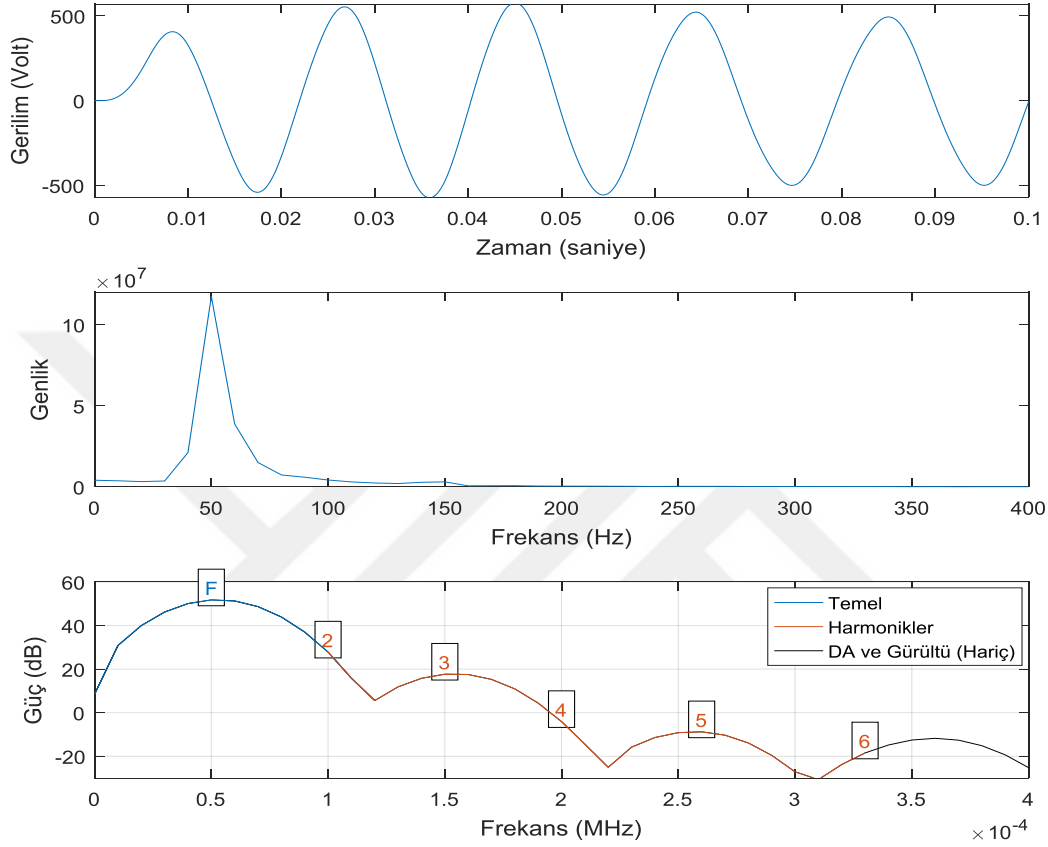
Elektrik üretim ve iletim sistemlerinde genellikle temel frekansa yakın olan harmonikler yani 3, 5 ve 7. harmonik bileşenler üzerinde sönümleme ve yok etme çalışmaları yapılmaktadır. Bunun sebebi ise frekansın yükselmesi sonucunda sinyal kuvvetinin ve dolayısıyla sisteme etkisinin azalmasıdır. En düşük dereceli harmonik bileşenin gücü kriter kabul edilerek optimizasyon çalışması yapılabilmektedir [93].

Bu çalışmada alçak geçiren filtre parametrelerini belirlemek amacıyla DSA kullanılmıştır. Yukarıda verilen yöntemler hem tek başına hem de farklı kombinasyonlar ile çok-amaçlı yaklaşıma yönelik kullanılarak sistemin en uygun çıkışı vermesi sağlanmıştır.

4.1.3. Durum 1: Toplam Harmonik Bozulma

Toplam harmonik bozulma (THD), temel frekansın üzerindeki frekans bileşenlerinin, temel frekans bileşeni gücüne oranıdır. Elektrik iletim sistemlerinde 3, 5 ve 7. harmoniklerin

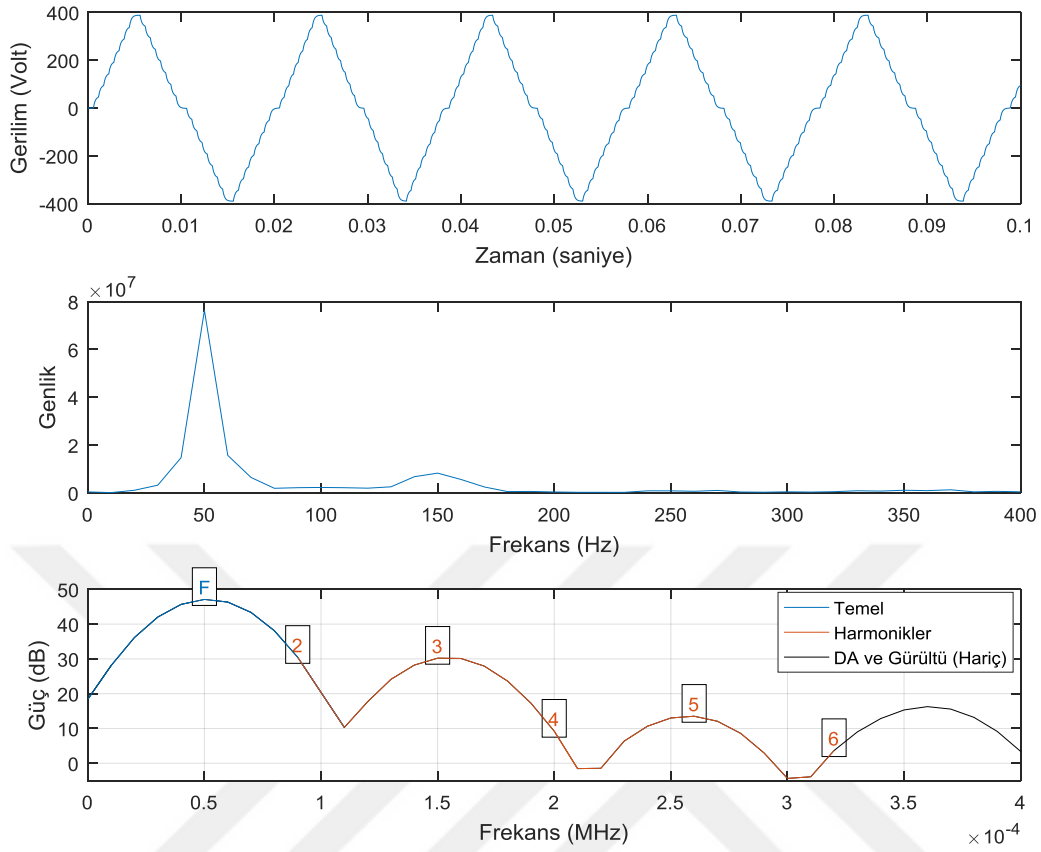
gücü esas alınarak hesaplanmaktadır. THD ne kadar düşükse sinyalin temel frekanstaki saflığı ve kalitesi o oranda yüksektir. Optimizasyon neticesinde elde edilen verilere göre alınan çıkış sinyali ve sinyal karakteristiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Toplam Harmonik Bozulma değerinin minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyali karakteristiği.

4.1.4. Durum 2: Sinyalin Genlik Optimizasyonu

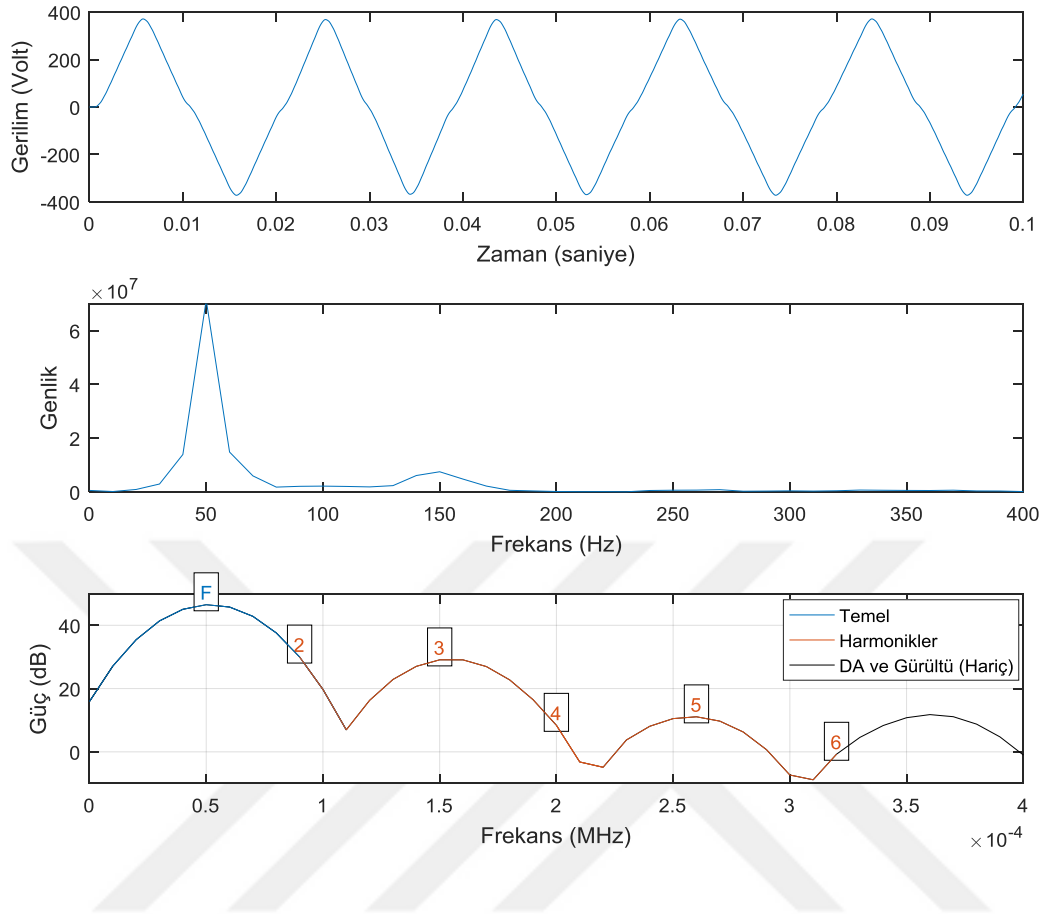
Sinyal genlik optimizasyonunda, sadece sinyalin genlik değeri istenilen sinüzoidal sinyalin genlik değerine yakınlaştırılmak istenilmektedir. Karakteristiği, şekli, yüksek frekans bileşenleri gibi parametreler göz ardı edilerek optimizasyon gerçekleştirilir. Optimizasyon neticesinde elde edilen verilere göre alınan çıkış sinyali ve sinyal karakteristiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Sinyal genlik farkının minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyali karakteristiği.

4.1.5. Durum 3: Öklid Uzaklığı Optimizasyonu

Öklid uzaklığı tek veya daha fazla boyutlu uzaylarda bileşen içeren noktalar veya sinyaller üzerinde kullanılabilir. Bu çalışmada ideal bir sinüzoidal elektrik sinyali ile filtre çıkışındaki gürültü ve harmonikler içeren sinyal noktaları arasındaki öklid uzaklığı alınarak, üretilen sinyalin ideal sinüzoidal sinyale en yakın biçimde oluşturulması amaçlanmaktadır. Optimizasyon neticesinde elde edilen verilere göre alınan çıkış sinyali ve sinyal karakteristiği Şekil 4.8’de verilmiştir.

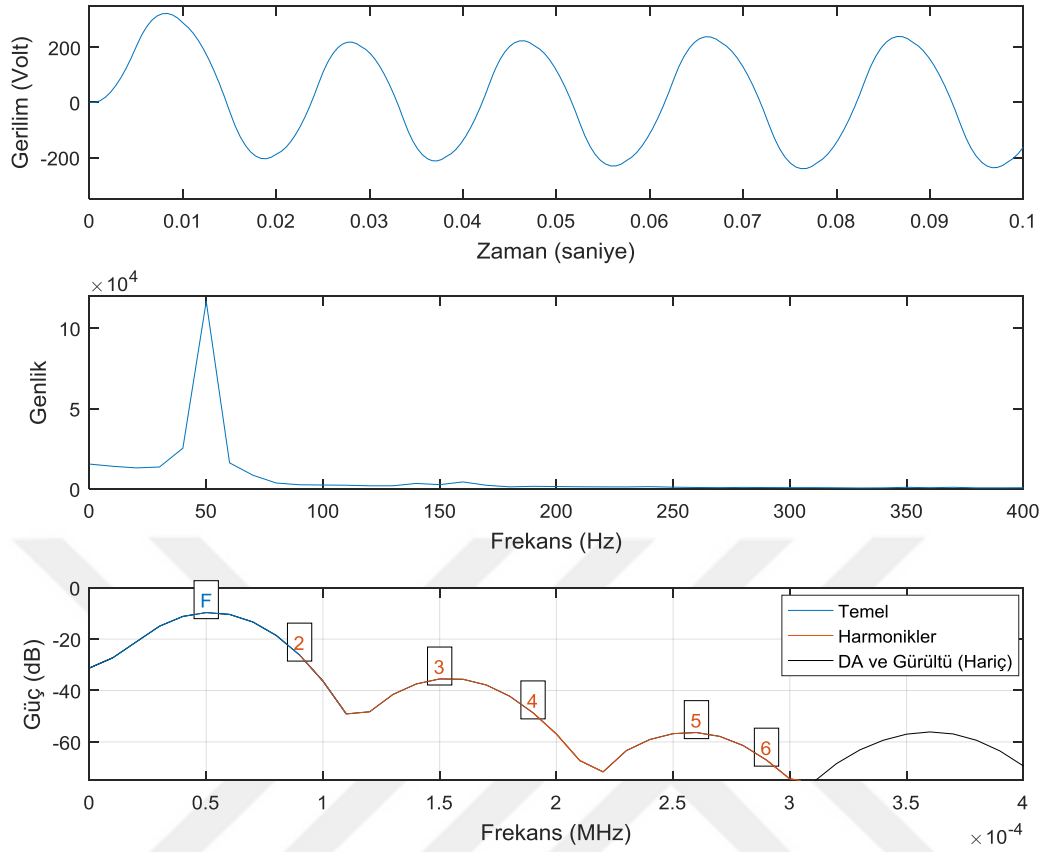


Şekil 4.8. İdeal sinyal ile çıkış sinyali farkının Öklid uzaklığının minimuma indirgenmesi sonucu elde edilen filtre çıkış sinyal karakteristiği.

4.1.6. Durum 4: Fourier Spektrum Analizi

Dönüştürücü ve filtre çıkışında elde edilen sinyalin Fourier dönüşümü sonucunda frekans bileşenleri gözlenebilmektedir. Düşük geçiren LC filtresinin parametreleri belirlenen sınırlar içinde değiştirilerek çıkış sinyalinin temel frekans bileşeni dışındaki dalgalanmaların minimum seviyeye indirgenmesi ile optimizasyon yapılabilmektedir. Optimizasyon neticesinde elde edilen verilere göre alınan çıkış sinyali ve sinyal karakteristiği Şekil 4.9’da verilmiştir.

Yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen filtre paramterlerine ait sonuçlar ve sinyal kalitesine yönelik sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablodan anlaşılabacağı üzere her amaca yönelik elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir.



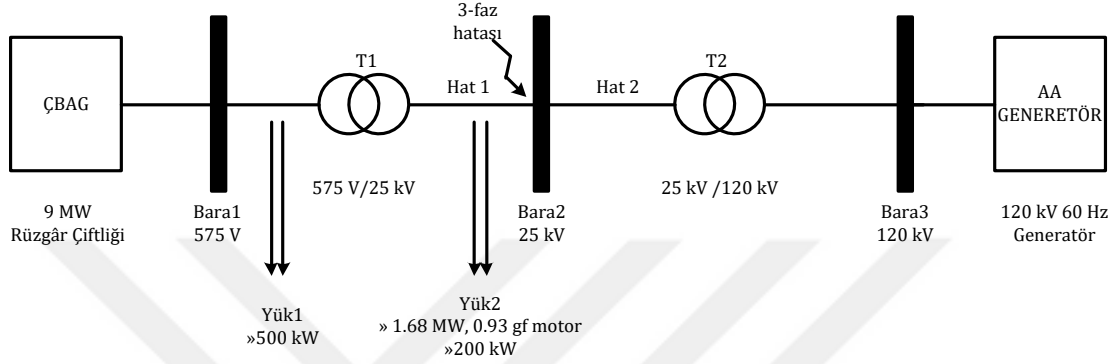
Şekil 4.9. Filtre çıkış sinyali frekans bileşenlerinin optimizasyonu sonucu elde edilen filtre çıkış sinyali karakteristiği.

Tablo 4.1. Sinyal karakteristiği optimizasyon sonuçları

Durum	L (H)	Q (kVAR)	Toplam Bozulma	Harmonik	Genlik (V)	Temel (Hz)	Frekansı
4.1.3	0.0026	50.00	-23.64		566	49.99	
4.1.4	0.0021	33.81	-14.34		398	51.09	
4.1.5	0.0016	29.90	-13.74		371	50.98	
4.1.6	2.32	0.05	-15.25		323	50.21	

4.2. ÇBAG Rüzgâr Çiftliği İçeren Güç Sisteminin Parametre Optimizasyonu

Matlab/Simulink uygulamasında mevcut olan ÇBAG modeli kullanılarak oluşturulan senaryoya ait güç sistemi modeli Şekil 4.10'da verilmiştir. Yük1'den çekilen 500 kW'lık aktif gücün yanı sıra Yük2 bloğu içerisinde transformatör, güç faktörü düzenleyici, 200 kW değerinde yük ve 1.68 MW'lık anma gücüne sahip 0.93 güç faktöründe çalışan asenkron bir motor vardır.



Şekil 4.10. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr çiftliği içeren güç sistemi.

Bölüm 3.2.2'de verilen ÇBGA parametreleri sistemin farklı durumları için DSA kullanılarak optimize edilmiştir. Yapılan test çalışmalarındaki parametreler öncelikle başlangıç değerlerinin minimum 0 ve maksimum 10 katı olacak şekilde rastgele çözüm uzayları için çözülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde sistemin karakteristiğinin en uygun olduğu durumların başlangıç değerlerinin 0.6 ve 3 katı olduğu belirlenerek alt ve üst limitler bu aralıkta seçilmiştir. Bu parametrelere ait başlangıç değerleri Ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.1. Durum 1: Sistemdeki 575V'lık Bara Üzerindeki 3-Faz AA Gerilimin Sapma Miktarının Azaltılması

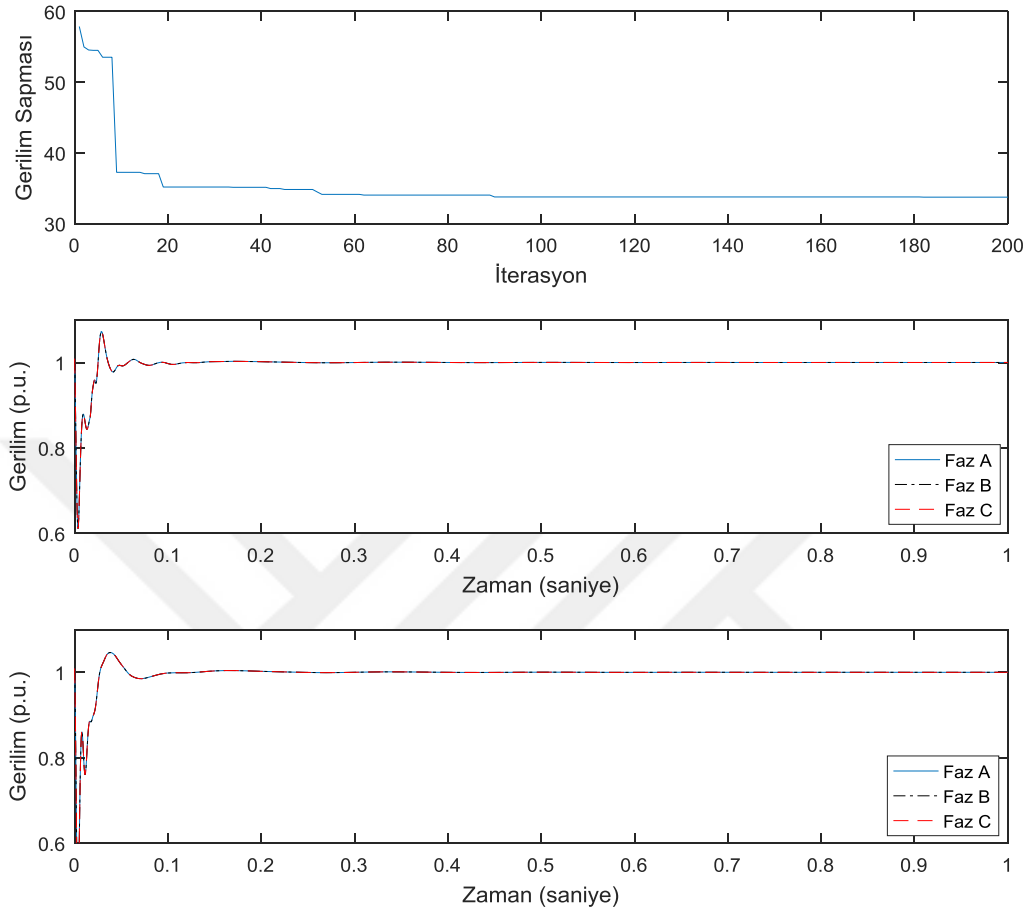
▫ 1- Sistemde hata yokken

Rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

$$V_{Sapma} = abs(1 - V_{FazA}) + abs(1 - V_{FazB}) + abs(1 - V_{FazC}) \quad (63)$$

Sistemde herhangi bir kısa-devre hatası olmadığı durumda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim

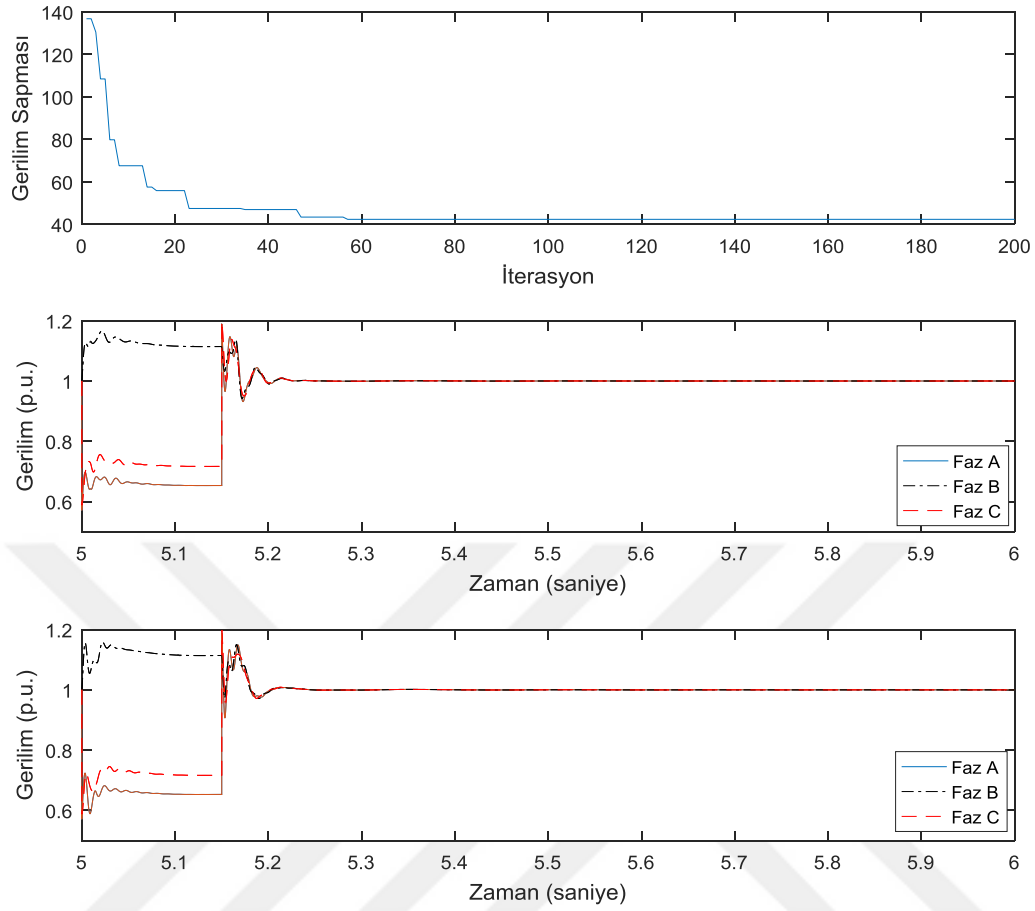
karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri yukarıdan aşağıda olacak biçimde sırasıyla Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. 575V bara için toplam gerilim saptması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- 2-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.15 saniyelik kısa devre hatası verilmişken Rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim saptması formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

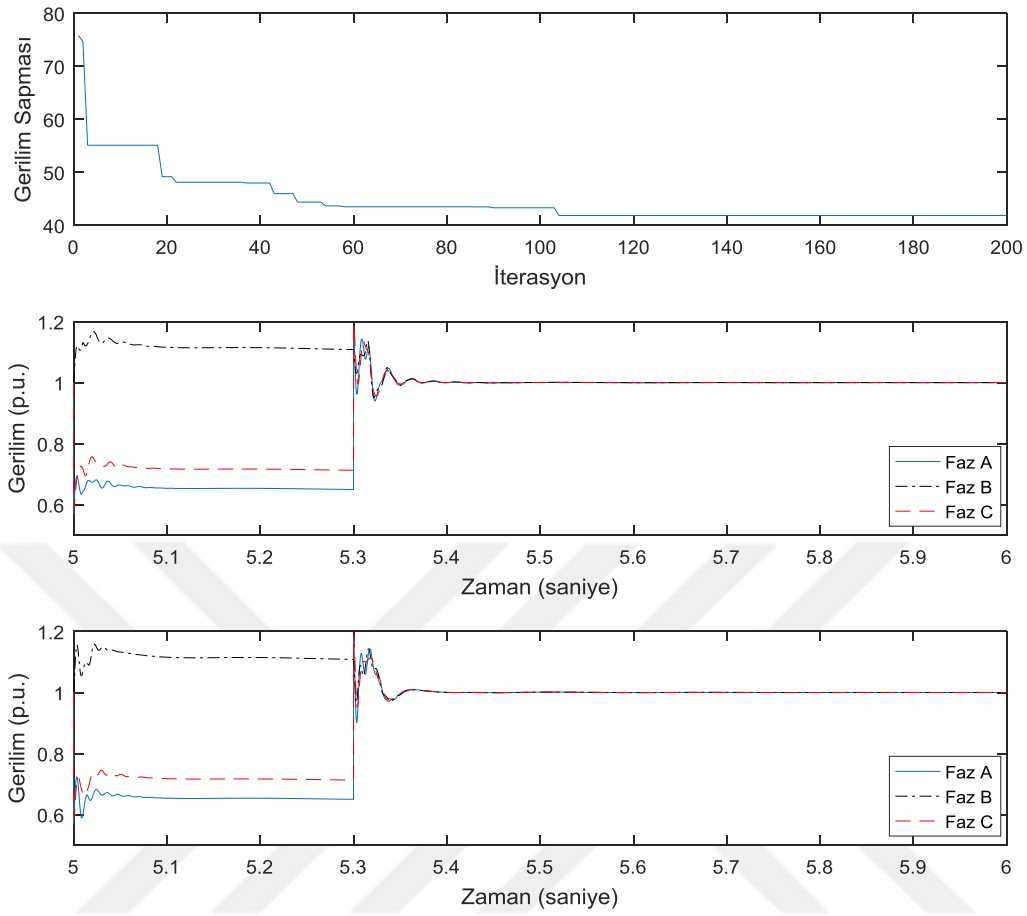
Sistemde 0.15 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1’e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri yukarıdan aşağıda olacak biçimde sırasıyla Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Kısa devre arızası durumunda 575V bara için toplam gerilim saptması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- 3- Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.30 saniyelik kısa devre hatası verilmişken Yük2'nin bağlı olduğu 25kV değerindeki 3-faz baranın faz gerilim saptması formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Sistemde 0.3 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri yukarıdan aşağıda olacak biçimde sırasıyla Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Kısa devre arızası durumunda 575V bara için toplam gerilim sapması optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

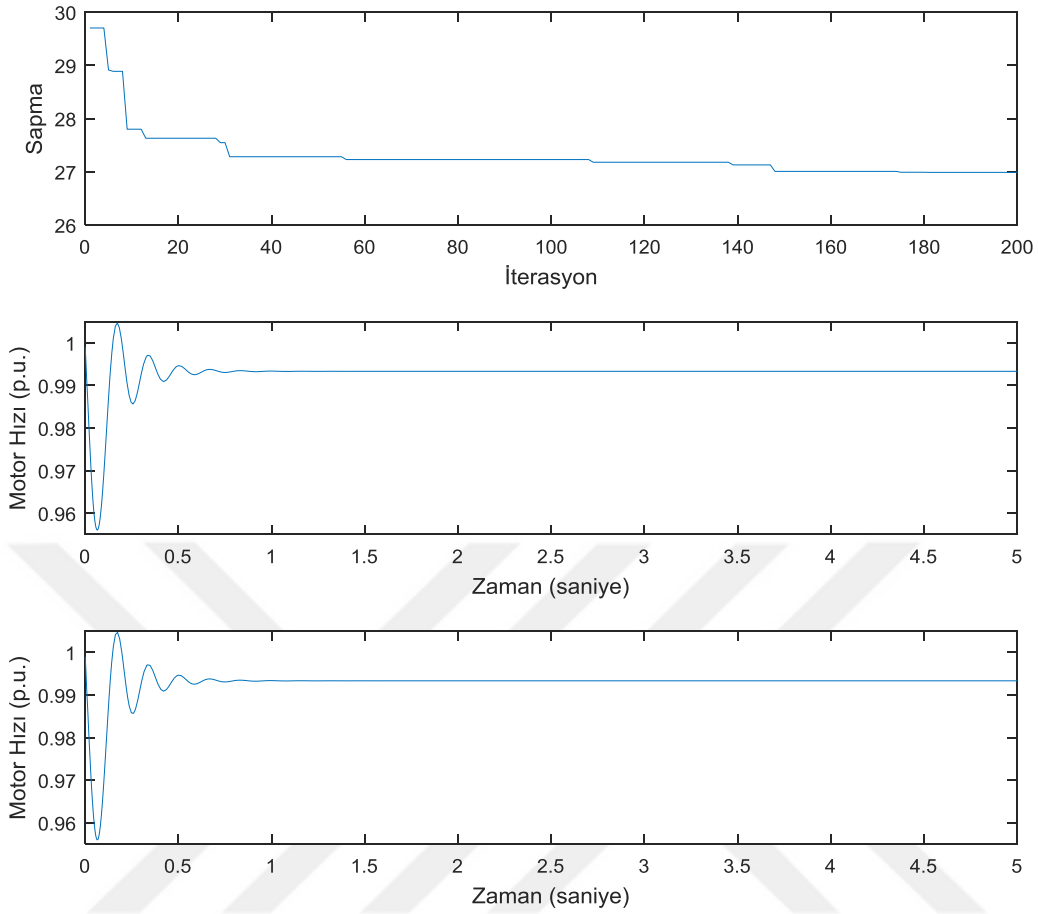
4.2.2. Durum 2: Yük2 Bloğu İçindeki Motorun Hızının Sapma Miktarının Azaltılması

▫ *1-Sistemde hata yokken*

Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması (1 p.u. ile arasında olan fark değeri) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

$$S_{Sapma} = abs(1 - S_{Motor}) \quad (64)$$

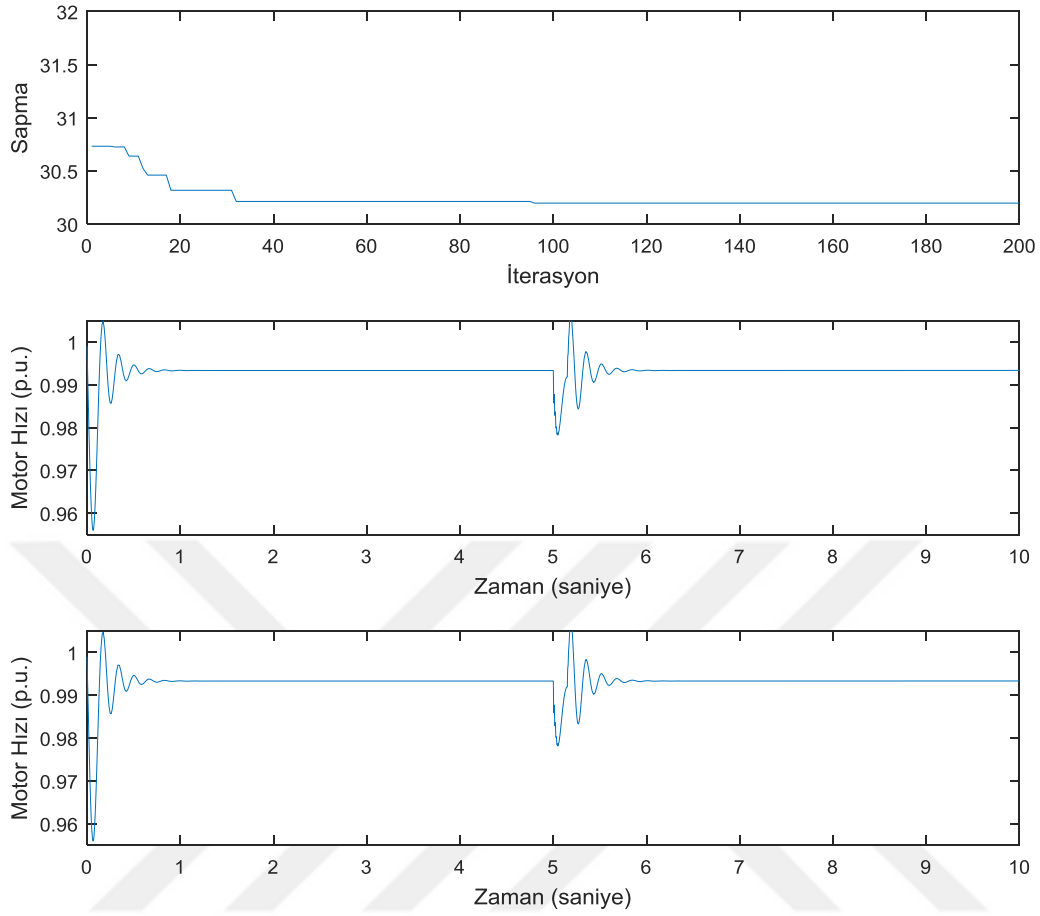
Sistemde herhangi bir kısa-devre hatası olmadığı durumda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği ve motorun hız karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri yukarıdan aşağıda olacak biçimde sırasıyla Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- *2-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.15 saniyelik kısa devre hatası verilmişken 5.saniyede başlayan ve 5.15 saniyede sona eren bir kısa-devre hatası durumunda Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması (1 p.u. ile arasında olan fark değeri) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.*

Sistemde 0.15 süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği ve motorun hız karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri yukarıdan aşağıda olacak biçimde sırasıyla Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Kısa devre arızası durumunda motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

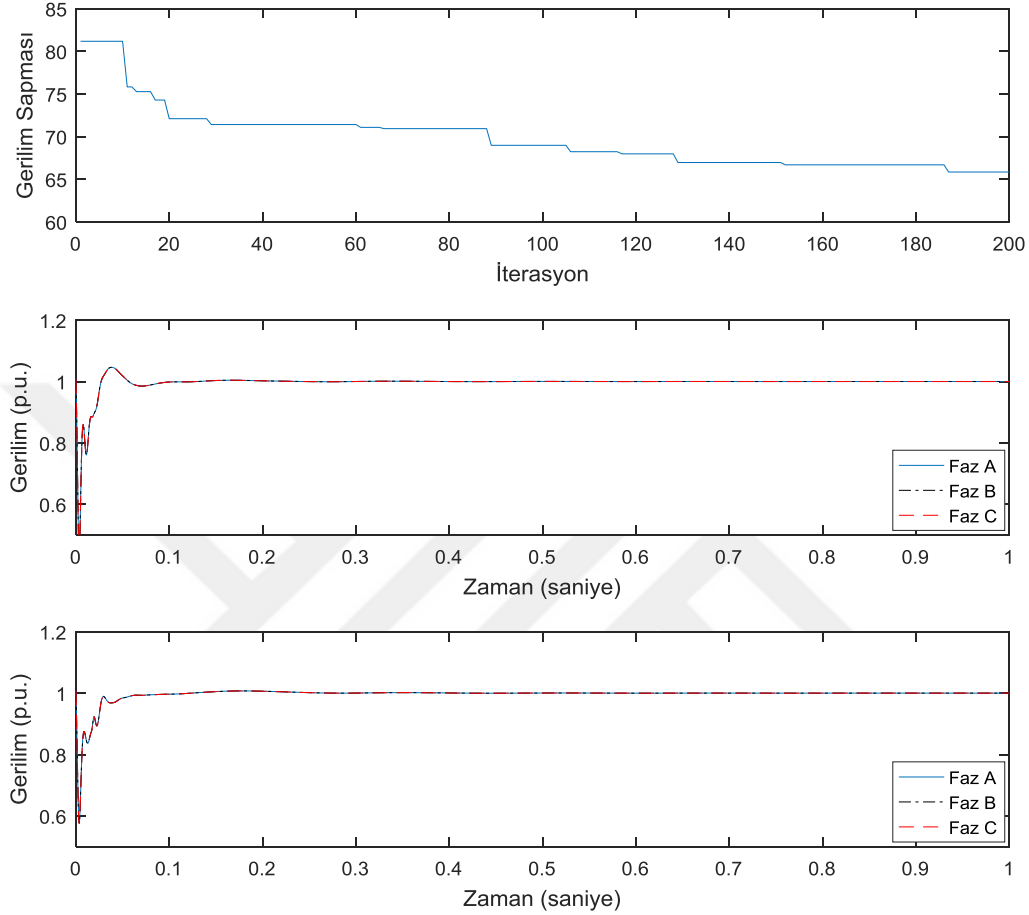
4.2.3. Durum 3: Sistemdeki 575V’luk Bara Üzerindeki 3-Faz AA Gerilimin Ve Yük2 Bloğu İçindeki Motorun Hızının Sapma Miktarının Azaltılması

▫ *1-Sistemde hata yokken*

575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması ile Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

$$T_{Sapma} = abs(1 - V_{FazA}) + abs(1 - V_{FazB}) + abs(1 - V_{FazC}) + abs(1 - S_{Motor}) \quad (65)$$

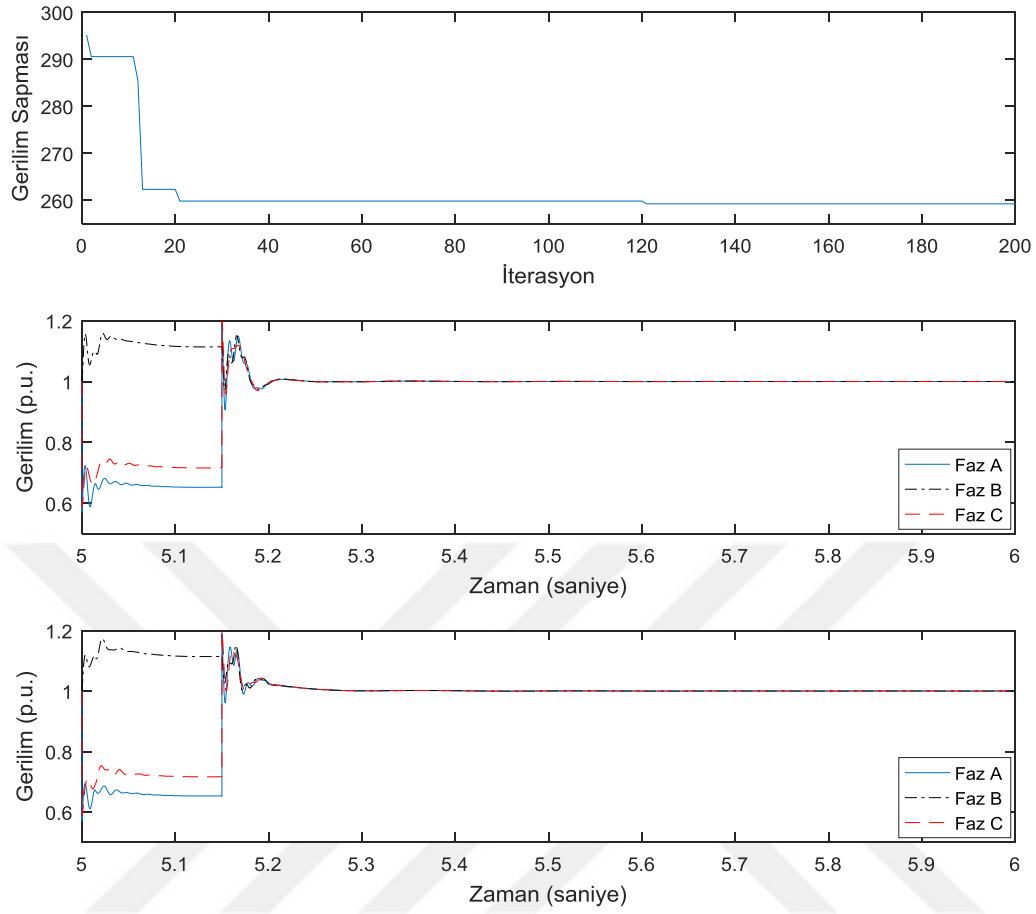
Sistemde herhangi bir kısa-devre hatası olmadığı durumda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- *2-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.15 saniyelik kısa devre hatası verilmişken*
5.saniyede başlayan ve 5.15 saniyede sona eren bir kısa-devre hatası durumunda rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması ile Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması (1 p.u. ile arasında olan fark değeri) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

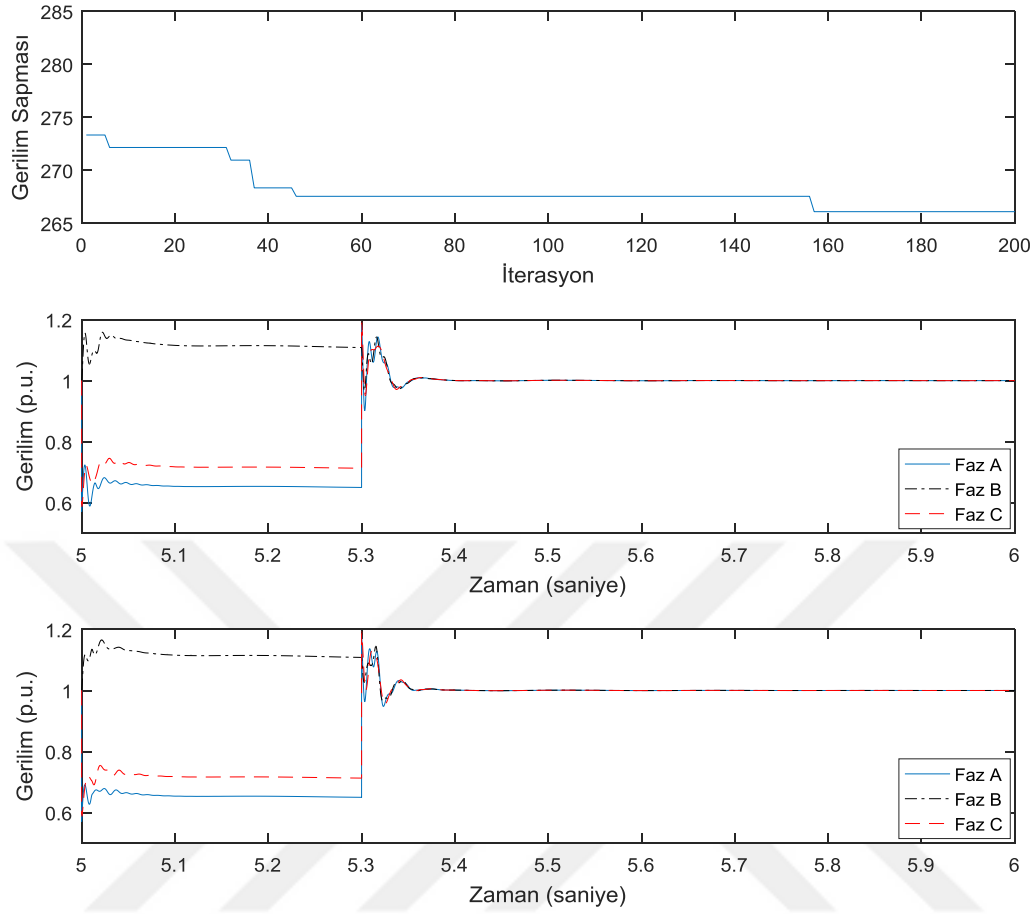
Sistemde 0.15 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- *3-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.30 saniyelik kısa devre hatası verilmişken 5.saniyede başlayan ve 5.3 saniyede sona eren bir kısa-devre hatası durumunda rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması ile Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması (1 p.u. ile arasında olan fark değeri) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.*

Sistemde 0.3 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

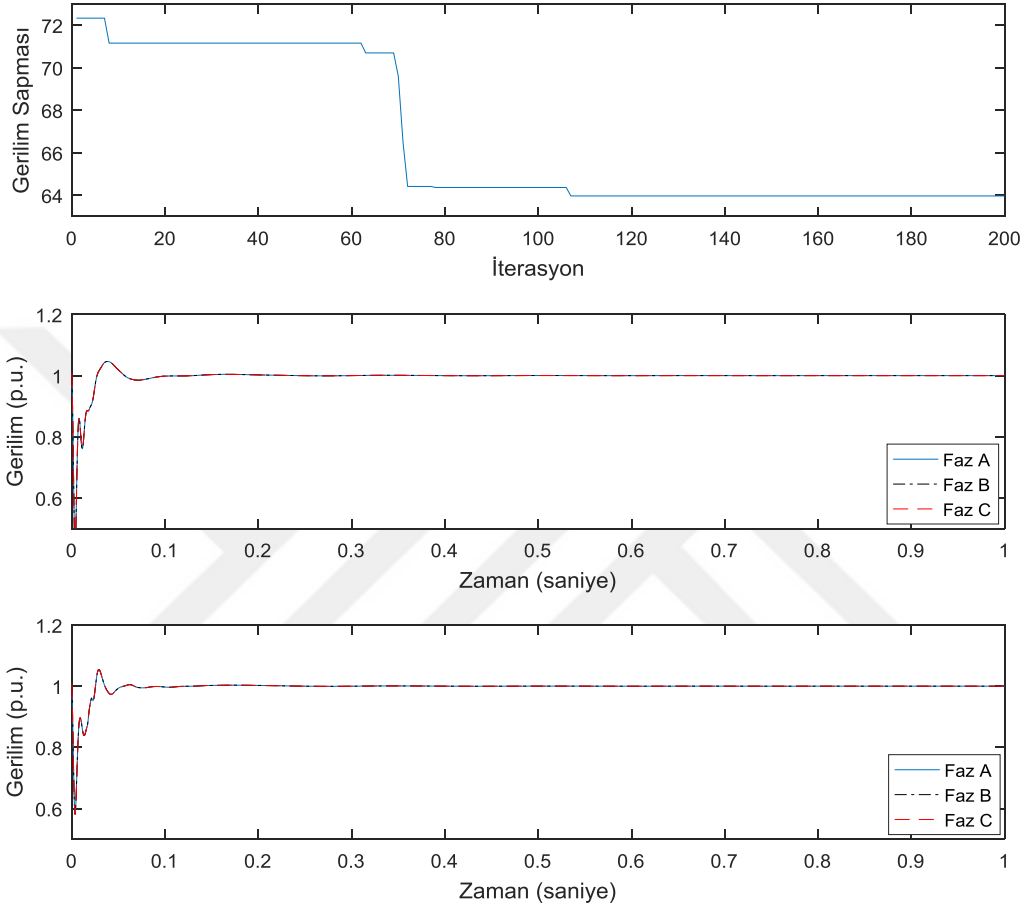
4.2.4. Durum 4: Sistemdeki Yük Artırımı Durumunda Optimizasyon

▫ *1-Sistemde hata yokken*

B575'e bağlı olan 500kW'lık yük değeri ek olarak 300kW'lık bir yük talebi sonrasında; (66) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

$$T_{Sapma} = abs(1 - V_{FazA}) + abs(1 - V_{FazB}) + abs(1 - V_{FazC}) + abs(1 - S_{Motor}) \quad (66)$$

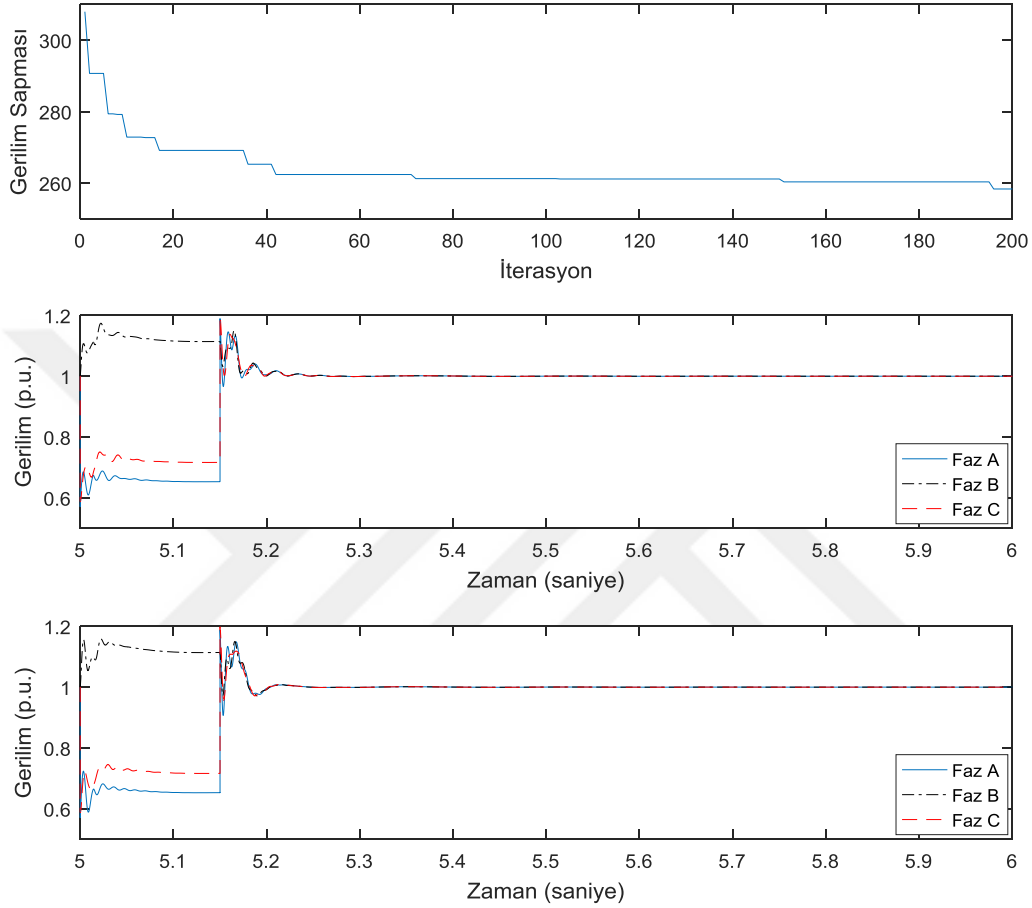
Sistemde herhangi bir kısa-devre hatası olmadığı durumda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- *2-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.15 saniyelik kısa devre hatası verilmişken*
B575'e bağlı olan 500kW'lık yük değeri ek olarak 300kW'lık bir yük talebi sonrasında; 25kVluk bara üzerinde 5.saniyede başlayan ve 5.15 saniyede sona eren bir kısa-devre hatası durumunda rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması ile Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması.

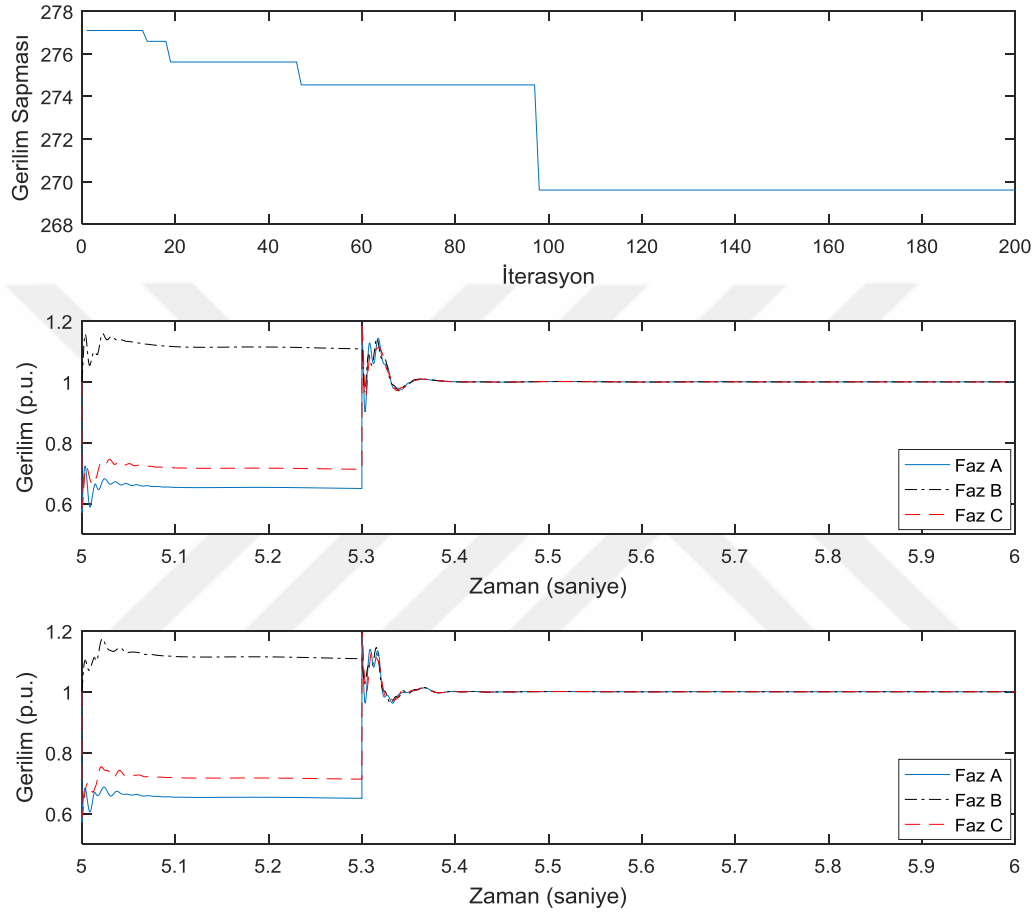
Sistemde 0.15 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

- *3-Sistemdeki 25kV bara üzerinde 0.30 saniyelik kısa devre hatası verilmişken*
B575'e bağlı olan 500kW'lık yük değeri ek olarak 300kW'lık bir yük talebi sonrasında; 25kVluk bara üzerinde 5.saniyede başlayan ve 5.3 saniyede sona eren bir kısa-devre hatası durumunda rüzgâr türbininin bağlı olduğu 575V değerindeki 3-faz baranın faz gerilim sapması ile Yük2 bloğu içindeki motorun hız sapması (1 p.u. ile arasında olan fark değeri) formüle edilerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Sistemde 0.3 saniye süreyle kısa-devre hatası durumunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait yakınsama grafiği, 575 Volt değerindeki Bara 1'e ait 3-faz gerilim karakteristiğinin optimizasyon öncesi ve sonrası grafikleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Kısa devre arızası durumunda 575V baranın 3-faz gerilimi ve motor hızı için toplam sapmanın optimizasyonu yakınsama grafiği, başlangıç ve optimal parametrelere göre sinyal karakteristiği.

Toplam 11 farklı durum için farklı amaç fonksiyonları için yapılan optimizasyon çalışmalarına ait sonuçlar Tablo 4.2 ile verilmiştir. Bu tabloda mevcut olan iyileştirme oranı, sistemin başlangıç değerlerine olan gerilim veya motor hızındaki sapmadaki iyileşme durumunu göstermektedir.

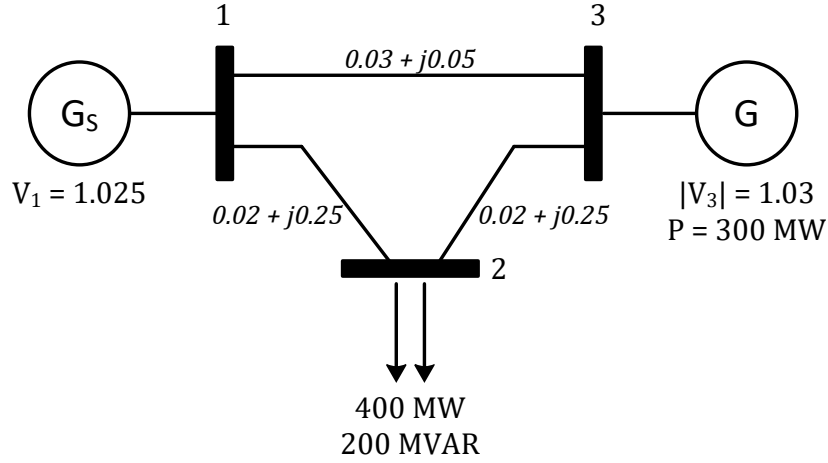
Tablo 4.2. Parametre iyileştirme oranları.

Durum	Parametre					İyileştirme Oranı (%)
	GVRG	PRG	DCBVRG	GSCCRG	RSCCRG	
4.2.1.1	[3.71 393.36]	[2.38 122.78]	[0 0.03]	[1.81 143.48]	[0.87 19.99]	25.7
4.2.1.2	[3.68 398.66]	[1.96 60]	[0 0.07]	[2.68 134.21]	[0.86 6.55]	52.1
4.2.1.3	[3.28 348.18]	[2.50 106.33]	[0 0.10]	[3 60]	[0.9 20.44]	56.4
4.2.2.1	[1.70 203.12]	[0.6 60]	[0 0.15]	[0.91 170.04]	[0.23 17.85]	19.3
4.2.2.2	[0.81 354.96]	[0.80 162.27]	[0 0.06]	[3 95.88]	[0.58 6.88]	8.2
4.2.3.1	[1.90 180]	[0.69 199.49]	[0 0.03]	[2.16 90.06]	[0.71 24]	0.5
4.2.3.2	[2.33 180]	[0.6 153.23]	[0 0.11]	[2.97 66.72]	[0.74 15.94]	9.3
4.2.3.3	[2.70 337.24]	[0.6 73.53]	[0 0.06]	[1.99 60]	[0.81 21.92]	10.1
4.2.4.1	[3.75 343.14]	[1.82 109.55]	[0 0.04]	[2.80 212.61]	[0.81 23.81]	8.7
4.2.4.2	[1.65 233.67]	[2.88 60]	[0 0.04]	[3 60]	[0.84 14.29]	6.6
4.2.4.3	[0.75 410.71]	[1.83 223.44]	[0 0.13]	[1.35 300]	[0.83 19.59]	19.8

4.3. Genişletilmiş Güç Akışının 3-Baralı Test Sistemine Uygulanması

Bu bölümde genişletilmiş güç akışının PV üretim tesisi entegrasyonu üzerindeki performansını görebilmek amacıyla 3-baralı örnek bir test sistemi modifiye edilerek üzerinde çalışılmıştır [93]. Test sisteminin bazı parametreleri modifiye edilerek Şekil 4.22 ile verilmiştir. Sisteme ait klasik güç akışı sonuçları Tablo 4.3'te mevcuttur. Klasik güç akışı sonucunda sisteme herhangi bir enjekte güç olmadığı durumda 2 numaralı yük barasının gerilimi 0.959 pu olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistem tarafından üretilen toplam aktif güç 423.34 MW, reaktif güç 229.49 MVAR ve aktif güç kaybı ise 23.34 MW olarak hesaplanmıştır.

Bu sistemin 2 numaralı barasına Bölüm 3.2.1'de verilen gerilim-akım-güç karakteristiğine sahip PV sistem entegre edilmiş ve 500 ile 1000 W/m² ışınım değerleri için genişletilmiş güç akışı çözülmüştür. Genişletilmiş güç akışına ait sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.22. 3-Baralı örnek güç sistemi.

Tablo 4.3. Test sitemine ait klasik güç akışı sonuçları.

Bara	Gerilim		Üretim	
	Genlik (p.u.)	Açı (Derece)	P (MW)	Q (MVA)
1	1.025	0.00	123.34	152.85
2	0.959	-0.937	-	-
3	1.030	1.612	300	76.64

Tablo incelenirse, PV sistemin bağlı olduğu baranın gerilimi %100, %150, %200 yükleme oranlarına göre sırasıyla %0.92, %1.18 ve %1.14 iyileştirilmiştir. Bununla birlikte sistemdeki generatörlerden çekilen aktif güç değerleri ve aktif güç kayıpları da PV kullanılmayan sisteme nazaran azaltılmıştır. Maksimum güç kaybı iyileştirmeleri ise sırasıyla %18.91, %9.96 ve %15.77 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. PV entegrasyonu yapılan test sitemine ait genişletilmiş güç akışı sonuçları.

Yükleme	V ₂	Işınım (W/m ²)						Maksimum Gerilim İyileştirme (%)	Maksimum Güç Kaybı İyileştirme (%)
		500			1000				
		P _{PV}	V ₂	P _{Gtoplam}	P _{PV}	V ₂	P _{Gtoplam}		
100%	0.959	38.06	0.963	382.86	79.18	0.968	339.85	0.92	18.91
150%	0.920	37.73	0.925	614.35	77.10	0.931	571.14	1.18	8.96
200%	0.877	36.65	0.882	865.45	74.16	0.887	821.67	1.14	15.77

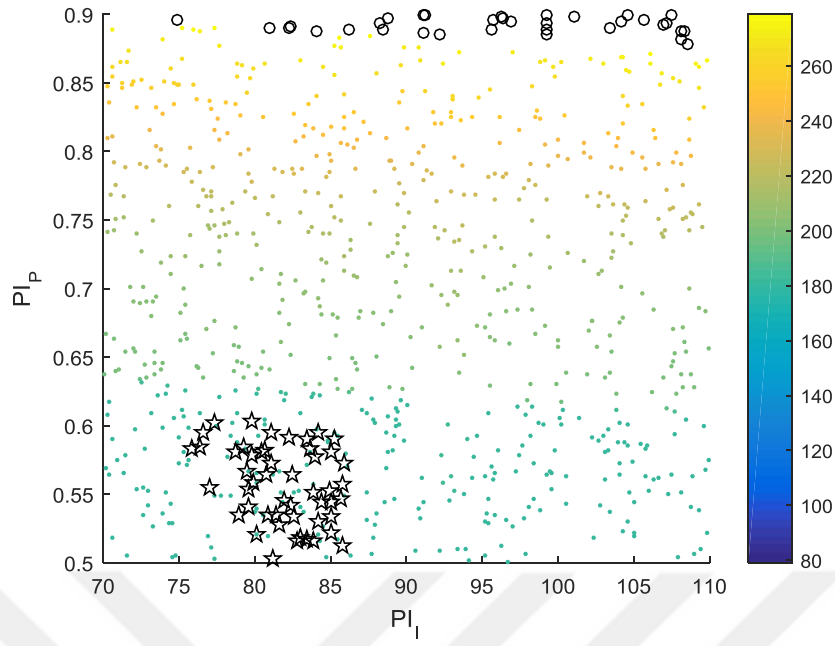
4.4. PV Üretim Santralının YGDA İletimi Üzerinden YGAA Sisteme Entegrasyonu

Bölüm 3.2.1’de verilen gerilim-akım-güç karakteristiğine sahip PV sistem; IEEE-9, 39 ve 57 baralı [77] güç sistemlerine dinamik optimizasyon amacıyla AYD ve MÇSD üzerinden entegre edilmiştir. Öncelikle PV santrali YGDA sistemini kullanarak YGAA sistemlerine entegre edebilmek için kullanılacak dönüştürücülerin optimizasyonu için hedef fonksiyonu (F_{obj}) oluşturulmuştur. Gerilimin sinyal kalitesi, MÇSD’nin her aktif alt modülü için ortalama gerilim büyüklüğünün yanı sıra AYD’nin aşma, yerleşme süresi ve durağan durum hatasına bağlıdır. Sistemin dinamik kararlılığını iyileştirmek için kullanılan amaç fonksiyonu (67) ile verilmiştir; burada $DCos$, $DCst$, $DCsse$, DA sinyalinin aşımını, yerleşme süresini ve durağan durum hatasını temsil ederken, AC_{avg} ise MÇSD çıkılındaki AA sinyalinin ortalama gerilim hatasını temsil eder. Her bileşen için katsayılar $w_1 = 1$, $w_2 = 10^3$, $w_3 = 10$, $w_4 = 10$ olarak seçilmiştir.

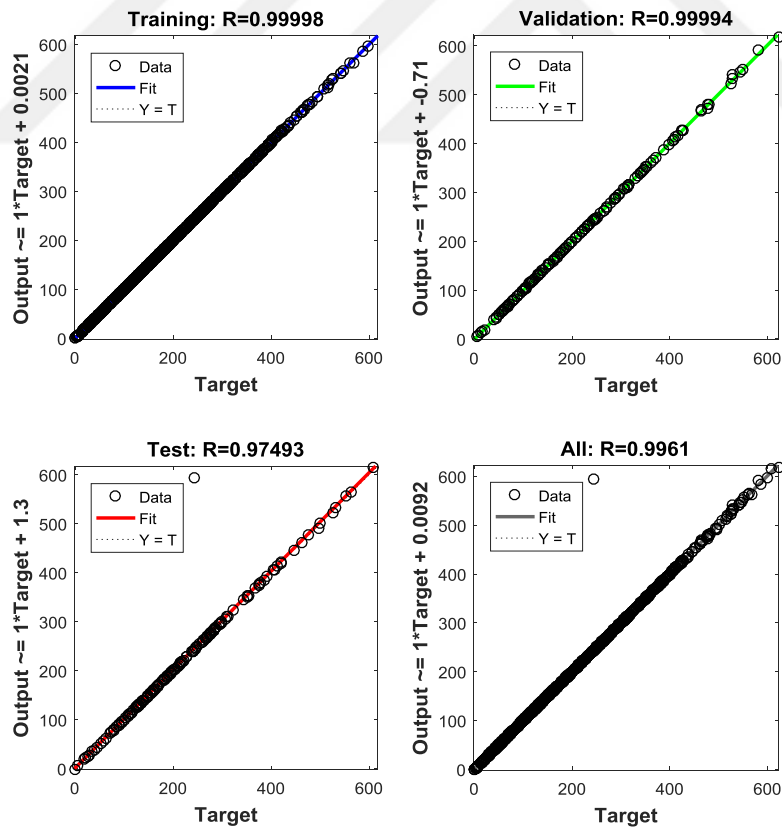
$$f_{obj} = w_1 DCos + w_2 DCst + w_3 DCsse + w_4 AC_{avg} \quad (67)$$

Başlangıç P ve I katsayıları sırasıyla Ziegler-Nichols yaklaşımını kullanarak 0.67 ve 87.11 kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, katsayıların kısıtlamalarını belirlemek için, PV sistemine bağlı kontrol bloğu, başlangıç katsayılarına göre oluşturulan rastgele değerler kullanılarak simüle edilir. Böylece, kontrolör için P ve I katsayılarının kısıtları herhangi bir sistem arızasına yol açmadan sırasıyla [0.5, 0.9] ve [70 110] olarak elde edilmiştir.

Ayrıca sistemin çalışma hızını iyileştirebilmek ve ani parametre değişimlerine tepki verebilmek amacıyla DSA kullanılarak sistemin dinamik kararlılığına yönelik bir YSA eğitilmiştir. Bu yöntemin normal yani rasgele eğitim yaklaşımından farkı sadece rastgele veri seti ile değil rastgele veri setinin yanı sıra sistemin maksimum ve minimumdaki değerlerinin çözüm uzayını kullanmasıdır. IEEE 9-baralı sistem örnek alınacak olursa; YSA eğitim veri seti ve regresyon şeması Şekil 4.23 ve 4.24’te verilmiştir. Eğitim veri seti, noktalarla gösterilen değerler rastgele örnekleri ve çokgenler ve dairelerle gösterilen değerler ise (67)’ye uygun olarak hedef fonksiyonun değerlerini gösteren DSA tarafından optimizasyon neticesinde edilmiş örnekleri içerir. Rastgele örneklemeler için 900 ve olası en kötü ve en iyi çözümler için 100 adet veri olmak üzere toplam 1000 örnek vardır.

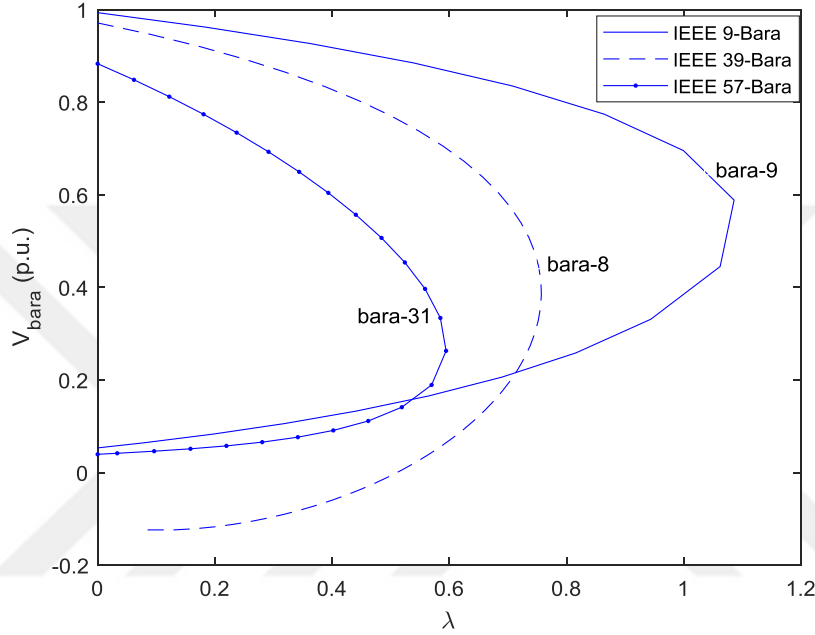


Şekil 4.23. IEEE 9-bara sistemi YSA eğitim veri seti.



Şekil 4. 24. IEEE 9-bara sistemi YSA eğitim regresyon profili.

İlk olarak, güç güvenliği ve gerilim kararlılığı sorunlarına neden olabilecek en zayıf baraları belirlemek için SGA uygulanarak test sistemleri analiz edilmiştir. Buna ait sonuçlar Şekil 4.25 ile verilmiştir. SGA sonuçları neticesinde en hassas baraların sırasıyla IEEE 9-bara, IEEE 39-bara ve IEEE 57-bara sistemleri için; bara-9, bara-8 ve bara-31 olduğu belirlenmiştir. Salınım barası ve SGA sonucunda elde edilen baraların yük gerilimi ve güç profilleri başlangıç ayarları için Tablo 4.5'te verilmiştir.



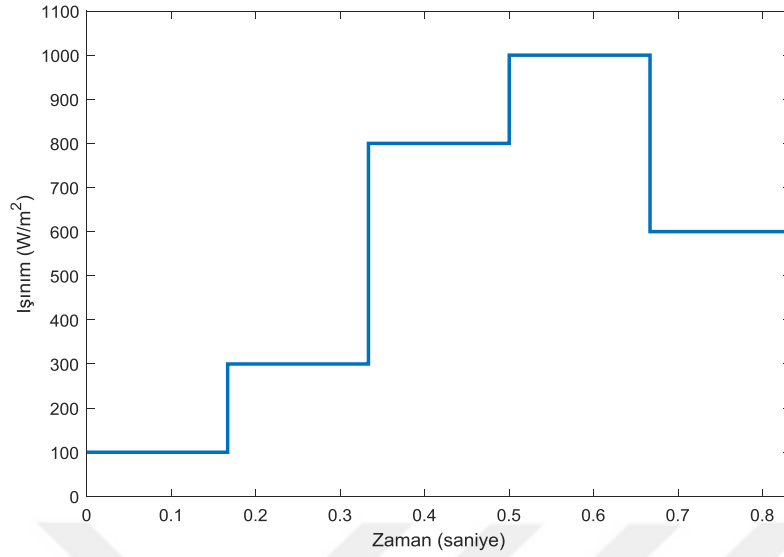
Şekil 4.25. IEEE-9, 39 ve 57 baralı test sistemleri için sürekli güç akışı sonuçları.

Tablo 4.5. Başlangıç parametreleri için gerilim ve güç profilleri.

Sistem	V_s (p.u.)	S_s (MVA)	$*V_{\text{bara}}$ (p.u.)	$*S_{\text{bara}}$ (MVA)	V_{dev} (p.u.)	P_{GT} (MW)	$P_{\text{kayıp}}$ (MW)
IEEE 9-bara	1.040	$71.64 + j27.04$	0.995	$125.0 + j50.0$	0.1168	319.64	4.641
IEEE 39-bara	0.982	$677.87 + j221.57$	0.997	$522.0 + j176.6$	0.8269	6297.87	43.611
IEEE 57-bara	1.040	$478.66 + j128.84$	0.935	$5.80 + j2.90$	1.2336	1278.66	27.864

V_s : Salınım barası gerilimi, S_s : Salınım barası gücü, $*S_{\text{bara}}$: SGA tarafından belirlenen bara

Yukarıda bahsedilen baralar, iki ana hedefi optimize etmek amacıyla YGDA bağlantılı PV sistemini kurmak için seçilmiştir. Bunlar bara gerilimi ve dinamik gerilim kararlılığının iyileştirmesidir. Tasarlanan sistemi başarılı bir şekilde simüle etmek için, PV tesisi için bir ışınlam şiddeti profili gerekmektedir ve oluşturulan profil Şekil 4.26'te gösterilmiştir. PV tesisinden ışınlam profiline karşılık gelen biçimde sağlanabilecek maksimum güç Tablo 4.6'da (42) ve (43) kullanılarak verilmiştir.



Şekil 4.26. PV sistem için ışınım karakteristiği.

Tablo 4.6. Başlangıç parametrelerine göre PV sistemden çekilebilecek maksimum güç değerleri.

Sistem		Işınım (W/m ²)				
		100	300	800	1000	600
Güç (MW)	IEEE 9-bara	3.35	20.38	62.95	79.95	45.92
	IEEE 39-bara	3.20	20.27	62.93	79.98	45.86
	IEEE 57-bara	5.94	21.34	61.95	77.95	45.95

4.4.1. IEEE 9-Bara Test Sistemi

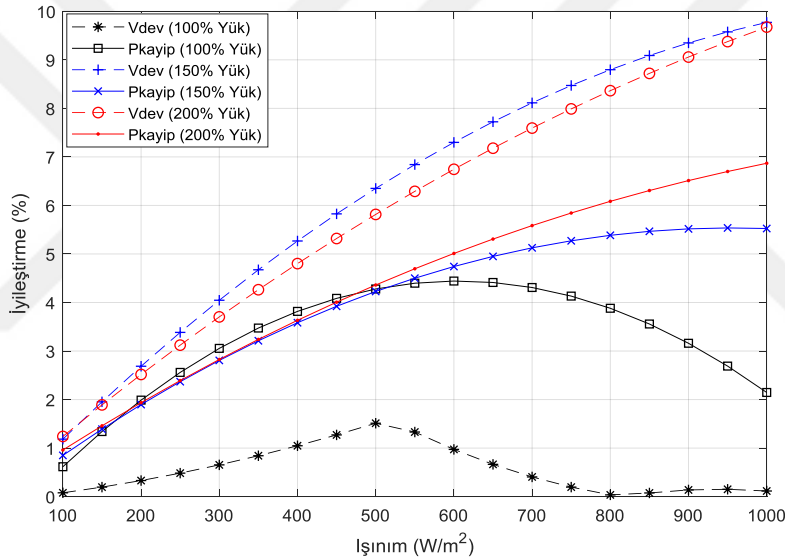
4.4.1.1. IEEE 9-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı

Başlangıç parametrelerinin %100, %150 ve %200 yüklenmesi için; sisteminin 9 numaralı barası herhangi bir dönüştürücü kontrol stratejisi dâhil edilmeden PV tesisi ile birbirine bağlanır. Tipik güç akış sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, özellikle artan yükleme faktörünün olması durumunda, PV tesisinin dâhil edilmesinin bara gerilimini verimli bir şekilde iyileştirdiği görülmektedir. Yük barası gerilimleri, %100 yükleme için sınır koşullarını sağlarken, daha yüksek yükleme faktörleri için limitler dışında olabilmektedir. Maksimum bara gerilimi iyileştirmesi, istenen değere en yakın 1 p.u. olan bara gerilimi ve ilk bara gerilimi kullanılarak yüzde cinsinden hesaplanarak verilmiştir.

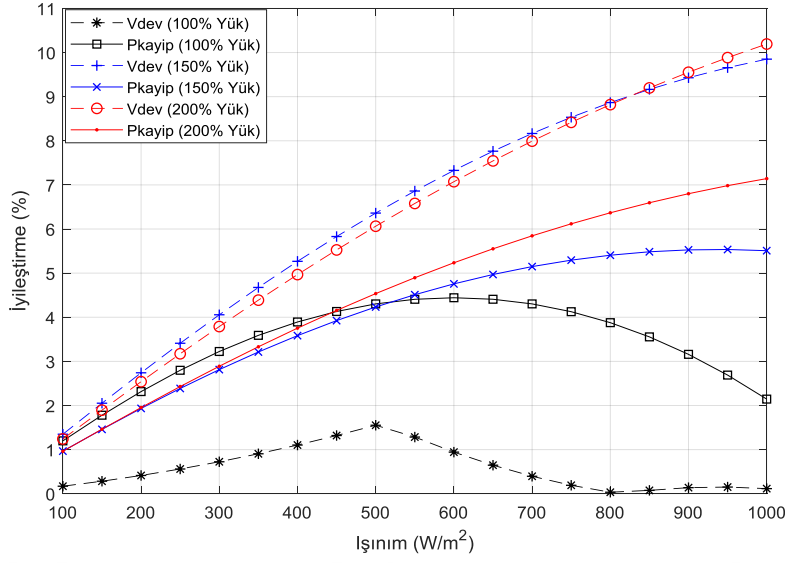
Tablo 4.7. IEEE 9-bara sistemi klasik güç akışı sonuçları.

Yükleme	$V_{\text{bara-9 init}}$	Işınım (W/m ²)										Maksimum
		100		300		800		1000		600		Bara
												Gerilimi
		P _{PV}	V _{bara-9}	P _{PV}	V _{bara-9}	P _{PV}	V _{bara-9}	P _{PV}	V _{bara-9}	P _{PV}	V _{bara-9}	İyileştirme (%)
100%	0.9956	3.27	0.9961	20.20	0.9981	62.84	1.0019	79.89	1.0029	45.74	1.0006	0.73
150%	0.9389	5.82	0.9400	21.88	0.9429	62.40	0.9485	78.71	0.9502	46.14	0.9465	1.20
200%	0.8611	6.68	0.8632	21.52	0.8675	59.13	0.8763	74.33	0.8791	44.01	0.8731	2.09

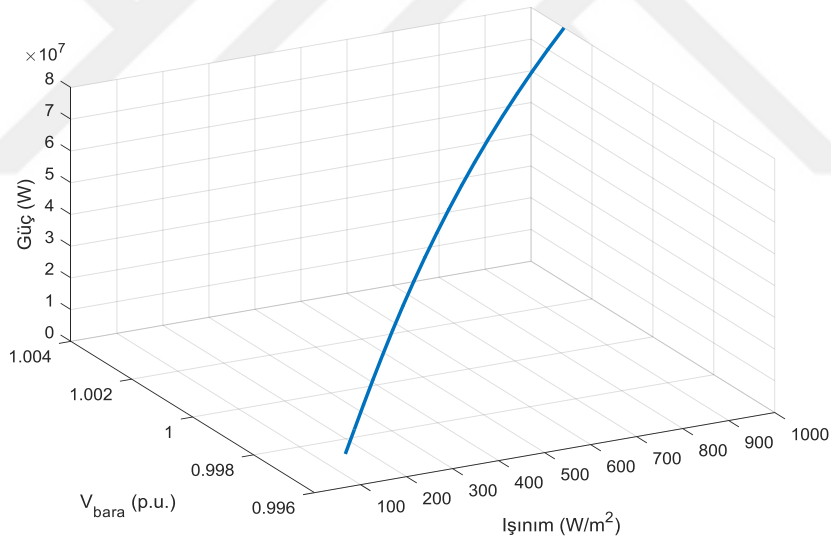
Ayrıca, PV tesisinin başlangıç değerlerine göre uygulanmasıyla toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybının iyileştirilmesi Şekil 4.27 ile gösterilmektedir. Sistem yükü arttıkça, PV tesisinin aktif güç desteği sadece bağlı değil bara için değil tüm sistemin çalışması ve enerji kalitesi açısından olumlu etki etmektedir.

**Şekil 4.27.** IEEE 9-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirilmesi.

Bara gerilimi kısıtlamaları nedeniyle, maksimum PV gücü YGAA sistemi tarafından absorbe edilemeyebilir. PV santralinden maksimum gücü çekmek amacıyla AYD oranı GGA kullanılarak ayarlanır. GGA uygulanarak, yinelemeli yaklaşımla uç gerilim büyüklüklerinin gönderilmesi ve alınması hatası azaltılır. Toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirilmesi, özellikle %200 yükleme için birim dönüştürme oranının sonuçlarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Her iki yöntemde de, %100 yüklemede sistemin toplam gerilim sapması, sadece PV tesisinden maksimum gücü absorbe etme amacı ile çalıştığı için 500 W/m^2 'nin üzerindeki ışınlam değerlerinde kayda değer oranda iyileştirilmez. PV ışınlamına göre bara gerilim büyüklüğü ve %100 yükleme gücü Şekil 4.29'de verilmiştir.



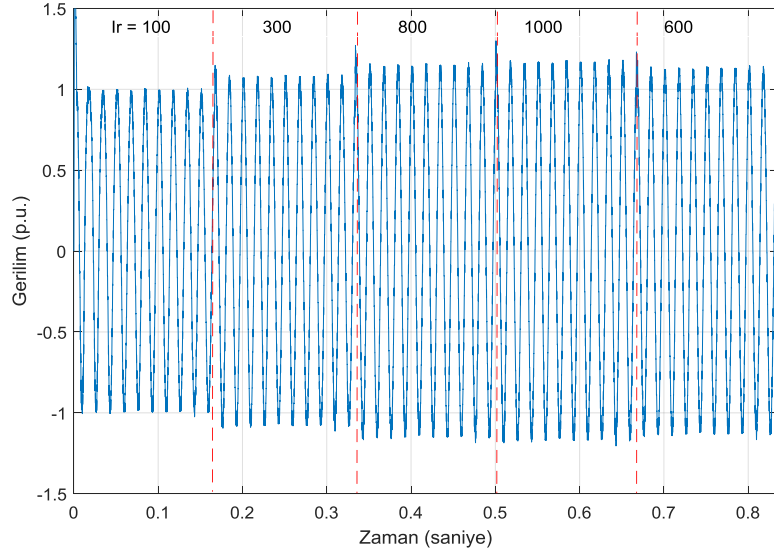
Şekil 4.28. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 9-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.



Şekil 4.29. IEEE-9 baralı sistem bara-9'un PV ışınlam ve güç değerine bağlı olarak gerilim profili.

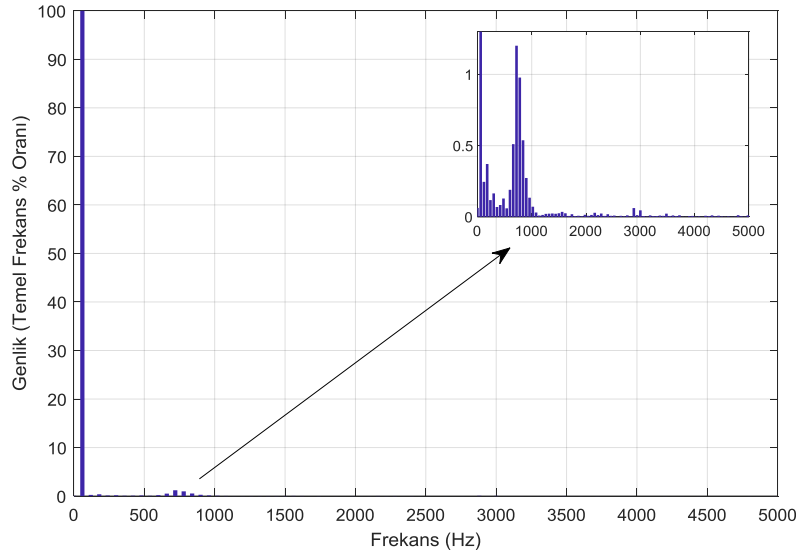
4.4.1.2. IEEE 9-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi

Bu bölümde, YGDA ve YGAA ara bağlantısının geçici kararlılığı incelenmiştir. $t = 0$ anında sistemler birbirine bağlanmış durumdadır; %100 yüklemede ışınlam profiline ilişkin bara-9'un gerilim profili Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Gerilim karakteristiği, (54) 'da verilen çok amaçlı ceza fonksiyonuna göre YSA tarafından belirlenen dönüştürücü kontrol parametreleri kullanılarak elde edilir.



Şekil 4.30. IEEE-9 baralı sistem bara-9'un PV ışınlımına bağlı dinamik gerilim profili.

Sinyalin frekans tepkisi ise Şekil 4.31 ile gösterilmektedir. Çıkış sinyali, AYD ve MÇSD dönüştürücülerinin istenen koşullarda çalıştığını gösteren temel sinyalin %1.5'inden fazla olmayan 0.72 kHz'e yakın bir bileşene sahiptir. Yükleme faktörlerine göre Vref ve P-I kontrol parametreleri Tablo 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.31. IEEE-9 baralı sistemin dinamik kontrol sonucundaki frekans tepkisi.

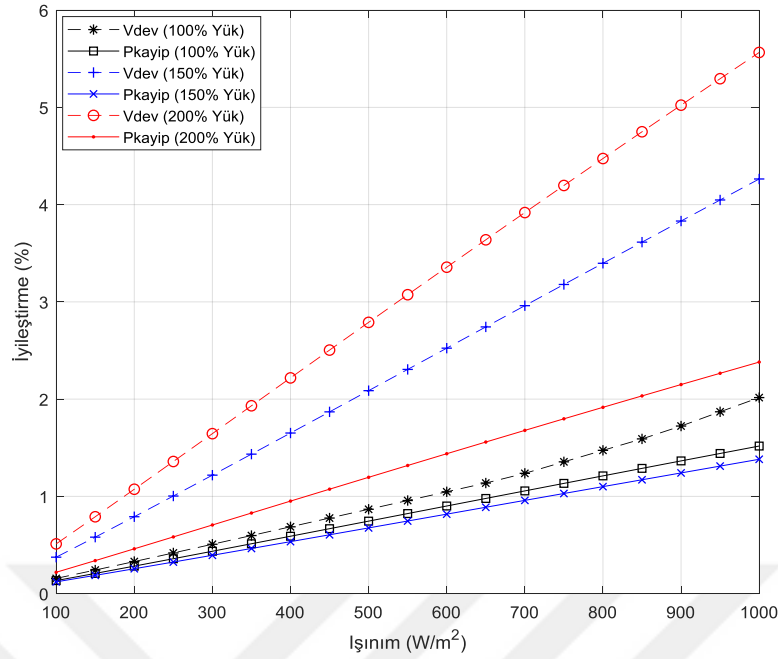
Tablo 4.8. IEEE 9-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.

Parametre		Yükleme			
		100%	150%	200%	
Işınım (W/m ²)	100	V _{ref} (p.u.)	0.9965	0.9401	0.8632
		PI _P	0.68	0.53	0.56
		PI _I	80.01	82.62	82.22
		F _{obj}	280.89	253.51	218.63
	300	V _{ref} (p.u.)	0.9983	0.9429	0.8676
		PI _P	0.52	0.53	0.57
		PI _I	79.97	81.09	81.80
		F _{obj}	157.73	184.27	187.50
	800	V _{ref} (p.u.)	1.0015	0.9486	0.8772
		PI _P	0.55	0.58	0.53
		PI _I	79.91	82.65	82.63
		F _{obj}	149.95	117.83	111.67
	1000	V _{ref} (p.u.)	1.0029	0.9503	0.8803
		PI _P	0.58	0.51	0.56
		PI _I	72.30	79.12	86.51
		F _{obj}	144.10	106.18	109.33
600	V _{ref} (p.u.)	1.0007	0.9465	0.8737	
	PI _P	0.52	0.53	0.58	
	PI _I	79.80	81.13	78.24	
	F _{obj}	198.27	152.66	143.40	

4.4.2. IEEE 39-Bara Test Sistemi

4.4.2.1. IEEE 39-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı

Bu durumda, IEEE 39-bara test sistemi, kararlı durum ve geçici kararlılığı optimize etmek amacıyla çeşitli yükleme faktörleri için test edilmiştir. SGA tarafından belirlendiği üzere, test sisteminin 8 numaralı barası, PV tesis bağlantısı için kullanılmaktadır. PV tesisinden verimli bir şekilde yararlanmak için, çeşitli referans gerilim büyüklükleri için GGA ve YSA kullanılarak kontrol parametreleri ayarlanır. Başlangıç durumuna göre toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi Şekil 4.32'de gösterilmektedir.



Şekil 4.32. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 39-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.

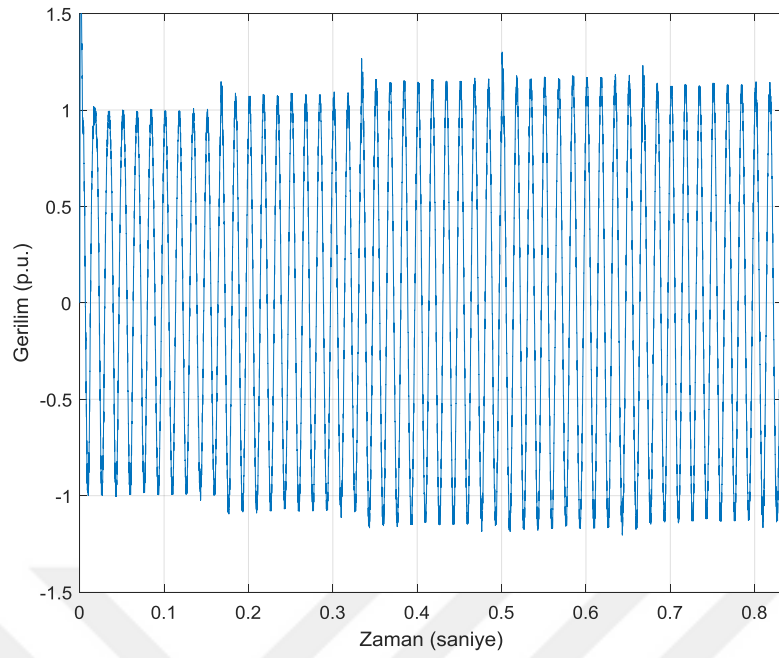
GGA sonuçları Tablo 4.9'da verilmiştir. PV tesisin YGAA sisteme bağlanmasındaki bara gerilimini verimli bir şekilde iyileştirdiği görülebilir.

Tablo 4.9. IEEE 39-bara sistemi genişletilmiş güç akışı sonuçları.

Yükleme	$V_{\text{bara-8}}$	Işınım (W/m^2)										Maksimum
		100		300		800		1000		600		Bara
												Gerilimi
		P_{PV}	$V_{\text{bara-8}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-8}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-8}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-8}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-8}}$	İyileştirme (%)
100%	0.9979	3.12	0.9981	20.18	0.9986	62.88	0.9998	79.99	1.0030	45.79	0.9993	0.51
150%	0.9300	6.04	0.9305	21.96	0.9314	61.91	0.9339	77.95	0.9349	45.90	0.9329	0.52
200%	0.7998	6.56	0.8011	20.33	0.8041	55.21	0.8114	69.34	0.8143	41.19	0.8085	1.82

4.4.2.2. IEEE 39-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi

Sistemlerin bağlandığı, $t = 0$, anından itibaren %100 yüklemede ışınlam profili için bara-8'in gerilim profili Şekil 4.33 ile gösterilmiştir. Gerilim karakteristiği, (54) ile verilen çok amaçlı ceza fonksiyonuna göre YSA tarafından belirlenen dönüştürücü kontrol parametreleri kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.33. IEEE-39 baralı sistem bara-8'in PV ışınımına bağlı dinamik gerilim profili.

Tablo 4.10'da verilen yükleme faktörleri ve referans gerilimlere göre Şekil 3.9'da verilen prosedür kullanılarak elde edilen P - I kontrol parametrelerini ve amaç fonksiyon değerini göstermektedir.

Tablo 4.10. IEEE 39-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.

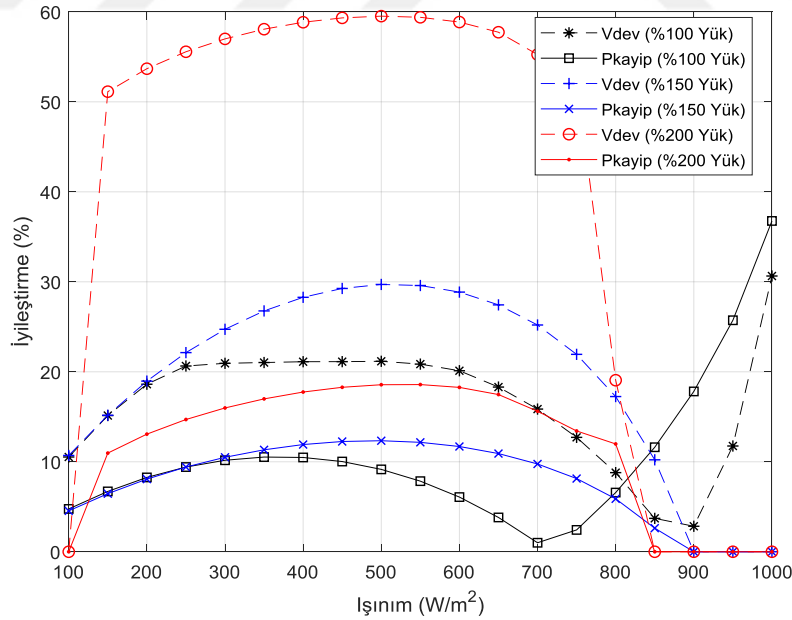
Parametre		Yükleme			
		100%	150%	200%	
Işınım (W/m ²)	100	PI _P	0.43	0.45	0.61
		PI _I	87.15	83.51	79.32
		F _{obj}	286.50	229.71	213.63
	300	PI _P	0.56	0.51	0.59
		PI _I	82.30	80.33	73.84
		F _{obj}	139.61	130.25	143.94
	800	PI _P	0.51	0.57	0.59
		PI _I	86.23	86.12	78.33
		F _{obj}	161.98	119.90	158.35
	1000	PI _P	0.47	0.43	0.58
		PI _I	82.15	80.96	80.21
		F _{obj}	178.39	110.32	142.73

	PI_P	0.49	0.49	0.53
600	PI_I	79.53	81.93	81.39
	F_{obj}	141.30	103.59	146.11

4.4.3. IEEE 57-Bara Test Sistemi

4.4.3.1. IEEE 57-Bara Test Sistemi Genişletilmiş Güç Akışı

IEEE 57-bus sistemini kararlı durum ve geçici kararlılık açısından optimize etmek amacıyla, sistem GGA ve YSA yaklaşımı kullanılarak yüklenmiş ve çözülmüştür. Test sisteminin SGA tarafından belirlenen 31-numaralı barası YGDA ara bağlantısı için kullanılmaktadır. Başlangıç durumuna göre toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileşmesi Şekil 4.34'te gösterilirken, bara gerilimi ve yüke ve ışıınıma göre PV gücü Tablo 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, PV gücünün %100 ve %150 yükleme için bara gerilimini desteklediği ve toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybını iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, %200 yükleme altında, sistemin başlangıç parametreleri için yakınsamadığı, ancak YGDA üzerinden PV tesisinn sisteme entegre edilmesi neticesinde sistem arızasını önleyerek operasyonu iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 4.34. Genişletilmiş güç akışı kullanıldığı durumda IEEE 57-bara sistemi için toplam gerilim sapması ve aktif güç kaybı iyileştirmesi.

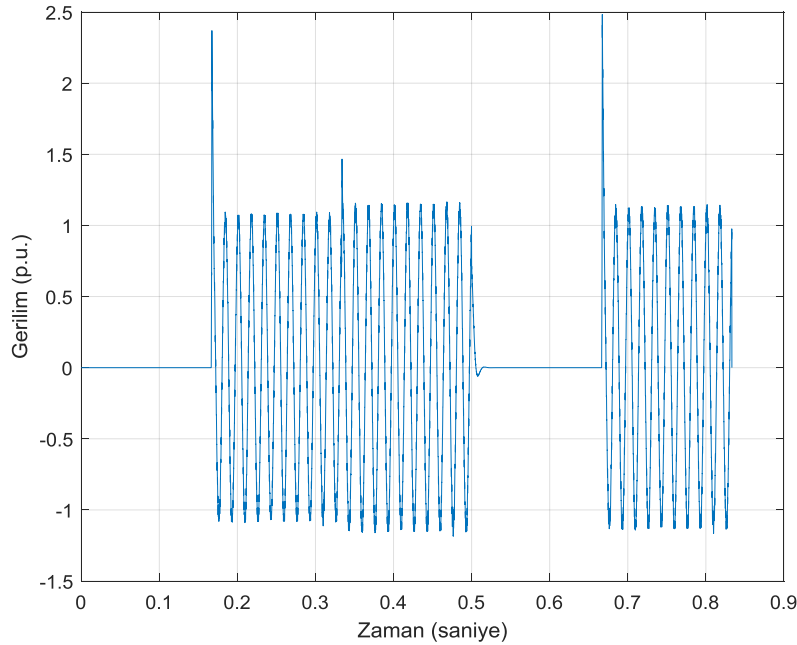
Tablo 4.11. IEEE 57-bara sistemi genişletilmiş güç akışı sonuçları.

Yükleme	$V_{\text{bara-31}}$	Işınım (W/m ²)										Maksimum
		100		300		800		1000		600		Bara
												Gerilimi
		P_{PV}	$V_{\text{bara-31}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-31}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-31}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-31}}$	P_{PV}	$V_{\text{bara-31}}$	İyileştirme (%)
100%	0.9359	6.69	0.9665	21.97	1.0153	63.00	1.0386	79.89	0.9678	46.29	1.0485	12.84
150%	0.7838	7.18	0.8320	22.20	0.9015	63.83	0.9180	78.71	0.9183	46.83	0.9421	20.19
200%	NC*	NC*	NC*	19.51	0.7675	53.94	0.7918	NC*	NC*	39.94	0.7823	-

*Genişletilmiş güç akışı yakınsamamaktadır.

4.4.3.2. IEEE 57-Bara Test Sistemi Dinamik Kararlılığın İyileştirmesi

PV üretim sistemi bara-31 kullanılarak YGDA sisteme bağlanmıştır ve %200 yük altındaki ışınlam profiline ilişkin bara gerilimi Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere 100 ve 1000 W/m^2 ışınlam değerleri için sistem yakınsamamaktadır. Yakınsamayan sistemdeki olağan zaman akışı içinde simülasyonda ışınlam 300 W/m^2 ve 600 W/m^2 olarak belirlendiği durumda, dönüştürücüler sırasıyla $t = 1.66\text{s}$ ve $t = 6.64\text{s}$ anında sistemi desteklemeye başlar. Yükleme neticesinde, $P-I$ kontrol parametreleri ve hibrit YSA yaklaşımı kullanılarak elde edilen amaç fonksiyon değerleri Tablo 4.12'de verilmiştir.

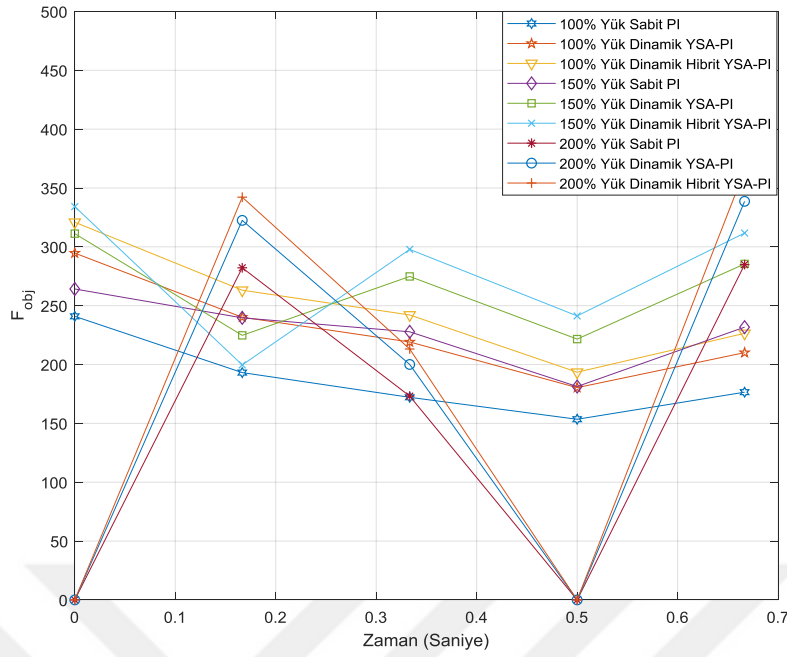
**Şekil 4.35.** IEEE-57 baralı sistem bara-31'in PV ışınlamına bağlı dinamik gerilim profili.

Tablo 4.12. IEEE 57-bara sistemi dinamik kararlılık iyileştirme sonuçları.

Parametre			Yükleme		
			100%	150%	200%
Işınım (W/m ²)	100	PI _P	0.86	0.81	0.90
		PI _I	81.22	76.94	90
		F _{obj}	240.93	264.19	-
	300	PI _P	0.83	0.81	0.79
		PI _I	79.41	76.80	79.55
		F _{obj}	193.15	239.66	282.19
	800	PI _P	0.83	0.79	0.73
		PI _I	78.29	78.13	82.53
		F _{obj}	172.14	227.81	173.18
	1000	PI _P	0.82	0.82	0.90
		PI _I	80.15	82.62	90
		F _{obj}	153.49	181.30	-
600	PI _P	0.78	0.80	0.78	
	PI _I	78.38	80.85	83.70	
	F _{obj}	176.50	231.73	284.92	

4.4.4. Test Sistemleri İçin Dinamik Kararlılık İyileştirmesi

Önerilen yöntemin etkinliğini ve optimalliğini göstermek için IEEE 57-bara sistemi, sırasıyla 0.67 ve 87.11 olan başlangıç P ve I değerleri kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca, farklı yüklem durumları için, rastgele eğitilmiş YSA-PI ve hibrit eğitilmiş YSA-PI kontrol yöntemleri, sabit PI kontrol yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Hibrit YSA-PI yöntemi, amaç fonksiyonunun bileşenlerini düşürerek ve optimize ederek daha iyi sonuçlar elde etmektedir. IEEE 57-bara sisteminde sabit ve dinamik PI kontrolü için simülasyon sonuçları Şekil 4.36'da verilmiştir. Ziegler-Nichols yöntemi ile belirlenen başlangıç değerleri yerine dinamik PI kontrolör katsayılarının kullanılması; IEEE 57-baralı test sisteminin %100, %150 ve %200 yüklemesi için F_{obj} iyileştirmeleri Tablo 4.13'te verilmiştir. Hibrit eğitilmiş YSA-PI kontrol yaklaşımının, sabit ve rastgele eğitilmiş YSA'ya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.36. Farklı kontrol yöntemlerine göre F_{obj} amaç fonksiyonu değerleri.

Tablo 4.13. IEEE 57-bara sistemi YSA kullanılarak dinamik kontrol iyileştirme sonuçları.

Kontrol Yaklaşımı		Yükleme	Işınım (W/m^2)					Ortalama İyileştirme (%)
			100	300	800	1000	600	
İyileştirme (%)	Rastgele Eğitimli ANN-PI	100%	22.30	24.34	27.32	17.50	19.03	22.10
		150%	17.80	-	20.64	22.23	23.19	16.77
		200%	-	14.28	15.51	-	18.64	16.22
	Hibrit Eğitimli ANN-PI	100%	33.20	36.24	40.66	26.06	28.32	32.89
		150%	26.49	-	30.72	33.09	34.52	24.96
		200%	-	21.26	23.09	-	28.07	24.14

4.4.5. SVC ve STATCOM Kullanarak Sistemlerin Gerilim Kararlılığının İyileştirilmesi

Bu bölümde IEEE-9, 39 ve 57 baralı sistemlerin gerilim kararlılığını iyileştirebilmek için seçilen kritik baralara SVC ve STATCOM cihazları eklenmiştir. Bahse konu iki cihazın karakteristiklerinin gerçeğe en yakın biçimde simüle edilebilmesi amacıyla Eşitlik (29) ve (31)'de verilen ifadeler için sınır koşulları ve basamak tepkileri aşağıdaki (68) ve (69) gibi düzenlenmiştir. Önerilen bu yöntemle SVC ve STATCOM cihazlarının GGA'ya eklenebilmesi için cihazlar (68) ve (69) kullanılarak sisteme dâhil edilmiştir. Burada özellikle STATCOM cihazının gerilim-reaktif güç karakteristiği SVC cihazına göre daha kararlı; SVC'nin gerilim-reaktif güç

karakteristiğinin ise daha doğrusal olduğu söylenebilir. Bununla birlikte cihazlardan sisteme etkiyecebilecek maksimum reaktif güç 10 MVAR olarak kabul edilmiştir.

$$Q_{STATCOM_max} = Q_{maks} V_{bara}, 0 < V_{bara} < 0.25 \quad Q_{STATCOM_max} = Q_{maks}, 0.25 < V_{bara} \quad (68)$$

$$Q_{SVC_max} = Q_{maks} V_{bara}, V_{bara} < 0.9 \quad Q_{SVC_max} = Q_{maks}, 0.9 < V_{bara} < 1 \quad (69)$$

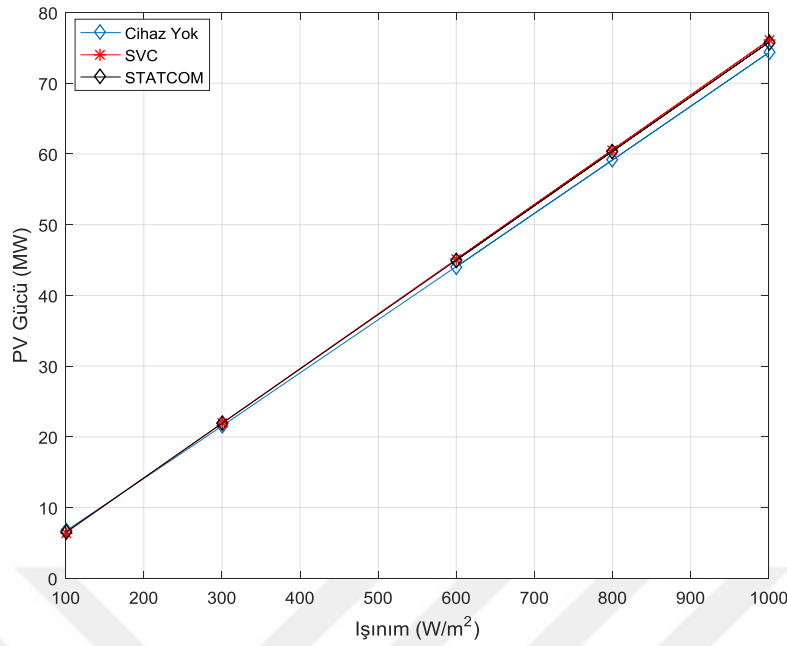
4.4.5.1. Test Sistemlerine Reaktif Güç Desteğinin Sağlanması

Test sistemlerinin sırasıyla 9, 8 ve 31 numaralı baralarına SVC ve STATCOM cihazları ayrı ayrı eklenerek %200 yükleme durumları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Verilen tablodaki sonuçlar incelenirse reaktif güç desteği olmayan sisteme nazaran kabul edilebilir oranda iyileştirilebildiği görülebilir. Bununla birlikte STATCOM cihazının hassasiyeti özellikle sistemin aşırı yüklendiği durumlarda hem sistemin gerilim kararlılığını iyileştirmekte hem de PV sistemden alınan aktif gücün artışına destek olmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14. IEEE test sistemlerine SVC ve STATCOM cihazlarının performans etkisi.

Cihaz	Sistem	Işınım (W/m ²)									
		100		300		800		1000		600	
		P _{PV}	V _{bara}	P _{PV}	V _{bara}	P _{PV}	V _{bara}	P _{PV}	V _{bara}	P _{PV}	V _{bara}
Cihaz Yok	IEEE-9	6.68	0.8632	21.52	0.8675	59.13	0.8763	74.33	0.8791	44.01	0.8731
	IEEE-39	6.56	0.8011	20.33	0.8041	55.21	0.8114	69.34	0.8143	41.19	0.8085
	IEEE-57	NC	NC	19.51	0.7675	53.94	0.7918	NC	NC	39.94	0.7823
	IEEE-9	6.44	0.9042	21.92	0.8969	60.38	0.9418	76.08	0.9014	45.13	0.9213
SVC	IEEE-39	6.67	0.8355	20.97	0.8267	56.72	0.8373	71.02	0.8403	41.91	0.8315
	IEEE-57	NC	NC	20.91	0.8324	57.26	0.8442	NC	NC	42.51	0.8375
	IEEE-9	6.49	0.8997	21.89	0.9340	60.60	0.9521	75.78	0.9165	44.98	0.9100
STATCOM	IEEE-39	6.65	0.8241	20.99	0.8271	57.01	0.8384	70.11	0.8373	42.42	0.8407
	IEEE-57	NC	NC	20.49	0.8112	58.90	0.8722	NC	NC	43.20	0.8533

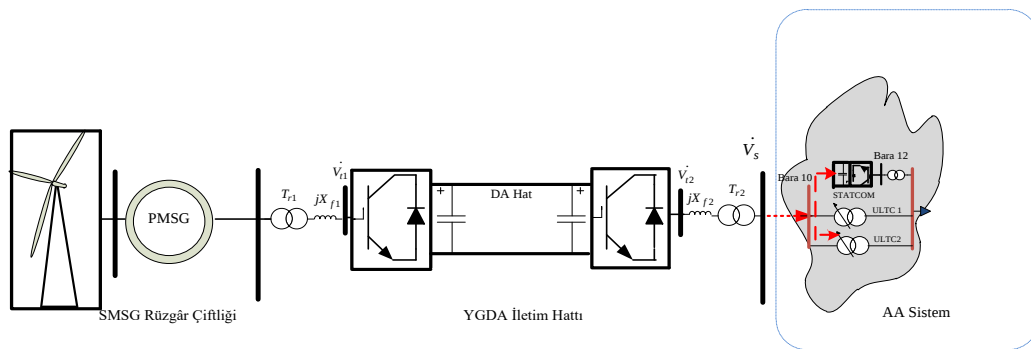
Tabloda verilen değerler incelendiğinde, tüm sistemler için STATCOM cihazının daha iyi sonuç verdiği fakat bununla birlikte her iki cihazın da özellikle düşük bara gerilimi ve düşük PV ışınlam durumunda yenilenebilir sistemin ışınlam karakteristiği sebebiyle absorbe edilebilen aktif gücü olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Fakat yüksek ışınlam seviyelerinde ise reaktif güç desteği ile bara gerilimine katkıda bulunduğu dolayısıyla PV sistemden çekilebilen aktif gücü iyileştirdiği belirlenmiştir. IEEE 9-baralı sistem için PV sistemden çekilen aktif gücün ışınlama göre grafiği Şekil 4.37 ile verilmiştir.



Şekil 4.37. IEEE 9-Baralı sisteme reaktif güç destekleme cihazları eklenmesi durumundaki maksimum PV güç performansı.

4.5. SMSG-YGDA İçeren Rüzgâr Çiftliği Sisteminin Gerilim Seviyesinin İyileştirilmesi

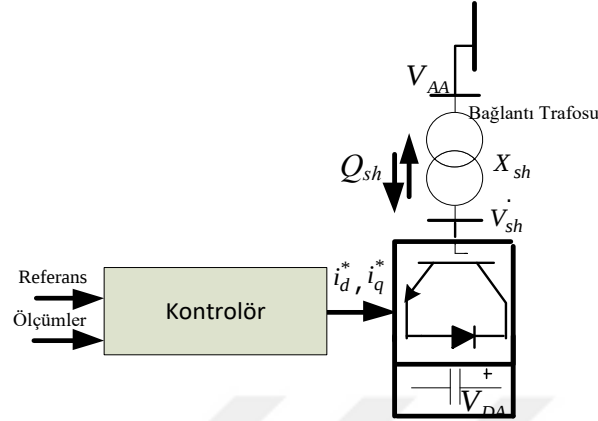
Bo bölümde IEEE 39-Bara sistemindeki reaktif güç değişimine karşın en hassas bara üzerinde rüzgâr enerji sisteminin entegrasyonu ve reaktif güç kontrolü ile gerilim kararlılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada DlgSilent Matpower Yazılımı kullanılmış ve sistem reaktif güç açısından kontrol edilerek gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Kullanılan güç sisteminin şematik diyagramı Şekil 4.38 ile verilmiştir.



Şekil 4.38. SMSG tabanlı rüzgâr çiftliğinin ve bağlantılı şebekenin bağlantı şeması.

Bu çalışmada daha az reaktif güç talebi nedeniyle ÇBAG yerine SMSG tabanlı rüzgâr türbini tercih edilmiştir. SMSG tabanlı rüzgâr çiftliğinde kendinden uyarma özelliği, düşük uyarma ve yüksek tork yoğunluğu kayıpları ile daha fazla reaktif güç sağlar. SMSG'nin, DGM tabanlı GKD aracılığı ile IEEE 39-baralı test sistemine bağlantısı sağlanmıştır. Bununla birlikte,

reaktif gücü desteklemek amacıyla bir STATCOM cihazı da sistemden seçilen reaktif güç değişimine karşın en hassas baraya bağlanmak için seçilmiştir. STATCOM kontrolörünün blok diyagramı Şekil 4.39 ile verilmiştir.

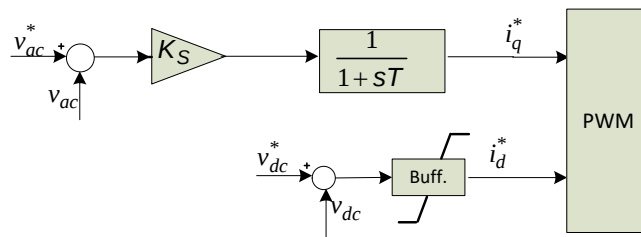


Şekil 4.39. STATCOM bağlanılan yük barasının blok diyagramı.

STATCOM kontrolörünün detaylı şematiği ise Şekil 4.40'ta verilmiştir. STATCOM'un anlık üç fazlı parametreleri, Park dönüşümünü [94] kullanılarak dq bileşenleri ile durum uzayı biçiminde tanımlanabilir. STATCOM tarafından elektrik sistemine enjekte edilen aktif ve reaktif güçler aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (70)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (71)$$



Şekil 4.40. STATCOM kontrolörünün detaylı şematiği.

4.5.1. IEEE 39-Baralı Sistem Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, STATCOM için en iyi konumu belirlemek amacıyla reaktif güçteki değişime hangi veri yolunun en duyarlı olduğunu belirlemek için güç sistemine uygulanmıştır. Şönt kompanzasyonu, gerilim kararlılığını iyileştirmede etkilidir ve en iyi verimi elde etmek için STATCOM cihazlarının konumunu belirlemek için V-Q hassasiyet analizi gerekir. (28) ile verilen

Jacobian matrisindeki değerleri kullanarak indirgenmiş Jacobian matrisi (J_R) oluşturulur ve bu matrisin tersindeki en yüksek değer en duyarlı güç barasını işaret etmektedir. Duyarlılık analizindeki en duyarlı 10 baraya ait değerler Tablo 4.15 ile verilmiştir.

$$J_R = [J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2] \quad (72)$$

Tablo 4.15. IEEE 39-bara sisteminin duyarlılık analizi sonuçları.

Sıra	Bus no	J_R	J^{-1}_R
1	12	44.7941	0.0330
2	28	90.7959	0.0215
3	27	129.6402	0.0175
4	9	68.9053	0.0169
5	1	66.5807	0.0161
6	26	141.4650	0.0156
7	7	328.4265	0.0146
8	8	328.4625	0.0146
9	15	153.3162	0.0138
10	18	203.1263	0.0135

4.5.2. IEEE 39-Baralı Sistem Gerilim Kararlılığı İyileştirilmesi

IEEE 39-baralı test sistemi üç bölgeden oluşmaktadır. Rüzgâr gücü, bir AA bağlantısı aracılığıyla sistemin en hassas AA barasına bağlanır. 650 MW nominal jeneratör gücü, gerilim kararlılığı açısından en duyarlı olan bara-12'ye en yakın olanıdır. Bir YGAA aracılığıyla, AA sistemine enjekte edilen aktif gücün, sırasıyla generatörün nominal gücünün %100'ü ve %50'si olan 650 MW ve 325 MW olmak üzere iki farklı değerde olduğu varsayılmıştır. Bununla birlikte kritik baraya STATCOM cihazı entegre edilerek gerilimi 1.0 p.u seviyesinde tutulmaya çalışılır.

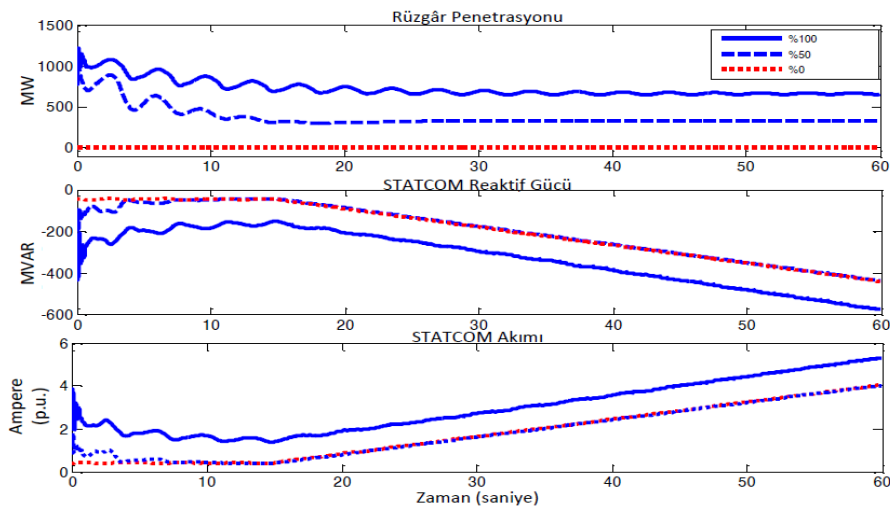
Test sisteminin 12 numaralı barası için üç farklı rüzgar enerjisi penetrasyon seviyesinde P-V eğrileri elde edilmiştir. Bu barada aktif ve reaktif güç yükleri, simülasyonun 60 saniyesine kadar başlangıç yükünün %5'i oranında artacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.41 rüzgâr türbininin nüfuz ettiği aktif güç seviyelerini gösterir. Penetrasyon seviyeleri, zayıf alandaki jeneratörünün nominal gücünün %0, %50 ve %100'ü olan 0 MW, 325 MW ve 650 MW'tır. Ayrıca her penetrasyon seviyesi için 12 nolu baradan STATCOM tarafından enjekte edilen reaktif gücü göstermektedir. STATCOM tarafından enjekte edilen reaktif gücün, penetrasyon seviyesi ve maksimum penetrasyon seviyesi ile birlikte sistem gerilim kararlılığını iyileştirecek

şekilde önemli ölçüde arttığı açıkça görülmektedir. Bu çalışmaya ait sonuçlar Tablo 4.16'de verilmiştir.

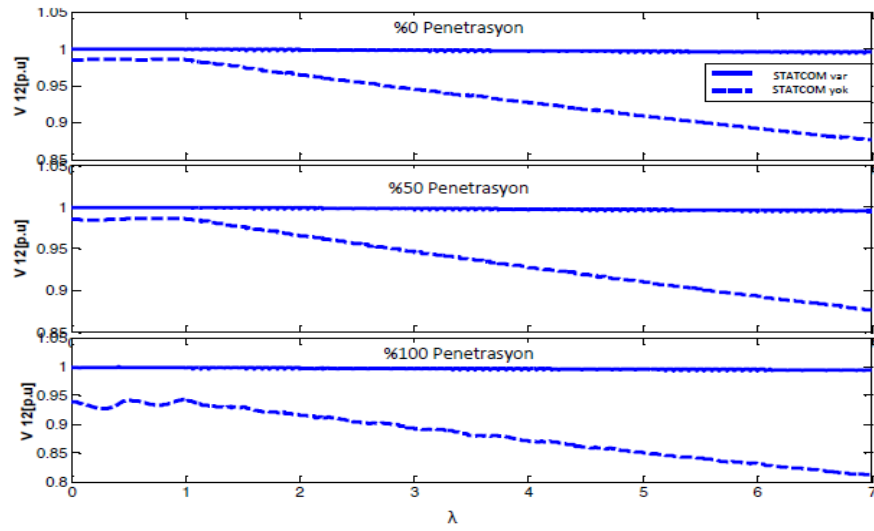
Tablo 4.16. MSG rüzgâr çiftliği sistemi ve STATCOM eklenen baranın gerilim seviyesinin iyileştirilmesi.

Penetrasyon Seviyesi	Cihaz	V_{12} (p.u)	$I_{STATCOM}$ (p.u)	$Q_{STATCOM}$ (MVAR)	Gerilim İyileştirme Oranı (%)
0%	STATCOM	0.9955	4.0047	436.3	13.6
	Yok	0.8763	0	0	
50%	STATCOM	0.9956	4.016	439.6	13.5
	Yok	0.877	0	0	
100%	STATCOM	0.9941	5.291	573.9	22.32
	Yok	0.8127	0	0	

Şekil 4.41 ve 4.42'den anlaşılabacağı üzere penetrasyon seviyesi arttıkça sinyalin yerleşme zamanı artmaktadır ve reaktif gücün etkisine daha yüksek oranda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda rüzgâr çiftliği sistemi tıpkı bir aktif enjekte güç gibi karakteristik göstermekte ve STATCOM'un sağladığı reaktif güç de sisteme eklenince klasik bir generatör barası gibi hem aktif hem de reaktif gücü sağlayabilmektedir.



Şekil 4.41. Farklı penetrasyon seviyeleri için STATCOM reaktif güç ve akım değerleri.



Şekil 4.42. Farklı penetrasyon seviyeleri için 12 numaralı baranın gerilimi.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tezde, YGDA ve YGAA ara bağlantısı için optimum ve dinamik dönüştürücü kontrolü için geliştirilmiş bir yöntem önerilmiş ve sunulmuştur. Öncelikle modüler çok seviyeli DA-AA dönüştürücünün çıkış sinyal karakteristiğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar çeşitli kistaslar için gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra rüzgâr çiftliği ve PV enerji üretim sistem entegre edilen alternatif akım ve doğru akım sistemlerinin gerilim kararlılığının iyileştirilmesi, sistem parametrelerinin optimizasyonu ve yenilenebilir enerji santrallerinden maksimum seviyede enerji elde edebilmek için statik ve dinamik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

DSA eğitilmiş hibrit YSA-PI denetleyicisi, kararlı durum yük akışı sorununu çözmek ve en çok kullanılan test sistemlerinin dinamik kararlılığını optimize etmek için IEEE 9-bara, IEEE 39-bara ve IEEE 57-bara sistemleri başarıyla kullanılmıştır. Bir YGDA bağlantısı üzerinden PV tesisinin entegrasyonu, güç sistemleri için kalite göstergeleri olarak kabul edilen toplam gerilim saptması ve aktif güç kaybı gibi güç sistemi parametreleri iyileştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, AYD ve MÇSD çıkış sinyalleri için hibrit YSA-PI kontrolü kullanılarak kabul edilebilir bir işlem süresi ile optimum kontrol elde etmek olduğundan, gerilim ve güç kalitesi önemli ölçüde artırılmıştır. İyi eğitilmiş bir YSA-PI yaklaşımının, rastgele eğitilmiş YSA veya statik kontrol yaklaşımlarına göre kontrol performansı için hızlı ve kabul edilebilir bir yanıt verdiği sonucuna varılabilir. Böylelikle hibrit eğitilmiş YSA'lar doğrusal olmayan, dışbükey olmayan ve büyük ölçekli sistem ara bağlantı problemlerinde ve güç sistemiyle ilgili dinamik kararlılık problemlerinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu çalışmada, yalnızca hibrit YSA-PI yaklaşımı değil, aynı zamanda PV beslemeli ve entegre güç sistemlerinde gerilim kararlılığını dinamik olarak geliştirmek için genişletilmiş yük akışı da kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemle IEEE 9-bara, IEEE 39-bara ve IEEE 57-bara güç sistemlerin kritik bara gerilimlerinin başlangıç değerlerine göre %16.22 ile %32.89 arasında iyileştirildiği gözlenmiştir.

Bununla birlikte rüzgâr çiftliği içeren güç sistemindeki farklı rüzgâr penetrasyon seviyeleri altında statik gerilim kararlılığı incelenmiştir. Rüzgâr penetrasyon seviyesi arttıkça, sistemdeki en kritik baranın gerilim kararlılık aralığı azalır ve bu durum güvenlik ve kararlılık nedenleriyle arzu edilmemektedir. Mevcut YGAA güç sistemi için elde edilen P-V eğrileri kullanılarak kritik baranın yüklenmesi artırılarak statik gerilim kararlılığı analizi yapılmıştır.

Sistemin gerilim kararlılığının iyileştirilmesi için SVC ve STATCOM cihazlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr çiftliği içeren sistemler için önerilen ve kullanılan STATCOM'un etkinliğini karşılaştırmak için farklı rüzgâr penetrasyon seviyelerinde gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları verilmiştir. Bu durumda sistemin en kritik bara gerilimi rüzgâr penetrasyonuna bağlı olarak %13.5 ile %22.3 arasında iyileştirilmiştir. Bu sonuçlar, STATCOM cihazını en kritik baraya kurmak için önerilen yöntemin, rüzgâr çiftlikleri yüksek

penetrasyon seviyesinde bile gerilim kararlılık aralığını etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermiştir. Önerilen yöntemin yeniliği, test sistemlerinin gerilim kararlılık aralığının arttığını gösteren karşılaştırmalı sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Bununla birlikte PV içeren güç sistemlerine entegre edilen reaktif güç kontrol cihazlarının da özellikle yüksek PV ışıınım altında durağan durum gerilim kararlılığını iyileştirebildiği gösterilmiştir. STATCOM ve SVC cihazlarının sisteme eklenmesi düşük PV ışıınım değerlerinde gerilim kararlılığını iyileştirmekte; yüksek PV ışıınım değerlerinde ise hem gerilim kararlılığı hem de PV sistemin maksimum güç noktasına mümkün olan en yakın durumda çalışmasına olanak sağlamaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Guilbert, D., Collura, S.M., Scipioni, A. (2017). DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 23966- 23985.
- [2] Renewable Energy Network for the 21st Century, (2019). *Renewables 2019: Global Status Report*, Paris: France, ISBN: 978-3-9818107-0-7.
- [3] Bozkurt, Y. T., Taspinar, N. (2017). Peak-to-average power ratio reduction in lifting based wavelet packet modulation systems using differential evolution algorithm. *Wireless Personal Communications*, 94(3), 1073-1086.
- [4] Enerji Çalışma Grubu (2020). *Enerji Görünümü 2020*. Ankara: TKSİB.
- [5] Kim, J., Kim, C. (2013). A DC-DC boost converter with variation-tolerant MPPT technique and efficient ZCS circuit for thermoelectric energy harvesting applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(8), 3827-3833.
- [6] Shire, T. W. (2009). *VSC-HVDC based network reinforcement*. Yüksek lisans tezi, Delft University of Technology, Delft.
- [7] Cole, S., Belmans, R. (2009). Transmission of bulk power. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3(3), 19-24.
- [8] Adapa, R. (2012). High-voltage HVDC technology: The state of the art. *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(6), 18-29.
- [9] Mitra, B., Chowdhury, B. (2018). HVDC Transmission for Access to Off-shore Renewable Energy: A Review of Technology and Fault Detection Techniques. *IET Renewable Power Generation*, 12(13), 1-9.
- [10] European Commission (2011). *Energy infrastructure priorities for 2020 and beyond – A blueprint for an integrated European energy network*. France.
- [11] ABB Group R&D and Technology (2014). *Special report: 60 years of HVDC, ABB review*. ABB Technology Ltd.
- [12] Serbia, N. (2014). *Modular multilevel converters for HVDC power stations*. Engineering Sciences, Ins. National Polytechnique de Toulouse, Doktora Tezi, Toulouse.
- [13] Raza, A., Dianguo, X., Yuchao, L., Xunwen, S. (2016). Coordinated Operation and control of VSC based multi-terminal high voltage DC transmission systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), 364-373.
- [14] Nami, A., Liang, J., Dijkhuizen, F., Lundberg, P. (2015). Analysis of modular multilevel converters with DC short circuit fault blocking capability in bipolar HVDC transmission systems. *Electric Power Energy Conference*, Geneva, Switzerland.
- [15] Ilves, K. (2012). *Modeling and design of modular multilevel converters for grid applications*. Yüksek lisans tezi, School of Electrical Engineering, KTH Teknikringen, Sweden.
- [16] Giacomo Casadei (2012). *Modular multi-level converter: modeling, simulation and control in steady state and dynamic conditions*. Yüksek lisans tezi, School of Automation Engineering, University of Bologna, Italy.
- [17] Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L., Wu, B., Rodriguez, J., Perez, M., Leon, J. (2010). Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(8), 2553-2580.
- [18] Lesnicar, A., Marquardt, R. (2003). *An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range*, Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy.
- [19] Cole, S., Belmans, R. (2009). Transmission of bulk power. *Industrial Electronics Magazine*, 3(3), 19-24.
- [20] Liu, Y., Chen, Z. (2013). A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system. *Transactions on Power Systems*, 28(2), 1568-1581.
- [21] Li, Binbin., Zhao, X., Cheng, D., Zhang, S., Xu, D. (2019). Novel hybrid DC/DC converter topology for HVDC interconnections. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(6),

- 5131-5146.
- [22] Venzke, A., Chatzivasileiadis, S. (2019). Convex relaxations of probabilistic AC optimal power flow for interconnected AC and HVDC grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(4), 2706-2718.
 - [23] Huang, Y., Yuan, X., Hu, J., Zhou, P., Wang, D. (2016). DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grids. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(2), 445-458.
 - [24] Urquidez, O. A., Xie, L. (2016). Singular value sensitivity based optimal control of embedded VSC-HVDC for steady-state voltage stability enhancement. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 31(1), 216-225.
 - [25] Wei, Y., Zheng, Z., Sun, Y., Wei, Z., Sun, G. (2013). Voltage stability bifurcation analysis for AC/DC systems with VSC-HVDC. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 1-9.
 - [26] Aik, D. L. H., Andersson, G. (2019). Fundamental analysis of voltage and power stability of single-infeed voltage-source converter HVDC systems. *Transactions on Power Delivery*, 34(1), 365-375.
 - [27] Yen, N. T. H., Hongkun, C., Giang, L. N. (2019). Study on VSC-HVDC grid topology of offshore wind farms. *Cluster Computing*, 22, 14803-14810.
 - [28] Ngamroo, I. (2019). An optimization of superconducting coil installed in an HVDC-wind farm for alleviating power fluctuation and limiting fault current. *Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5.
 - [29] Priya, T. H., Parimi, A. M. (2018). Hybrid controller topology for large solar PV installations in high-voltage DC grid-connected applications. *Electrical Engineering*, 100, 2537-2552.
 - [30] Chen, Z., Hu Y., Blaabjerg, F. (2007). Stability improvement of induction generator-based wind turbine system. *IET Renewable Power Generation* 1:81-93.
 - [31] John, S., Huang, S. H., Ying, L., Jeffery, B., Jose, C., Yang, Z. (2015). *Voltage stability of large-scale wind plants integrated in weak networks: an ERCOT case study*. IEEE Power and Energy Society General Meeting.
 - [32] Liu, R. H., Xue, A. C., Li, M. K., Li, C. R. (2015). Impact of Large-Scale Wind Power Penetration on the Static Voltage Stability Based on the L Index. *App. Mech. and Mat* 713, 1111-1114.
 - [33] Hossain, M. J., Pota, R. H., Mahmud, Md. A., Ramos, R. A. (2012). Investigation of the impacts of large-scale wind power penetration angle and voltage stability of power systems. *IEEE Systems Journal* 6(1), 76-84.
 - [34] Rorato, L. R., Carolina, A. M., Joao, V. A. P., (2016). Long-term voltage stability analysis of variable speed wind generators. *IEEE Trans. on Power Systems* 30(1), 139-152.
 - [35] Liu, H. (2014). *Grid integration of offshore wind farms via VSC-HVDC – dynamic stability study*. Doktora tezi. Department of Energy Technology, Aalborg.
 - [36] Yoon, M., Yoon, Y. T., Jang, G. (2015). A Study on maximum wind power penetration limiting island power system considering high-voltage direct current interconnections. *Energies*, 12, 14244-14259.
 - [37] Agap, A. (2014). *Multi-terminal DC connection for offshore wind farms*. Yüksek lisans tezi, Department of Energy Technology, Aalborg.
 - [38] Kalair, A., Abas, N., Khan, N. (2016). Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1653-1675.
 - [39] Paserba, J. J., Leonard, D. J., Miller, N. W., Naumann, S. T., Lauby, M. G., Sener, F. P. (1994) Coordination of a distribution level continuously controlled compensation device with existing substation equipment for longterm VAR management. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2), 1034–1040.
 - [40] Son, K. M., Moon, K. S., Lee, S. K., Park, J. K. (2000). Coordination of an SVC with a ULTC reserving compensation margin for emergency control. *IEEE Transactions on Power Delivery* 15(4), 1193-1198.
 - [41] Abdel-Rahman, H. M., Youssef, M. H., Saber, A. A. (2006). New static var compensator control strategy and coordination with under-load tap changer. *IEEE Transactions on*

- Power Delivery 21(3), 1630-1635.
- [42] Ratnesh, S. (2012). Coordinated control of ULTC power transformer with STATCOM for voltage control and reactive power compensation. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* 1(10), 318-332.
 - [43] Won, Kim. G., Lee, K. Y. (2005). Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network. *IEEE Transactions on Power Systems* 20(2), 580-586.
 - [44] Khederzade, M. (2007). Coordination control of STATCOM and ULTC of power transformer. *Power Engineering Conference (UPEC)*, United Kingdom.
 - [45] Park, J. H., Baek, Y. S. (2012). Coordination control of voltage between STATCOM and reactive power compensation devices in steady-state. *Journal of Electrical Engineering & Technology* 7(5), 689-697.
 - [46] Ahmadinia, M., Reza. G. (2018). Coordinated control of STATCOM and ULTC to reduce capacity of STATCOM. *Iranian Conference on Electrical Engineering*, Iran.
 - [47] Moursi, M. S., Bak-Jensen, B., Abdel-Rahman, M. H. (2011). Coordinated voltage control scheme for SEIG-based wind park utilizing substation STATCOM and ULTC transformer. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2(3), 246-255.
 - [48] Liang, R. H., Liu, X. Z. (2007). Neuro-fuzzy based coordination control in a distribution system with dispersed generation system, *International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, Kaohsiung, Taiwan.
 - [49] Trescases, O., Wei, G., Prodic, A., Ng, T. W. (2008). Predictive efficiency optimization for DC-DC converters with highly dynamic digital loads. *Transactions on Power Electronics*, 23(4), 1859-1869.
 - [50] Larouci, C., Boukhnifer, M., Chaibet, A. (2010). Design of power converters by optimization under multiphysic constraints: application to a two-time-scale AC/DC-DC converter. *Transactions on Industrial Electronics*, 57(11), 3746-3753.
 - [51] Stupar, A., McRae, T., Vukadinović, N., Prodić, A., Taylor, J. A. (2019). Multi-objective optimization of multi-level DC-DC converters using geometric programming. *Transactions on Power Electronics*, 34(12), 11912-11939.
 - [52] Xu, Y., Dong, Z. Y., Meng, K., Zhao, J. H., Wong, K. P. (2012). A hybrid method for transient stability-constrained optimal power flow computation. *Transactions on Power Systems*, 27(4), 1769-1777.
 - [53] Kapat, S., Krein, P.T. (2012). Formulation of PID control for DC-DC converters based on capacitor current: a geometric context. *Transactions on Power Electronics*, 27(3), 1424-1432.
 - [54] Park, H. H., Cho, G. H. (2014). A DC-DC converter for a fully integrated PID compensator with a single capacitor. *Transactions on Circuits and Systems*, 61(8), 629-633.
 - [55] Neacsu, D. O., Sirbu A. (2020). Design of a LQR-Based Boost Converter Controller for Energy Savings. *Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5379-5388.
 - [56] Mosaad M. I., Alenany, A., Abu-Siada, A. (2020). Enhancing the performance of wind energy conversion systems using unified power flow controller. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(10), 1922-1929.
 - [57] Mosaad M. I., Abu-Siada, A., El-Naggar, M. F. (2019). Application of superconductors to improve the performance of DFIG-based WECS. *IEEE Access*, 7, 103760-103769.
 - [58] Mosaad M. I., El-Raouf, M. O. A., Al-Ahmar, M. A., Bendary, F. M. (2019). Optimal PI controller of DVR to enhance the performance of hybrid power system feeding a remote area in Egypt. *Sustainable Cities and Society*, 47(1), 1-14.
 - [59] De León-Aldaco, S. E., Calleja, H., Aguayo Alquicira, J. (2015). Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review. *Transactions on Power Electronics*, 31(12), 6791-6803.
 - [60] Shaikh, U. A., AlGhamdi, M. K., Alzaher, H. A. (2018). Novel product ANFIS-PID hybrid controller for buck converters. *IET Journal of Engineering*, 8, 760-734.
 - [61] Guo, L., Hung, J. Y., Nelms, R. M. (2009). Evaluation of DSP-based PID and fuzzy controllers for DC-DC converters. *Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 2237-

- 2248.
- [62] Hwu, K. I., Yau, Y. T. (2010). Performance enhancement of boost converter based on PID controller plus linear-to-nonlinear translator. *Transactions on Power Electronics*, 25(5), 1351-1361.
- [63] Machowski, J., Janusz, W., Bumby, J. (1997). *Power Systems Dynamics and Stability*. John New York: Wiley and Sons, New York.
- [64] International Electrotechnical Commission (2007). *Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution Report*. Geneva: IEC.
- [65] Yılmaz, B. (2011). *Şehir Elektrik Dağıtım Şebekeleri Projeleri*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası.
- [66] Bahrman, M. P., Johnson, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2), 32-44.
- [67] U.S.-Canada Power System Outage Task Force (2004). *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada*. USA: Merrimack Station.
- [68] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Perez, H., Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS: modelling and simulation in power networks*. London: Wiley and Sons, United Kingdom.
- [69] Abacı, K. (2016). *Voltage Stability Effect on Power Systems Integrated With Wind Energy Sources of HVDC Report*. Aalborg: Aalborg University.
- [70] Shire, T. W. (2009). *VSC-HVDC based network reinforcement*. Yüksek lisans tezi. Delft University of Technology, Delft.
- [71] Cole, S. (2010). *Steady-state and dynamic modelling of VSC-HVDC systems for power system simulation*. Doktora tezi. Katholieke University, Leuven.
- [72] Liu, Y. (2013). *The study on hybrid multi-infeed HVDC systems connecting with offshore wind farm*. Doktora tezi. Aalborg University, Aalborg.
- [73] Arifoğlu, U. (2002). *Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi*. İstanbul: Alfa Yayınları.
- [74] Yamaçlı, V. (2014). *FACTS cihazları içeren güç sistemlerinin sezgisel algoritmalarla optimizasyonu*. Yüksek lisans tezi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [75] Acha, E., Agelidis, V. G., Anaya-Lara, O., Miller, T. J. E. (2002). *Power electronic control in electrical systems*. Oxford: Newnes Press.
- [76] Uzunovic, E., Canizares, C. A., Reeve, J. (1997). Fundamental frequency model of static synchronous compensator. *North American Power Symposium Proceedings* (ss. 49-54), Wyoming.
- [77] Yamaçlı, V., Abacı, K. (2021). Optimal converter control for PV-fed DC and AC interconnection by using hybrid artificial neural networks. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(1), 210-224.
- [78] Glover, J. D., Sarma, M. (2003). *Power System Analysis and Design*. New Jersey: IEEE Press.
- [79] Gray, J. L. (2011). *The physics of the solar cell. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- [80] Siddiqui, M.U., Abido, M. (2013). Parameter optimization for five- and seven-parameter photovoltaic electrical models using evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing*, 13, 4608-4621.
- [81] Desoto, W., Klein, S. A., Beckman, W. A. (2006). Improvement and Validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 1, 78-88.
- [82] Özsoy, E. E. (2015). *Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanıma Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı Ve Uygulaması*. Doktora tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [83] Gopi, R. R., Sreejith, S. (2018). Converter topologies in photovoltaic applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(1), 1-14.
- [84] Gnanarathna, U. N., Gole, A. M., Jayasinghe, R. P. (2011). Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 26(1), 316-324.
- [85] Antonopoulos, A., Angquist, L., Nee, H. P. (2009). Dynamics and voltage control of the modular multilevel converter. *European Conference on Power Electronics and*

- Applications*, Italy.
- [86] Uyaroğlu, Y., Pehlivan, İ., Abacı, K., Yalçın, M. A., Ferikoğlu, A. (2007). Faz-kilitlemeli çevrimlerde kaos, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [87] Martinez-Rodrigo, F., Ramirez, D., Rey-Boué, A., Depablo, S., Lucas, L. (2017). Modular multilevel converters: control and applications. *Energies*, 10(11), 1709-1735.
- [88] Ziegler, J. G., Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of The ASME*, 64, 759-768.
- [89] Abaci, K., Yamacli, V. (2019). Hybrid artificial neural network by using differential search algorithm for solving power flow problem. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 19(4), 57-64.
- [90] Ayan, K., Kılıç, U. (2012). Artificial bee colony algorithm solution for optimal reactive power flow. *Applied Soft Computing*, 12(5), 1477-1482.
- [91] Abaci, K., Yamacli, V. (2015). Differential search algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 79, 1-10.
- [92] Germeç, K. E., Erdem, H. (2015). Elektrik güç sistemlerinde zaman-harmonik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 263-271.
- [93] Saadat, H. (2011). *Power system analysis*. New York: PSA Publishing.
- [94] Blackburn, J. L. (1993). *Symmetrical components for power systems engineering*, New York: CRC Press.

EKLER**EkA. PV Hücre ve Ziegler-Nichols PID Parametreleri****Tablo EkA.1.** Fotovoltaik hücre parametreleri.

Parameterre	Değer
Light-generated current I_L (A)	8.6146
Diode saturation current I_0 (A)	$4.1153 \cdot 10^{-10}$
Diode ideality factor (α)	1.0108
Shunt resistance R_{SH} (ohms)	288.496
Series resistance R_S (ohms)	0.39957

Tablo EkA.2. Ziegler-Nichols metodu parametre katsayıları.

Kontrol Tipi	PI_P	T_i	T_d	PI_I	PI_D
P	$0.50 \times K_u$	-	-	-	-
PI	$0.45 \times K_u$	$T_u/1.2$	-	$0.54 \times K_u/T_u$	-
PD	$0.80 \times K_u$	-	$T_u/8$	-	$K_u T_u/10$
PID	$0.60 \times K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$	$1.2 \times K_u/T_u$	$0.3 \times K_u T_u/4$

EkB. Yapay Sinir Ağları ve Diferansiyel Arama Algoritması Parametreleri**Tablo EkB.1.** YSA parametreleri.

Ağ Parametresi	Açıklama
Tip	Feed-forward back propagation
Giriş	Güç sistemi parametreleri, PV tesisi ışıınımı ve gerilimi
Çıkış	Güç sistemi çıkışı, referans gerilimi,
Eğitim Metodu	PI kontrol parametreleri
Performans Fonksiyonu	Levenberg-Marquardt
Katman Sayısı	MSE
Nöron Sayısı	2
Transfer Fonksiyonu	15
	Tan-Sig

Tablo EkB.2. DSA parametreleri.

Parametre	Değer
Süperorganizma Sayısı	30
Metot	Bijjective DSA
Maximum iterasyon	5e3
Global en iyi çözüm kümesi için simülasyon sayısı	100
Global en kötü çözüm kümesi için simülasyon sayısı	20

EkC. ÇBAG Rüzgâr Çiftliği İçeren Güç Sistemi Parametreleri**Tablo EkC.1.** Sistemin hat parametreleri.

Hat	Uzunluk (km)	Pozitif ve Sıfır Bileşen			Frekans (Hz)
		Rezistans (Ω /km)	Endüktans (H/km)	Kapasitans (F/km)	
Hat 1	10	[0.1153 0.413]	[1.05e-3 3.32e-3]	[11.33e-009 5.01e-009]	60
Hat 2	20	[0.1153 0.413]	[1.05e-3 3.32e-3]	[11.33e-009 5.01e-009]	60

Tablo EkC.2. Transformatör parametreleri.

Cihaz	Birincil Sargı			İkincil Sargı		
	V	R	L	V	R	L
	(Volt)	(Ω)	(H)	(Volt)	(Ω)	(H)
T1	25 kV	0.00083	0.025	575 V	0.00083	0.025
T2	120 kV	0.0027	0.08	25 kV	0.0027	0.08

Tablo EkC.3. ÇBAG kontrol başlangıç parametreleri.

Parametre	g_1	g_2
GVRG	1.25	300
PRG	1	100
DCBVRG	0.02	0.05
GSCCRG	1	100
RSCCRG	0.3	8