T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİ İÇİN YAPAY ZEKA TEMELLİ YENİ KONTROL MODELİNİN TASARLANMASI

Hazırlayan
Nazlıhan ÖZDOĞAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

Doktora Tezi

Aralık 2025
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİ İÇİN YAPAY ZEKA TEMELLİ YENİ KONTROL MODELİNİN TASARLANMASI

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Nazlıhan ÖZDOĞAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

Aralık 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Nazlıhan ÖZDOĞAN

İmza

“Şebekeye Bağlı Rüzgar Türbin Sistemi için Yapay Zeka Temelli Yeni Kontrol Modelinin Tasarlanması” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Nazlıhan ÖZDOĞAN	Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ
İmza	İmza

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Enis GÜNAY

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ ye teşekkür ederim.

Tez süresince kıymetli katkıları, yapıcı yorum ve önerileri ile çalışmamı geliştirmeme yardımcı olan Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU ve Doç. Dr. Ahmet DOĞAN hocalarıma çok teşekkür ederim.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca sabır ve fedakârlık göstererek beni daima destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük katkı sahibi aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların varlık ve destekleri sayesinde bu başarılara ulaşabildim.

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Aralık 2025, KAYSERİ

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİ İÇİN YAPAY ZEKA TEMELLİ YENİ KONTROL MODELİNİN TASARLANMASI

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Aralık 2025
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

ÖZET

Elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından etkili bir şekilde yararlanılması ve enerji verimliliği için güç kalitesinin iyileştirilerek sistem kararlılığının sağlanması oldukça önemlidir. Güç kalite sorunlarının belirsiz ve doğrusal olmayan yapıları dikkate alınarak LCL filtreli Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör (DSTATCOM) modeli için Yapay Sinir Ağı (ANN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) tabanlı olmak üzere iki yeni zeki kontrol sistem yaklaşımları önerilmiştir. Çünkü zeki algoritmalar, doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmek ve karmaşık problemleri güçlü hafızalarıyla çözmek için kullanılabilecek uygun yöntemlerdir. ANN ve LSTM tabanlı kontrol modelleri tasarlanırken Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması ile ayarlanmış geleneksel Oransal İntegral (PI) kontrol sisteminden yararlanılmış ve LCL-DSTATCOM, Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü (ÇBAG) rüzgar türbini sisteminin bağlı olduğu şebekeye entegre edilmiştir. Kontrol sistemleri şebekede oluşabilecek ani gerilim değişimleri esnasındaki katkıları, bara akım harmonik iyileştirmeleri, filtre parametre değişimine karşı duyarlıkları, kontrol sonuçları ve dengesiz şartlarda türbin entegrasyon etki azaltma katkıları bakımından karşılaştırılmıştır. Detaylı analiz çalışmaları sonucunda önerilen zeki kontrol yaklaşımlar ile DSTATCOM performansının iyileştirilerek, güç kalite sorunlarının azaltıldığı ve LSTM tabanlı kontrol sisteminin en başarılı model olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, derin öğrenme algoritmalarının kontrol sistemlerinde kullanılabilirliğini test etmesi ve rüzgar türbini sisteminden kaynaklanan entegrasyon etkilerini azaltarak güç kalitesinin iyileştirilmesine yönelik literatüre yeni bir alternatif yaklaşım sunması açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör ; harmonik bozulma ; güç kalitesi ; zeki kontrolör

DESIGN OF A NEW ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED CONTROL MODEL FOR A GRID-CONNECTED WIND TURBINE SYSTEM

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, September 2025
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Serkan BAHÇECİ

ABSTRACT

Effectively utilizing renewable energy sources in electricity generation and ensuring system stability by improving power quality are important for energy efficiency. Considering the uncertain and nonlinear nature of power quality issues, two novel intelligent control approaches based on Artificial Neural Networks (ANN) and Long Short-Term Memory (LSTM) were proposed for the LCL-filtered Distribution Static Synchronous Compensator (DSTATCOM) model. This is because intelligent algorithms are suitable methods for controlling nonlinear systems and solving complex problems using their powerful memory capabilities. While designing ANN- and LSTM-based control models, the conventional Proportional-Integral (PI) control system tuned with Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was utilized, and the LCL-DSTATCOM was integrated into the grid connected to the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) wind turbine system. The control systems were compared in terms of their contributions during sudden voltage variations in the grid, improvements in bus current harmonics, sensitivity to filter parameter changes, control performances, and effectiveness in mitigating the impact of turbine integration under unbalanced conditions. As a result of detailed analysis studies, it was observed that the proposed intelligent control approaches improved the performance of the DSTATCOM, reduced power quality issues, and that the LSTM-based control system was the most effective model. This study is important as it tests the applicability of deep learning algorithms in control systems and offers a novel approach for improving power quality by mitigating the integration effects of wind turbine systems.

Keywords: Distribution Static Synchronous Compensator; harmonic distortion; power quality; intelligent controller

İÇİNDEKİLER

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİ İÇİN YAPAY ZEKA TEMELLİ YENİ KONTROL MODELİNİN TASARLANMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

KABUL VE ONAY SAYFASI iii

TEŞEKKÜR v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

İÇİNDEKİLER viii

KISALTMALAR xi

TABLOLAR LİSTESİ xiv

ŞEKİLLER LİSTESİ xv

GİRİŞ 1

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Literatür Taraması 4

1.1.1. FACTS Cihazlarının Entegrasyonu ve Güç Kalite İyileştirme 4

1.1.2. Kontrol Yöntemleri ile FACTS Performansının İyileştirilmesi 6

1.2. Rüzgar Enerjisi 11

1.3. Rüzgar Türbin Sistemleri 12

1.4. Rüzgar Türbin Sistem Modelleri 14

1.5. Güç Kalite Sorunları 16

1.5.1. Gerilim Değişimleri 16

1.5.2. Gerilim Dalgalanmaları 17

1.5.3. Gerilim ve Akım Dengesizliği 17

1.5.4. Frekans Kararlılığı 18

1.5.5. Harmonik Bozulma 19

1.6. FACTS Cihazlar 21

1.6. Özel Güç Cihazlar 27

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1.Yöntem..... 30

2.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbin Sistemi 31

2.2.1.Türbin Takip Karakteristiği ve Kontrol Sistemi 32

2.2.2. Matematiksel Model 33

2.3. L-DSTATCOM 34

2.3.1. L-DSTATCOM Matematiksel Modeli..... 34

2.3. LCL-DSTATCOM..... 36

2.3.1. LCL Filtre Tasarımı..... 37

2.3.2. LCL-DSTATCOM Matematiksel Modeli 38

2.4. DSTATCOM Kontrol Yöntemleri..... 40

2.4.1. PI Tabanlı Kontrol Yöntemleri 40

2.4.2. Yapay Zeka veya Tahmine Dayalı Kontrol Yaklaşımları 45

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. ÇBAG Rüzgar Türbin Sistemi..... 48

3.2. LCL- DSTATCOM Modeli 49

3.3. DSTATCOM Geleneksel PI Kontrol Sistemi..... 50

3.3.1. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO) 51

3.3.2. Ağırlaştırılmış Diferansiyel Gelişim Algoritması (WDE)..... 54

3.4.1. Veri Seti 56

3.4.2. ANN Tabanlı Kontrol Sistemi 56

3.4.3. LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi 58

3.4. SHAP Analiz 64

3.5. Simülasyon Sonuçları 68

3.5.1. Şebeke Gerilim Değişimleri 68

3.5.2. Harmonik Analiz 74

3.5.3. Dengesiz Yüklenme 83

4.BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA 94

ÖZGEÇMİŞ 110

KISALTMALAR

AC: Alternatif Akım (Alternative Current)

DC: Doğru Akım (Direct Current)

ÇBAG: Çift Beslemeli Asenkron Generatör

KMSG: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör

RSSG: Rotoru Sargılı Senkron Generatör

SKAG: Sincap Kafesli Asenkron Generatör

RSAG: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör

EPDK: Ulusal Elektrik Şebeke Yönetmeliği

TÜREB: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği

OBN: Ortak Bağlantı Noktası

THB: Toplam Harmonik Bozulma

LVRT: Düşük Gerilim Sürdürme Yeteneği (Low Voltage Ride Through)

FACTS: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems)

SVC: Statik Var Kompansatör (Static Var Compensator)

TCR: Tristör Kontrollü Reaktör (Thyristor Controlled Reactor)

TSR: Tristör Anahtarlamalı Reaktör (Thyristor Switched Reactor)

TSC: Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (Thyristor Switched Capacitor)

FC: Sabit Kapasitör (Fixed Capacitor)

FR: Sabit Reaktör (Fixed Reactor)

STS: Statik Transfer Anahtarı (Static Transfer Switch)

GCSC: Kapı Kontrollü Seri Kondansatör (Gate-Controlled Series Capacitor)

SBR: Seri Frenleme Direnci (Series Braking Resistor)

PWM: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse-width Modulation)

SSSC: Statik Senkron Seri Kompanzatör (Static Synchronous Series Compensator)

TCSC: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (Thyristor-Controlled Series Capacitor)

STATCOM :Statik Senkron Kompansatör (Static Synchronous Compensator)

DSTATCOM: Dağıtım Statik Senkron Kompansatör (Distribution Static Synchronous Compensator)

IPFC: Hat Arası Güç Akış Denetleyici

UPFC: Birleşik Güç Akışı Kontrolörü (Unified Power Flow Controller)

DVR: Dinamik Gerilim Düzenleyici (Dynamic Voltage Restorer)

UPQC: Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyici (Unified Power Quality Conditioner)

BESS: Batarya Enerji Depolama Sistemi (Battery Energy Storage System)

VSC: Gerilim Kaynağı Dönüştürücüsü (Voltage Source Converter)

CSC: Akım Kaynağı Dönüştürücüsü (Current Source Converter)

PI: Oransal İntegral (Proportional Integral)

PID: Oransal İntegral Türev (Proportional Integral derivative)

ANN: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)

LSTM: Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short Term Memory)

CNN: Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network)

DBN: Derin İnanç Ağı (Deep Belief Network)

PSO: Parçacık Sürü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization)

DE: Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution)

WDE: Ağırlaştırılmış Diferansiyel Gelişim (Weighted Differential Evolution Algorithm)

GEOA: Altın Kartal Optimizasyon Algoritması (Golden Eagle Optimization Algorithm)

SOS: Simbiyoz Organizmalar Arama (Symbiosis Organisms Search)

MPA: Deniz Avcısı Algoritması (Marine Predator Algorithm)

AHA: Yapay Sinek Kuşu Algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm)

LOA: Lyrebird Optimizasyon Algoritması (Golden Eagle Optimization Algorithm)

CSO: Guguk Kuşu Arama Optimizasyonu (Cuckoo Search Optimization)

GA: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

BWO: Beluga Balinası Optimizasyonu (Beluga Whale Optimization)

BFA: Bakteri Besin Arama Algoritması (Bacteria Foraging Algorithm)

IABC : Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)

TLBO: Öğretim - Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching - Learning Based Optimization)

ANFIS: Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System)

MPC: Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)

ISE: İntegral Kare Hatası (Integral Square Error)

MSE: Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error)

SHAP: Shapley Additive Explanations

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. EN50160 fliker sınır değerleri 17
Tablo 1. 2. EN50160 standartına göre şebeke frekans sınırları 19
Tablo 1. 3. EN50160 standartına göre gerilim harmonik sınırları 20
Tablo 3. 1. Rüzgar türbin sistemi parametre ve değerleri……48
Tablo 3. 2. DSTATCOM ile LCL filtre parametre değerleri 49
Tablo 3. 3. PSO ile ayarlanan PI parametre değerleri 53
Tablo 3. 4. WDE ile ayarlanan PI parametre değerleri 54
Tablo 3. 5. ANN kontrolörlerin parametre değerleri 58
Tablo 3. 6. LSTM kontrolörlerin parametre değerleri 62
Tablo 3. 7. ANN ve LSTM kontrolör modellerinin performansları 63
Tablo 3. 8. Yük 1 için akımların % THB değerleri 75
Tablo 3. 9. Yük 2 için akımların % THB değerleri 76
Tablo 3. 10. Nonlineer yük ve filtre parametre değişimi durumlarında akımların 77
Tablo 3. 11.Dengesiz- yük bağlantıları 84
Tablo 3. 12. Dengesiz-lineer endüktif yük bağlantısında akımların % THB değerleri.. 85
Tablo 3. 13. Dengesiz-lineer kapasitif yük bağlantısında akımların % THB değerleri .. 86
Tablo 3. 14. Dengesiz nonlineer yük bağlantısında akımların % THB değerleri 86

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Avrupa'da ülkelere göre kümülatif rüzgar enerjisi kurulumları 11
Şekil 1. 2. Türkiye'deki rüzgar enerjisi santrallerinin yıllık kurulum miktarları 12
Şekil 1. 3. Türkiye'de rüzgar enerjisi santrallerinin aylık elektrik üretimindeki yüzde . 12
Şekil 1. 4. Rüzgar türbin sistemi elektrik enerjisi üretim aşamaları 13
Şekil 1. 5. Rüzgar türbin elemanları 14
Şekil 1. 6. Rüzgar türbin sistem modelleri a) A tipi b) B tipi c) C tipi d) D tipi 15
Şekil 1. 7. IEEE 1159 standartına göre gerilim bozulmalarının sınıflandırılması..... 16
Şekil 1. 8. Güç kalitesi sorunlarının dalga formları 21
Şekil 1. 9. FACTS cihazlarının sınıflandırılması 22
Şekil 1. 10. FACTS cihazlarının bağlantı şekilleri a) seri b) paralel c) seri-paralel d) seri-seri 23
Şekil 1. 11. FC-TCR tasarımlı SVC modeli ve kontrolü 23
Şekil 1. 12. TSC-TCR tasarımlı SVC modeli 24
Şekil 1. 13. FACTS cihaz modelleri a) TCSC b) SSSC 24
Şekil 1. 14. STATCOM modeli 25
Şekil 1. 15. IPFC modeli 26
Şekil 1. 16. UPFC modeli 27
Şekil 1. 17. DSTATCOM devre şeması 27
Şekil 1. 18. DVR modeli ve temel devre şeması 28
Şekil 1. 19. UPQC konfigürasyonu 29
Şekil 2. 1. MATLAB/Simulink'te tasarlanan model 30
Şekil 2. 2. ÇBAG'lü rüzgar türbin modeli 31
Şekil 2. 3. Rüzgar türbini takip karakteristik eğrisi 32
Şekil 2. 4. Rotor tarafı dönüştürücü kontrol sistemi 32
Şekil 2. 5. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrol sistemi 33
Şekil 2. 6. L-DSTATCOM modeli 34
Şekil 2. 7. DSTATCOM'un eşdeğer devresi 35
Şekil 2. 8. LCL-DSTATCOM'un eşdeğer devresi 39
Şekil 2. 9. Sönümleme işlemleri a) pasif sönümleme b) aktif sönümleme 39
Şekil 2. 10. DSTATCOM geleneksel PI kontrol blok yapısı 40

Şekil 2. 11. Geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol mekanizması 41
Şekil 2. 12. Doğru akım vektör kontrol mekanizması 41
Şekil 2. 13. LCL-DSTATCOM'un doğru akım vektör kontrol mekanizması 42
Şekil 2. 14. AC gerilim denetleyici olmadan geleneksel ayrıştırılmış 43
Şekil 2. 15. Senkron referans çerçeve yönteminin temel blok diyagramı 43
Şekil 2. 16. Geliştirilmiş SRF tabanlı kontrol sistemi 44
Şekil 2. 17. Anlık reaktif güç kontrol sistemi 45
Şekil 2. 18. MPC kontrollü DSTATCOM'un şematik diyagramı 46
Şekil 2. 19. DSTATCOM için FLC kontrolör blok diyagramı 46
Şekil 3. 1. DSTATCOM eşdeğer devre modeli..... 50
Şekil 3. 2. DSTATCOM için geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol sistemi yapısı 50
Şekil 3. 3. PSO akış diyagramı 53
Şekil 3. 4. ISE kriterine dayalı amaç fonksiyonun Simulink modeli 54
Şekil 3. 5. WDE akış diyagramı 55
Şekil 3. 6. DSTATCOM için tasarlanan ANN tabanlı kontrol sistem modeli 57
Şekil 3. 7. ANN kontrolörlerinin yapısı 58
Şekil 3. 8. LSTM hafıza hücresi 59
Şekil 3. 9. DSTATCOM için tasarlanan LSTM tabanlı kontrol sistem modeli 61
Şekil 3. 10. LSTM kontrolörlerinin yapısı 62
Şekil 3. 11. LSTM kontrolör modelleri için SHAP özet grafikleri 65
Şekil 3. 12. ANN tabanlı kontrol sisteminin MATLAB/Simulink modeli 66
Şekil 3. 13. LSTM tabanlı kontrol sisteminin MATLAB/Simulink modeli 67
Şekil 3. 14. Şebeke gerilim yükselimi durumunda geleneksel PI kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 69
Şekil 3. 15. Şebeke gerilim yükselimi durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 70
Şekil 3. 16. Şebeke gerilim yükselimi durumunda LSTM tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a) DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 71

Şekil 3. 17. Şebeke gerilim düşümü durumunda geleneksel PI kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 71
Şekil 3. 18. Şebeke gerilim düşümü durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 72
Şekil 3. 19. Şebeke gerilim düşümü durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri 73
Şekil 3. 20. Şebeke gerilim yükselim durumunda DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu çıkışları 74
Şekil 3. 21. Şebeke gerilim düşüm durumunda DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu çıkışları 74
Şekil 3. 22. Nonlineer yük bağlıyken OBN bara akımın a fazı için THB analiz PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol 80
Şekil 3. 23. Nonlineer yük bağlıyken DSTATCOM bara akımın a fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol 81
Şekil 3. 24. Nonlineer yük bağlıyken filtre parametre değişimi durumunda OBN bara akımın b fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol 82
Şekil 3. 25. Nonlineer yük bağlıyken filtre parametre değişimi durumunda DSTATCOM bara akımın b fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol 83
Şekil 3. 26. MATLAB/Simulink'te tasarlanan rüzgar türbin sistemsiz model 83
Şekil 3. 27. Dengesiz-nonlineer yük modeli 84
Şekil 3. 28. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken OBN bara akımın a fazı %THB sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c) ANN d) LSTM 87
Şekil 3. 29. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken DSTATCOM bara akımın a fazı %THB sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c) ANN d) LSTM 88
Şekil 3. 30. Dengesiz lineer yük bağlıyken i_d kontrol sistem sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c) ANN d) LSTM 89
Şekil 3. 31. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken id kontrol sistem sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c) ANN d) LSTM 90

Şekil 3. 32. iq Kontrol sistem sonuçları a) Dengesiz RL yük bağlıyken b) Dengesiz nonlineer yük bağlıyken 90

GİRİŞ

Günümüzde enerji talep ihtiyacının günden güne artması ve fosil yakıtların olumsuz etkileri yenilenebilir enerji kaynakları alanına yönelik yatırımların her geçen gün artış göstermesine neden olmuştur. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilecek önemli potansiyele sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisini etkili bir şekilde kullanabilmemiz için, rüzgar türbin sisteminin bağlandığı şebekede oluşabilecek güç kalite sorunlarının azaltılması ve güç sistem kararlılığının sağlanması oldukça önemlidir. Güç dalgalanmaları, ani gerilim değişimleri ve gerilim titreşimlerinin (fliker) oluşması, akım ile gerilim harmonik bozulmaların artışı, ani elektrik kesintilerin oluşması, rüzgar türbinlerinin yapısındaki bazı teknik hatalara bağlı olarak faz dengesizliklerinin meydana gelmesi rüzgar türbin sisteminin bağlandığı şebekelerde oluşabilecek güç kalite sorunlarından bazılarıdır [1,2]. Şebeke güç kalitesinin iyileştirilmesine yönelik literatürde farklı çözüm önerileri sunulmuştur. Uygulanabilecek bazı yöntemleri rüzgâr türbini hız ve eğim açı kontrolleri, yeni dönüştürücü tasarımları, filtre devrelerin uygulanması, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazların şebekeye entegrasyonu ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, enerji depolama sistemlerinin kullanımı, hibrit sistemlerin oluşturulması şeklinde ifade edebiliriz.

Günümüzde güç elektroniği elemanları, anahtarlama hızlarının yüksek olması nedeniyle güç sistemi kompanzasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta ve gerilim düşümlerini engelleyerek sistem kararlılığının artırılmasına yardımcı olmaktadır. Güç elektroniği elemanlarının güç sistemleri üzerindeki olumlu etkileri üzerine FACTS cihazları üretilmiştir. Yani bu sistemler kontrol edilebilen ve hızlı cevap verme yeteneğine sahip olan güç elektroniği tabanlı cihazlardır. FACTS cihazları, temelde kompanzasyon elemanı olarak kullanılmakta ve bu sayede gerilim regülasyon işleminin gerçekleştirilmesine, güç sistem kararlığının iyileştirilmesine, iletim hattı yük taşıma kapasitesinin artırılmasına ve kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

FACTS cihazların performansında kullanılacak kontrol sistemi önemli bir rol oynamaktadır Orantılı İntegral (PI) kontrol, bulanık mantık kontrol, kayan kipli kontrol, model öngörülü kontrol, yapay sinir ağı veya ve/veya meta-sezgisel algoritma tabanlı kontrolörler kullanılan kontrol sistemlerinden bazılarıdır. Bu cihazlarının kullanıldığı çalışmalarda geleneksel yöntemlere göre tahmine dayalı olan zeki kontrolörler ile meta-sezgisel algoritma tabanlı kontrolörlerin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [3,4]. Çünkü geleneksel PI kontrol sistemleri, parametrelere dayanan matematiksel modellemeler ile tasarlanırlar. Bu nedenle, parametre değişimlerine karşı duyarlıdırlar [5]. Aynı zamanda gürültülü veya doğrusal olmayan sistemlerde kararsız dinamikler sergileyebilirler [6,7]. Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve doğrusal olmayan yük bağlantıları, güç sisteminde belirsizlikleri ve doğrusal olmayan dinamik özellikleri artırır. Tüm bu durumlar mevcut PI tabanlı kontrol sistemlerini yetersiz kılmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmek ve güçlü hafızalarıyla karmaşık problemleri çözmek için kullanılabilecek uygun yöntemlerdir [9]. Bu kapsamda FACTS cihaz kontrolü için derin/makine öğrenme tabanlı bir kontrol modelleri geliştirilebilir.

FACTS cihazları tristör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı olmak üzere iki ayrı grupta incelenebilir. Dönüştürücü tabanlı FACTS cihazlar, tristör tabanlı FACTS cihazlar göre fonksiyonel özellikleri daha gelişmiştir ve bu sayede daha yüksek performans ile uygulama esnekliği sunar. DSTATCOM, yaygın kullanılan dönüştürücü tabanlı FACTS cihazlarından biridir. Tez çalışmasında ÇBAG rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebeke için PSO algoritması ile optimize edilmiş Geleneksel PI kontrollü LCL-DSTATCOM modeli tasarlanarak entegre edilmiştir. İlgili güç sistem modelinde DSTATCOM performansını iyileştirmek ve güç kalite sorunlarını azaltmak amacıyla DSTATCOM kontrolü için ANN ve LSTM tabanlı iki yeni zeki kontrol sistem tasarımı önerilmiştir. Önerilen zeki kontrol sistemleri geleneksel PSO-PI kontrol sisteminden yararlanılarak oluşturulmuştur. Önerilen yeni kontrol yaklaşımları, şebekede oluşabilecek ani gerilim değişimleri esnasındaki katkıları, bara akım harmonik iyileştirme performansları, filtre parametre değişimine karşı duyarlılığı ve kontrol sistem sonuçları bakımından karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda dengesiz yüklenme koşullarında rüzgar türbin sisteminden kaynaklanan harmonik bozulma artışının ortadan kaldırıp kaldırılamayacağı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen kontrol yaklaşımlarının güç sistem katkıları sunularak yorumlanmıştır.

Çalışmanın katkıları:

- Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda, derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı şebeke güç kalite sorunlarının iyileştirilmesi ve kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, çalışma ile derin öğrenme algoritmaların kontrol sistem performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi ve literatürdeki ilgili eksikliğin giderilmesi sağlanmıştır.
- Tasarlanan DSTATCOM ile şebekede oluşabilecek ani gerilim değişimleri esnasında yük gerilim profilinin iyileştirilmesi ve önerilen yeni zeki kontrol sistemler ile DSTATCOM performansının iyileştirilerek, farklı yük koşullarında akım harmonik bozulmaları azaltılmıştır.
- Önerilen zeki kontrol modelleri ile dengesiz yüklenme durumunda rüzgar türbin sisteminin bara akım harmoniklerindeki entegrasyon etkisinin ortadan kaldırılarak rüzgar türbin sistemi şebekeye bağlı olmadığı durumdan daha az %THB değerleri elde edilmesi sağlanmıştır.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Literatür Taraması

Elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanabilmemiz, elde edilen enerji kalitesini artırarak, güç sistem kararlılığını sağlayabilmemiz açısından şebeke güç kalite sorunlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar büyük öneme sahiptir. Kontrol edilebilen ve hızlı cevap verme yeteneğine sahip olan güç elektroniği tabanlı FACTS ile kompanzasyon işlemi gerçekleştirilerek şebeke kayıplarının azaltılması, gerilim regülasyonunun sağlanması, iletim hattı yük taşıma kapasitesinin artırılması ve güç kalitesinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır [8-11]. Bu cihazların performansında kullanılacak kontrol sistemi önemli bir rol oynamaktadır. FACTS cihazlarının kullanıldığı çalışmalarda genellikle bu cihazların kontrolü için lineer olmayan kontrol yöntemlerinin lineer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [3,4].

1.1.1. FACTS Cihazlarının Entegrasyonu ve Güç Kalite İyileştirme

Hemmati vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dengesiz yükler altında çalışmak için ÇBAG'lü rüzgar türbin sistemine batarya, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC) elemanların eklenmesiyle sistem tasarımını gerçekleştirmiş ve oluşturulan sistem, TCR-TSC-ÇBAG seti ve ÇBAG-batarya seti gibi çeşitli alt gruplara ayrılmıştır. Her set, tanımlanan hedefleri gerçekleştirmek için ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Geliştirilen koordineli kontrol şemaları ile, kompanzasyon işlemi, dalgalanmaların sönümlenmesi, frekansın düzenlenmesi, esnekliğin arttırılması olmak üzere birçok amaca aynı anda ulaşılması sağlanmıştır [12]. Çalışma [13]'de rüzgâr enerjisini şebekeye sırasıyla statik transfer anahtarı Statik Transfer Anahtarı (STS) ve dinamik gerilim düzenleyici (DVR) ile bağlayarak iki ayrı sistem oluşturulmuştur. Kesinti

durumunda STS'nin performansı değerlendirilmiş ve gerilim dalgalanmalarının DVR sistemi ile engellemesi sağlanmıştır [14]. Çalışma [15]'de ortak bağlantı noktasında birbirine bağlanan Birleşik Güç Akışı Kontrolörünü (UPFC) kullanarak şebeke güç kalitesi sorunlarının azaltması amaçlanmıştır. UPFC kontrol için PI kazanç parametreleri Modifiye Edilmiş Parçacık Sürü Optimizasyon optimize edilerek cihaz performansı iyileştirilmiştir. Sakipour ve Abdi çalışmalarında rüzgar santrallerinde üretim ve tüketim arasında bir denge sağlamak için optimize edilmiş bir Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) kullanmışlardır. Aynı zamanda, gerilim değişimlerinin üstesinden gelmek ve arızalar meydana geldikten sonra reaktif güç salınımlarını sönümlemek için yeni bir kendi kendini düzelten Statik Var Kompansatör (SVC) önerilmiştir. SVC stratejisinin gerilim sapmalarını düzelterek, sistem gerilim kararlılığını geliştirme yeteneğini doğrulanmıştır [16]. Başka bir çalışmada ise DVR kullanımı, harmonik bileşenleri azaltarak bozuk yük gerilim profilinin iyileştirilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi için önerilmiştir [17]. Çalışma [18]'de rüzgar enerji sisteminin güç kararlılığını koruyarak şebekeye enjekte edilebilmesi için STATCOM ve BESS kullanılmış ve histerezis akımı kontrollü darbe genişlik modülasyonu (PWM) tabanlı kontrol sistemi önerilmiştir. İlgili kontrolör sayesinde STATCOM-BESS'in güç sisteminde bulunan harmonik bileşenleri ortadan kaldırarak reaktif güç desteği sağladığı ve faz açısı farkı olmadan kaynak akımını ve gerilimini koruduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma [19]'da SVC şebeke gerilim kararlılığını ve rüzgar çiftliğinin düşük gerilim sürdürme yeteneği (LVRT) geliştirmek için kullanılmıştır. SVC'nin performansını iyileştirmek için ek bir bulanık mantık tabanlı kontrolör önerilmiş ve rüzgar çiftliğinin arıza sonrası LVRT kapasitesi iyileştirilerek, daha geniş bir yük varyasyonu aralığında şebeke kodu gereksinimlerini karşılayabilmesini sağlanmıştır. Çalışma [20]'de ise, rüzgar türbini generatör sistemlerinde LVRT kabiliyetini geliştirmek için Kapı Kontrollü Seri Kondansatör (GCSC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve seri frenleme direnci (SBR) olmak üzere üç seri FACTS cihazının uygulaması ve kontrolü incelenmiştir. Önerilen GCSC yönteminin sabit hızlı asenkron generatörlü rüzgar türbin sisteminin LVRT kapasitesinin iyileştirmesinde daha iyi performans gösterdiğini görülmüştür.

Çalışma [21] 'de ÇBAG'lü bir rüzgar santralinde STATCOM ile SVC, ortak bağlantı noktası için geçici gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Test sistemine dayalı simülasyon sonuçları, STATCOM'un daha az kapasiteyle bile SVC' den,

ciddi gerilim düşümleri esnasında gerilim kararlılığı için daha fazla reaktif güce katkıda bulunabileceği ve arızadan sonra gerilim iyileştirme süresinin daha kısa olduğu görülmüştür. Ghosh ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç kalite sorunları incelenmiş ve DVR'nin DSTATCOM'a göre nispeten daha iyi gerilim düzenleme yeteneğine sahip olduğu ancak DSTATCOM'un güç kompanzasyonu ile gerilim regülasyon performansının DC depolama cihazına bağlı olarak geliştirilebileceği gözlemlenmiştir [22]. Çalışma [23]'te ise, yenilenebilir enerji kaynakların mikro şebekede oluşturduğu güç kalitesi sorunları STATCOM ile DVR kullanılarak incelenmiştir. Kompanzasyon aralığının küçük olması durumunda gerilim regülasyonu için STATCOM'un daha uygun olduğu, ancak kompanzasyon aralığı genişledikçe, DVR'nin daha üstün bir performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. . Başka bir çalışmada ise D-STATCOM'un, bir DVR' ye kıyasla sisteme herhangi bir aktif güç enjekte etmeden çok daha yüksek gerilim düşümlerini düzeltebileceği ifade edilmiştir [24].

Çalışma [25]'de, STATCOM ile rüzgar türbinin bağlı olduğu şebeke ortak bağlantı noktasındaki gerilim düşümlerini engellenerek, gerilim profilini iyileştirilmiştir. Yine çalışma [26]'da, rüzgar türbininin sistemin arıza sonrası kararlı durumuna dönebileceği maksimum hata süresinin azaltılması STATCOM ile sağlanırken, bir başka çalışmada değişken yükleme koşulları altında şebekeye bağlı hibrit PV-Rüzgar sistemi için yük bara gerilim ve akım da oluşan toplam harmonik bozulmanın %1 civarında tutulması sağlanmıştır [27]. Başka bir çalışmada ortak bağlantı noktasına STATCOM bağlantısı, doğrusal olmayan yük ve rüzgar türbin sisteminin şebekeye entegrasyonu durumunda oluşabilecek güç kalite sorunlarını iyileştirmek için önerilmiştir. STATCOM 'un rüzgar jeneratörü ve yük için reaktif güç talebini karşılayarak iletim hattı güç kalitesini iyileştirdiği ve akım harmoniklerini azalttığı gözlemlenmiştir [28]. Benzer bir çalışmada rüzgar türbininin şebekeye bağlanması nedeniyle oluşan güç kalitesi problemleri sunulmuş ve çözüm olarak STATCOM'un batarya enerji depolama sistemi (BESS) ile ortak bir bağlantı gerçekleştirilmiştir. BESS, dalgalanan rüzgar gücü altında şebekeyi desteklemek için entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile güç kalite iyileştirmesi için yaklaşımın uygulanabilirliğini gözlemlenmiştir [29].

1.1.2. Kontrol Yöntemleri ile FACTS Performansının İyileştirilmesi

Çalışma [30]'da, Mısır'da yerleşik yeni bir topluluğu besleyen bağımsız bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin performansını iyileştirmek amacıyla, DVR kontrolü için

bir dq eksen gerilim sinyallerini düzenleyerek, gerilim kaynağı invertörün IGBT darbelerinin ayarlanmasında, iki ANN denetleyicisi kullanılmıştır. Önerilen kontrolör, arıza olayları sırasında sistemden ayrılmadan üç yenilenebilir kaynağının sürekli operasyonda tutmayı başarmıştır. Çalışma [31]'de, DVR kullanan ÇBAG'lü rüzgar türbini sistemi için arıza geçiş kapasitesindeki iyileştirmeyi araştırmışlardır. Bu amaçla çalışmada DVR için PI tabanlı birleşik ileri besleme ve geri beslemeli gerilim kontrolü tasarlanmıştır. Çalışmada önerilen kontrol ile bağlı olarak DVR 'nin gerilim düşüm azaltma kapasitesi, aktif ve reaktif güç desteği, DC-bağlantı gerilim dengeleme ve arıza akımı kontrolü açısından gelişmenin olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma [32]'de Kendinden ayarlı filtre tabanlı anlık reaktif güç teorisi kontrollü DSTATCOM, ideal olmayan şebeke şartlarında harmoniklerin giderilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için önerilmiştir. Aynı zamanda DSTATCOM'un DC bara gerilimini düzenlemek için adaptif bulanık mantık kontrolü kullanılmış ve bu sayede doğrusal olmayan yük bağlantısı için reaktif güç kompanzasyonu, harmoniklerin azaltılması ve yük dengeleme sağlanmıştır.

Çalışma [33]'te şebekeye bağlı rüzgar enerji santralinin arıza geçiş yeteneğini geliştirmek için balina optimizasyon algoritmasının kullanıldığı Sugeno bulanık mantık kontrolörleri tasarlanmış ve PSCAD ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda önerilen yöntemin hızlı zaman tepkisine, az aşma ve küçük kararlı durum hatasına sahip olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada, Orantılı-İntegral (PI) kontrollü STATCOM tasarımı ve uygulaması analiz edilerek, bulanık mantık kontrollü STATCOM ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarından, bulanık mantık kontrollü STATCOM' un, PI kontrollü STATCOM' a kıyasla daha fazla gerilim dalgalanmasını azaltma ve sistemin kararlılığını sağlama eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir [34].

Meta sezgisel algoritmaları karmaşık, çok amaçlı mühendislik problemlerine optimum çözümler sunabilme yetenekleri nedeniyle, güç sistemlerinde kararlılık, kontrol, yük tahmini, güç akış ve kalitesi gibi sorunlarda kullanılabilecek elverişli yöntemlerdir. Güç sistem iyileştirmeleri için PI/PID tabanlı kontrolörlerin meta sezgisel algoritmalar ile optimize edildiği birçok çalışma mevcuttur. Çünkü optimizasyon ile kontrol sisteminin daha sağlam performansı sergilemesi, güç sisteminde birçok iyileşmeyi beraberinde getirmektedir. Örneğin [35]'te PID kontrolörün optimizasyonu için Lyrebird algoritması (LOA) kullanılırken [36]'da kademeli (1+PI)-PI-PID kontrolörün optimizasyonu için hibrit Yapay Arı Kolonisi – PSO (IABC-PSO) algoritması kullanılmış ve çok kaynaklı

birbirine bağlı güç sistemlerinde güç ve frekansının düzenlenmesi sağlanmıştır. Başka bir çalışmada ise şebekeye bağlı rüzgar generatörün arızalar esnasında geçici kararlılığın iyileştirilmesi için PI kontrolör Altın Kartal Optimizasyonu Algoritması ile (GEOA) optimize edilmiştir [37]. Yine [38]' de şebeke frekans ve gerilim kararlılığı için STATCOM- PI-PID tabanlı hızlandırma (PI-PIDA) kontrolör parametreleri hibrit Deniz Avcısı Algoritması - Yapay Sinek Kuşu Algoritması (MPA-AHA) optimize edilirken, [39] 'da hibrit güç sisteminde reaktif gücü düzenleyerek şebeke kararlılığını sağlamak amacıyla STATCOM-PID kontrol sistem parametreleri Simbiyotik Organizmalar Arama (SOS) ile ayarlanmıştır. PI kontrolörler için önerilen güncel meta sezgisel algoritmaların ortak özellikleri gelişmiş hızlı yakınsama kabiliyetleridir. Çalışma [40]' ta ise PID kontrolde küresel optimizasyon için PID tabanlı arama algoritması tanıtılmıştır.

Çalışma [41]'de PV-DSTATCOM'un PI kontrolör kazançları ve filtre parametreleri hızlı küresel optimuma ulaşabilen ve az hesaplama yükü gerektiren JAYA algoritması ile ayarlanmıştır. JAYA ile tasarlanan PV-DSTATCOM'un performansı, El Bombası Patlama Yöntemi (GEM) ve Öğretim-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ile optimize edilen sistemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, JAYA yöntemi ile daha hızlı yakınsama, daha düşük %THB ve yük değişimlerine karşı daha kararlı bir sistem elde edildiği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada Güneş fotovoltaik (SPV) sistemlerin şebekeye entegrasyonunda, reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için DSTATCOM kullanılmış ve kontrol parametreleri Guguk Kuşu Arama Optimizasyonu (CSO) ile optimize edilmiştir. Sonuç olarak CSO tabanlı kontrol, şebeke entegrasyonunda verimliliği artırdığı ve klasik yöntemlere göre daha esnek bir çözüm sunduğu gözlemlenmiştir [42].

Khad ve Beohor tarafından yapılan çalışmada tarafından yapılan çalışmada DSTATCOM'un performansını artırmak için PI kontrol sisteminde yük akımı ağırlık parametresinin optimum değeri Ağırlıklı Şempanze optimizasyon algoritması ile elde edilmiş ve harmonik bozulma azaltılmıştır. Bu sayede dengesiz yük koşulları altında mevcut harmonik bozulma azaltılmış ve şebeke güç kalitesi iyileştirilmiştir [43]. Diğer çalışmada rüzgarla çalışan indüksiyon generatör ile dizelle çalışan senkron generatörün bulunduğu hibrit güç sisteminde STATCOM performasını iyileştirmek için PI kontrol sistemi kazanç parametre değerleri sırasıyla GA, ANN, ANFIS ile optimize edilmiş ve bara gerilim profili iyileştirilmiştir. Kullanılan yöntemler, arz-talep dengesizliği

durumlarında bara gerilim profilini iyileştirme performansları karşılaştırılmıştır [44]. Bir başka çalışmada ise, rüzgar ve PV sistemden oluşan hibrit güç sistemi için STATCOM, PI kontrol parametrelerinin optimizasyonunda GA ile BFA algoritmaları kullanılması sonucunda dengesiz yük koşullarında oluşan yük gerilim dalgalanmalarının azaltılarak sistem kararlılığının artırılması sağlanmıştır [45].

Çalışma [46]'de mikro şebekelerde ortaya çıkabilecek gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulma ve düşük güç faktörü gibi sorunların üstesinden gelmek için Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ve Model Öngörülü Kontrol (MPC) tabanlı yeni bir kontrol yöntemi önerilmiştir. ANFIS-MPC tabanlı kontrolör ile referans akımlarının üretilmesi ve anahtarlama sinyallerinin optimizasyonu sağlanmıştır. Sistem, şebekeye bağlı/ada modunda test edilerek, harmonikleri azaltmada ve güç faktörünü iyileştirmede etkinliği simülasyonlarla doğrulanmıştır. Aynı zamanda geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi dinamik performans ve kararlılık sağlamıştır. Başka bir makalede, DSTATCOM kontrolü için ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) tabanlı MPC yöntemi önerilmiştir. VIKOR yöntemi, mevcut tüm anahtarlama durumlarını değerlendirerek ideal çözüme en yakın olan optimal durumu seçmektedir. Bu sayede, sunulan kontrol yaklaşımı ile DSTATCOM kontrolünde çok kriterli bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilerek, DC-link kapasitör gerilim dengesizliği giderilmesi, anahtarlama frekansı ile kayıpların azaltılması ve ağırlık faktörü ayarlama karmaşıklığının ortadan kaldırılması sağlanmıştır [47].

Başka bir araştırmada güç kalite sorunları için Bulanık Mantık-PID denetleyici tarafından kontrol edilen Akım Kaynağı Dönüştürücü (CSC) tabanlı D-STATCOM önerilmiştir. Bulanık-PID denetleyici, kontrol parametrelerini dinamik olarak ayarlayarak, geleneksel yöntemlere kıyasla güç kalitesi bozulmalarını telafi etmede üstün bir performans sunmuştur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar ile, Bulanık-PID kontrol sisteminin D-STATCOM'un değişen yük koşulları altında gerilim kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiği, harmonik bozulmayı azalttığı gözlemlenmiştir [48]. Çalışma [49]' da yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının yaygınlaşması, endüktif yüklerin artması, ani yük değişimleri nedeniyle ortaya çıkan dengesiz akımlar, harmonik bozulmalar ve düşük güç faktörü gibi güç kalitesi sorunlarının çözülmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla PV-DSTATCOM kullanılarak, PV sisteminin aktif güç enjeksiyonu ile DSTATCOM'un reaktif güç kompanzasyon yetenekleri birleştirilmiştir. Geleneksel PI kontrolörün yavaş

dinamik performansını iyileştirmek için Petri Legendre Bulanık Sinir Ağı tabanlı akıllı bir kontrolör önerilmiştir. Kontrolör Petri ağları, bulanık mantık, sinir ağları ve Legendre polinomlarının avantajlarını birleştirerek hızlı öğrenme ve yüksek uyum sağlama yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak Önerilen PLFNN tabanlı PV-DSTATCOM, harmonik bozulmayı azaltmada, güç faktörünü düzeltmede ve gerilim desteği sağlamada geleneksel kontrolörlere kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

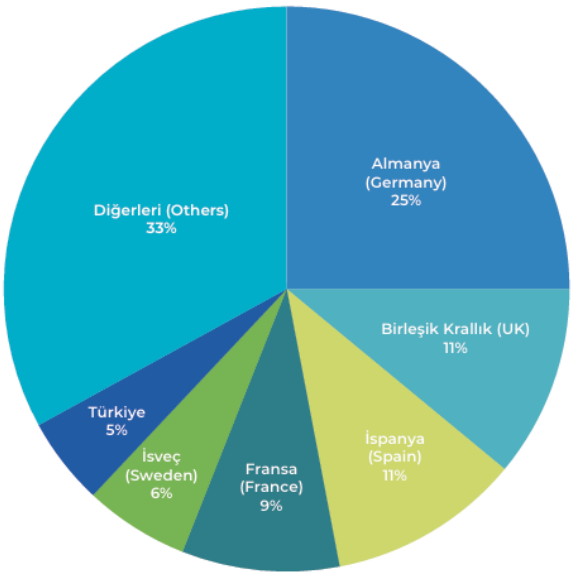
Çalışma [50]'de rüzgar türbin sistemlerinin doğrudan şebeke bağlantısı durumunda ortaya çıkabilecek gerilim düşüm, dalgalanma, titreşim ve harmonikler gibi güç kalite sorunlarını çözmek için çevrimiçi öğrenme tabanlı (BP- Geri Yayılım) ANN-BP tabanlı kontrole sahip DSTATCOM kullanımı önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal olmayan dengesiz yükleme koşulları için önerilen yöntem ile sistemin güç kalitesini iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada güç sistem kalite ve kararlığını sağlamada DSTATCOM performansını iyileştirmek için akıllı ve optimize edilmiş bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda PI kontrolör parametrelerini hassas bir şekilde ayarlamak ve optimum kontrol ayarlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için Beluga Balinası Optimizasyonu (BWO) ile Kademeli Korelasyon Büyüyen Derin Öğrenme Sinir Ağı (CCG-DLNN) birlikte kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan BWO-CCG-DLNN yaklaşımının harmonikleri azaltmaya, yenilenebilir enerji sistemindeki kayıpları en aza indirerek, güç sistem kalitesini iyileştirmeye katkı sağladığı gözlemlenmiştir [51].

Çalışma [52]'de rüzgar ve PV bağlı şebekede dengesiz yüklenme koşullarındaki harmonik bozulmayı azalmak için Explainable Artificial Neural Network (XANN) tabanlı DSTATCOM kontrolü önerilirken, [53] 'te rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu zayıf şebekelerde güç kalitesini artırmak için ANFIS kontrollü DSTATCOM modeli kullanılmıştır. [54]'de farklı dengesiz yük ve kaynak şartlarında nötr akımı ile harmonik bozulmaları azaltmak amacıyla DSTATCOM kontrolü için iki farklı ANN denetleyicisi tasarımı önerilmiştir. [55]'te ise rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebeke de oluşabilecek bozulmalar esnasında ortak bağlantı noktasında meydana gelen güç değişimlerine göre FACTS cihazları için PWM darbe sinyalini üretebilecek derin öğrenme tabanlı kontrol tasarımı önerilmiş ve güç kalite sorunları azaltılmıştır. Çalışma [7]'de DSTATCOM kontrolü için Derin İnanç Ağı (DBN) ve Evrişimsel Sinir Ağı (CNN)

tabanlı kontrol sistemleri tasarlanmıştır. Önerilen kontrol modelleri geleneksel PI kontrol ile karşılaştırılmış ve güç sistem katkıları sunulmuştur.

1.2. Rüzgar Enerjisi

Günden güne artan enerji talebine karşılık, fosil yakıtların tükenmesi ve olumsuz çevre etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar hem ülkemizde hem de Dünyada artış göstermektedir. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan önemli potansiyele sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) 2025 Ocak ayı raporuna göre, Avrupa'da 2024 yılı boyunca bunun %84'ü karasal, %16'sı deniz üstü olmak üzere 16,4 GW yeni rüzgar kapasitesi sisteme entegre edilmiştir. Avrupa rüzgar enerjisi kurulu güç bakımından Almanya ilk sırada yer alırken, Türkiye 6.sırada yer almaktadır. Avrupa'da ülkelere göre kümülatif rüzgar enerjisi kurulumları Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Dünya genelinde ise 520,68 GW'lık rüzgar kurulu güç kapasitesi ile Çin lider durumdadır. 2024 yılı boyunca Türkiye'de 1.310,07 MWm yeni rüzgar yatırımı gerçekleştirilmiş ve yıl sonu itibarıyla Türkiye'deki net rüzgar kurulu güç 13.792,50 MWm değerine ulaşmıştır. Türkiye'deki rüzgar enerjisi santrallerinin 2010-2024 yıllarına ait kurulum miktarları Şekil 2'de gösterilmiştir [56].



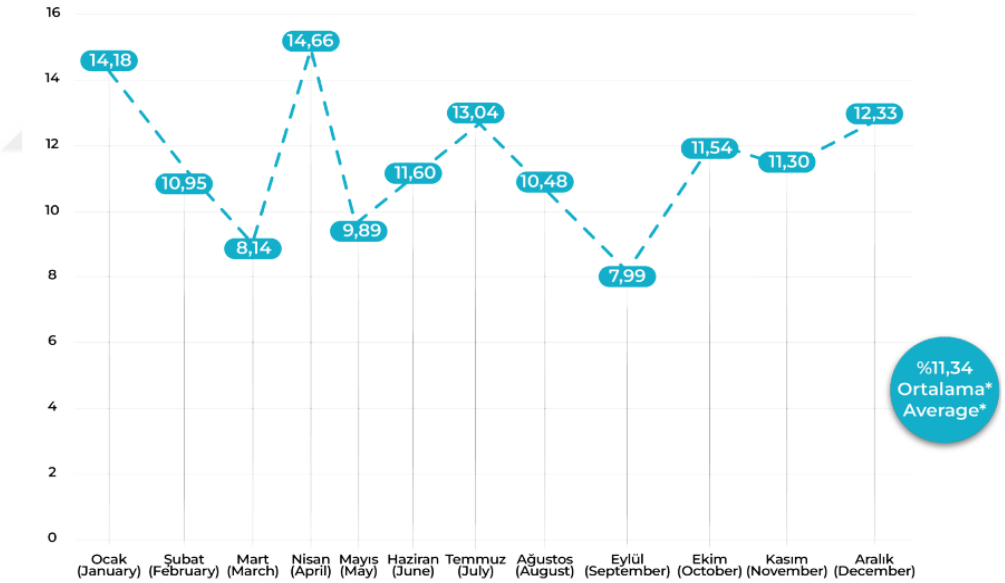
Şekil 1. 1. Avrupa'da ülkelere göre kümülatif rüzgar enerjisi kurulumları

TÜREB 2025 Ocak ayı raporuna göre, 2024 yılında Türkiye'de toplam elektrik üretiminin %11,34'ü rüzgar enerjisinden karşılanmıştır. Elektrik enerjisi üretiminde

rüzgar enerjisinin aylara göre yüzde payı Şekil 1.2'de gösterilmiştir. En yüksek katkı payı ise %14,66 ile Nisan ayına aittir [56].



Şekil 1. 2. Türkiye'deki rüzgar enerjisi santrallerinin yıllık kurulum miktarları



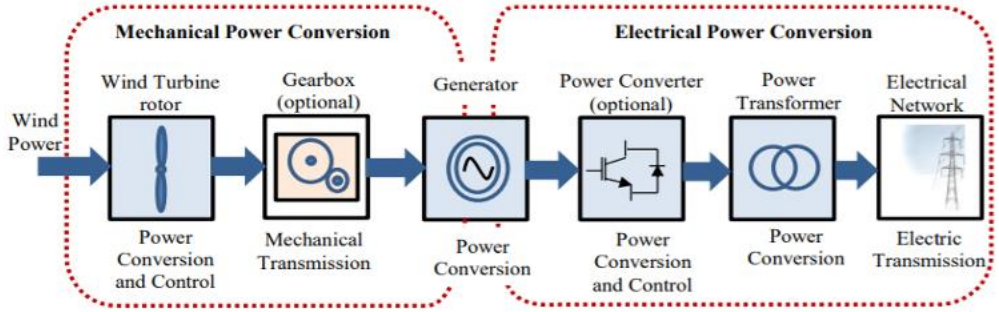
Şekil 1. 3. Türkiye'de rüzgar enerjisi santrallerinin aylık elektrik üretimindeki yüzde payı

1.3. Rüzgar Türbin Sistemleri

Rüzgâr türbin sisteminde rotor tarafından rüzgâr enerjisi mekanik enerjiye daha sonra generatör ile elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve elde edilen elektik enerjisi trafo ve iletim hatları aracılığıyla şebekeye aktarılmaktadır. Şekil 4'te rüzgar türbin sisteminin elektrik enerjisi üretim aşamaları gösterilmiştir. Rüzgar türbin sistemlerinde yer alan güç

elektroniği elemanları ve kontrol sistemleri, rüzgarın değişken yapısından olumsuz etkilenen elektrik enerji kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [57,58].

Rüzgar türbin sistemlerinin verimli bir performans sergileyebilmesi için tüm bileşenleri dikkatli bir şekilde tasarlanarak entegre edilmelidir. Standart bir rüzgâr türbin bileşenlerini, kule, rotor, dişli kutusu, hız şaftları, generatör, sensörler, dümen ve fren sistemi şeklinde ifade edebiliriz [59].

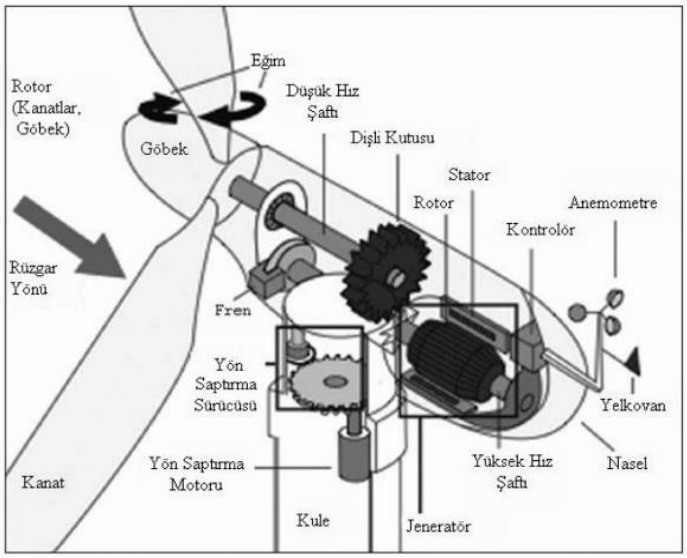


Şekil 1. 4. Rüzgar türbin sistemi elektrik enerjisi üretim aşamaları

Kule, genellikle çelik veya beton malzemeden yapılan rüzgar türbini taşıyan kısımdır. Boyları yaklaşık 20-30 metre civarında olan kuleler, boru veya kafes biçiminde tasarlanabilir. Boru tipi kuleler daha emniyetlidir [60]. Rotorlar, kanat ve göbek şeklinde iki kısımdan oluşan rüzgar enerjisini mekanik güce çeviren kısımdır. Genellikle 2 veya 3 kanatlı olacak şekilde cam elyafla güçlendirilmiş plastik malzemeden üretilirler. Türbinin güç verimi rotor kanatlarının profil ve malzemesine bağlıdır. Dişli kutusu, kanat milinin düşük devir sayısını generatörün ihtiyaç duyduğu yüksek devir sayısına çıkararak, düşük hızlı rotorunun yüksek hızlı generatöre bağlanmasını sağlamaktadır. Çok kutuplu senkron generatörler, şebekeye doğrudan bağlı olmadıkları için düşük hızlıdırlar ve çoğunlukla yapılarında dişli kutusu bulundurmazlar [61]. Rüzgar türbin sistemleri aşırı rüzgar veya arıza anında kontrolden çıkarak ani ivmelenebilir. Bu durumda kanat açısının değiştirilmesi prensibine dayanan aerodinamik fren sistemi devreye girmektedir. Aerodinamik frenin arızalanması durumunda ise bir disk freni olarak dişli kutusuna yerleştirilen mekanik fren mekanizması çalışmaya başlar [59]. Şekil 1.5'de rüzgar türbinini yapısındaki elemanlar ayrıntılı olarak gösterilmiştir [62,63].

Rüzgar türbin sisteminin en önemli elemanlarından biri ise mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren generatörlerdir. Rüzgar türbin sistemlerinde doğru akım (DC), senkron ve asenkron olmak üzere 3 farklı generatör kullanılabilir. Sabit mıknatıslı ve

doğrultucu ile çalışan DC generatörlerinin güç kapasiteleri sınırlı olduğu için genellikle şebekeden bağımsız küçük güçlü türbin sistemlerinde tercih edilirler. Asenkron generatörler sağlam ve basit yapıları, düşük maliyetli olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar. Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG), Rotoru Sargılı Asenkron Generatör ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan asenkron generatörlerdir. Uygulamada en çok tercih edilen asenkron generatör ÇBAG'lerde kullanılan tam ölçekli konvertör ve kontrol sistemleri ile generatörün rotor hızı kontrol edilerek reaktif güç ihtiyacı karşılanmakta ve ani akımlar sınırlandırılmaktadır. Bu durumlar, güç kalitesini olumsuz etkileyen türbin entegrasyon etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Senkron generatörler asenkron generatörler farklı olarak rotor manyetik alanı, rotor sargılarından doğru akımın akmasıyla veya sabit mıknatıslar tarafından sağlandığı için mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymazlar. . Rotoru Sargılı Senkron Generatörler (RSSG) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörler (KMSG) rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan senkron generatörlerdir. Bu generatörlerin güç faktörleri ile verimleri yüksek olmasına karşılık, bakım ihtiyaçları vardır ve maliyetlidirler [57,63,64].

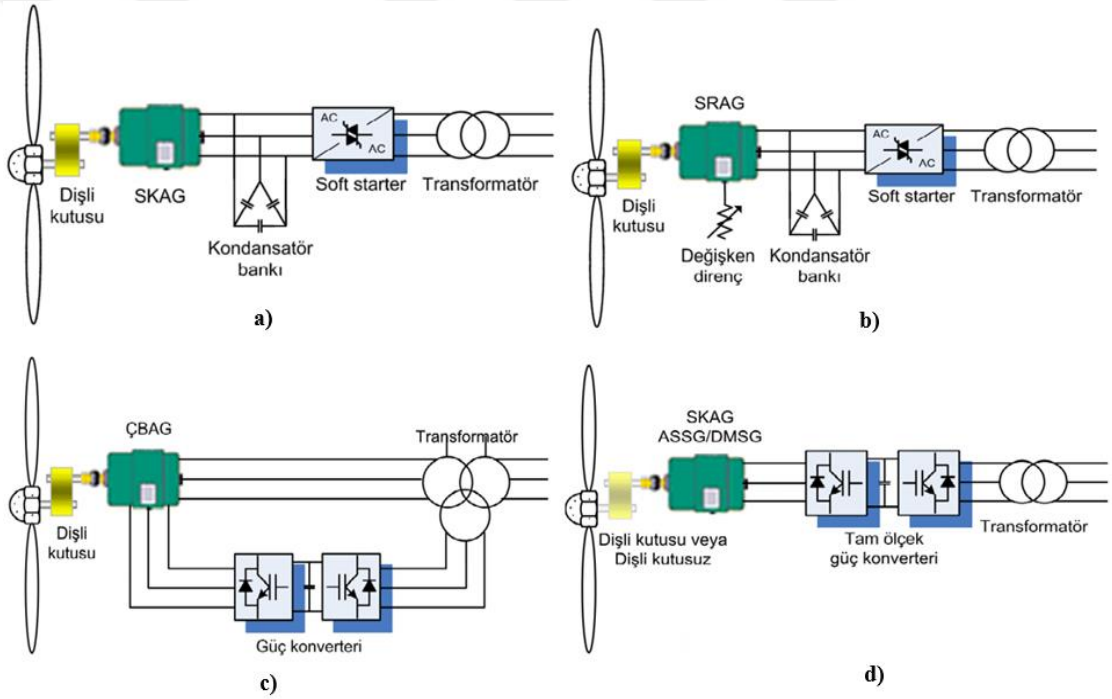


Şekil 1. 5. Rüzgar türbin elemanları

1.4. Rüzgar Türbin Sistem Modelleri

Senkron generatörler sadece değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılırken, asenkron generatörler sabit ve değişken hızlı rüzgar türbin sistemlerinde kullanılabilirler. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbin sistem modelleri Şekil 1.6'da

gösterilmiştir. Yapılarında SKAG'leri bulunduran A Tipi rüzgar türbin sistemleri sabit hızlı rüzgar türbin sistemleridir. Kondansatör ve soft-stater ile reaktif güç ihtiyaçları karşılanarak ani akımlar sınırlandırılır. Ancak hız kontrol özellikleri yoktur ve rüzgar hızındaki dalgalanmalar doğrudan türbin yapısında mekanik baskılara yol açar. Bu durum şebekede güç dalgalanmalara neden olarak güç kalite sorunlarını artmasını sağlamaktadır. B tipi rüzgar türbin sistemlerinde değişken rotor direncine sahip RSAG'ler kullanılmaktadır. Bu türbinlerde direnç değerinin değiştirilmesi ile türbin hızının belli bir ölçüde kontrol gerçekleştirilir. A ve B tipi rüzgar türbin sistemlerde kondansatör grubu ve soft-stater ile türbinlerin reaktif güç ihtiyaçları karşılanarak ani akımlar sınırlandırılmaktadır.



Şekil 1. 6. Rüzgar türbin sistem modelleri a) A tipi b) B tipi c) C tipi d) D tipi

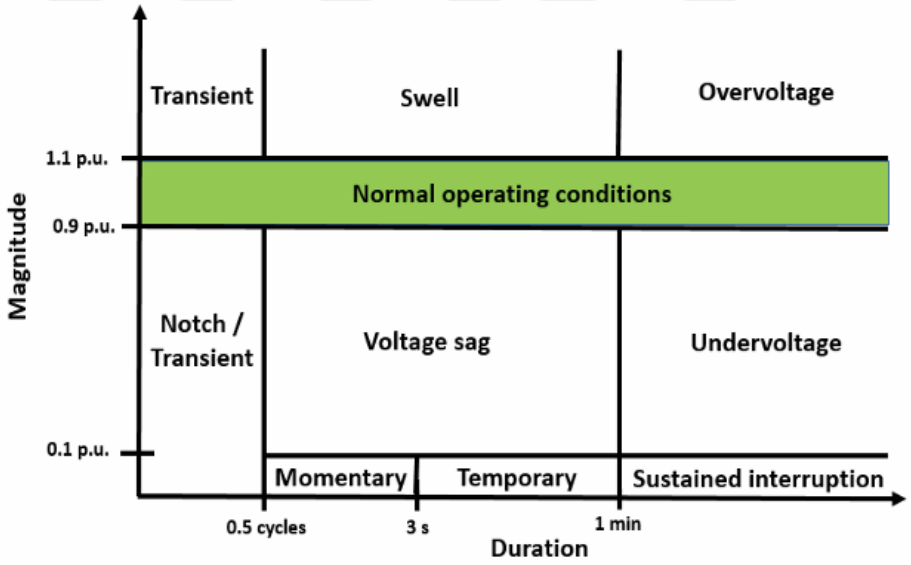
C tipi rüzgar türbin sistemleri yapısında ÇBAG'ler yer almaktadır. ÇBAG'lü rüzgar türbin sisteminde, generatörün stator sargıları şebekeye doğrudan bağlanırken, rotor sargıları kısmi ölçekli güç konventörü ile bağlanmaktadır. D tipi rüzgar türbin sistemlerinin yapısında ise SKAG, RSAG veya KMSG'lerden biri bulunmakta ve generatörler tam ölçekli güç konventörü ile şebekeye bağlanmaktadır. C ve D tipi rüzgar türbin modellerinin yapısında yer alan bu güç konvertörleri ve kontrol sistemleri sayesinde rotor hızı geniş aralıkta kontrol edilerek, türbin reaktif güç ihtiyacı

karşılanmakta ve ani akımlar sınırlandırılmaktadır. Bu durum şebeke güç kalite sorunlarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [57,64].

1.5. Güç Kalite Sorunları

1.5.1. Gerilim Değişimleri

Şebekede oluşabilecek güç kalite sorunlarından biri gerilim değişimleridir. Yük ve üretim arasındaki dengenin sürekli olarak değişmesi, aşırı yüklenme, arızanın oluşması veya büyük bir kapasitör bankasının enerjilendirilmesi gibi durumlar gerilim değişimlerine neden olmaktadır. Rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebekelerde de, türbin yapısı ve kontrol işlemine bağlı olarak, ani gerilim değişimi sorunlarıyla karşılaşılabilir. Örneğin SKAG'lü rüzgar türbin sistemlerinin reaktif güç çekişi özellikle zayıf şebekelerde ciddi gerilim düşümlerine neden olabilir. Aynı zamanda rüzgarın değişken yapısına bağlı olarak türbin tarafından üretilen güç değerleri sürekli değişmesi de gerilim kalitesini etkileyen faktörlerden biridir [64,65].



Şekil 1. 7. IEEE 1159 standartına göre gerilim bozulmalarının sınıflandırılması

Gerilim düşümü (sarkması), nominal rms hat gerilim değerinin %10 ile %90 aralığında bir değere ulaşması durumuyken, gerilim yükselmesi, nominal rms hat gerilim değerinin %110'undan daha büyük değerlere ulaşması durumudur. Gerilim değişimleri yarım periyot ile 1 dk zaman aralığında gerçekleşiyorsa kısa süreli değişim, 1 dk'dan daha uzun ise uzun süreli değişim olarak tanımlanmaktadır. Uzun süreli değişimlerde gerilim değeri , nominal rms hat gerilim değerinin %110'dan büyükse aşırı gerilim, % 90'ından küçükse

düşük gerilim ve %10'dan küçükse uzun sürekli kesinti olarak ifade edilmektedir[66]. Şekil 1.7'de IEEE1159 standartlarına göre gerilim bozulmalarının sınıflandırılması gösterilmiştir [67].

1.5.2. Gerilim Dalgalanmaları

Ani yük değişimleri, topraklama hataları, kısa devre gibi sistem arızaları gerilim dalgalanmasını tetikleyen olaylardan bazılarıdır. Bu durumların dışında rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebekelerde, rüzgar hızı ile yönünün değişken olması, türbin kanat gölgesi, rotor hizalama, kanat yönlendirme ve eğim hataları şebekede gerilim dalgalanmalarına neden olabilir. Gerilim dalgalanmaları, güç kalitesinin azalmasına ve sistemde kararsızlığa yol açmaktadır. 10dk'lık gerilim dalgalanma miktarı, IEE 61400-21standartlarına göre nominal gerilimin ±%5'lik sınırları içerisinde olmalıdır. Standart dahilinde olmayan gerilim dalgalanmaları güç kalitesinin azalmasına, sistemde kararsızlığa ve tüketici tarafında ekipmanların arızalanmasına yol açmaktadır [68]. Çıkış geriliminde meydana gelen hızlı dalgalanmalar, gerilim titremesi (fliker) olarak tanımlanmaktadır. Kısa süreli fliker şiddeti (P_{st}) 10 dk'lık süre için ölçülen fliker değeri iken, uzun süreli fliker şiddeti (P_{lt}), 2 saatlik kısa süreli Pst ölçümlerinden elde edilen ortalama fliker değeridir. Bu duruma bağlı olarak P_{lt} değeri Denklem 1.1'deki gibi hesaplanmaktadır. Fliker rahatsızlık eşiği insandan insana farklılık göstermesine karşılık, insan göz ve sinir sistemi için Pst değerinin 1'den küçük olması önerilir. EN50160 standartına göre fliker sınır değerleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir [63,69].

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{P_{st}^3}{12}\right)\right]^{1/3} \tag{1.1}$$

Tablo 1. 1. EN50160 fliker sınır değerleri

Gerilim Seviyesi	P_{st}	P_{lt}
V >154 kV	0.85	0.63
35 kV< V ≤ 154 kV	0.97	0.72
1kV < V ≤ 35kV	1	0.8

1.5.3. Gerilim ve Akım Dengesizliği

Akım ve gerilim dengesizliği, üç fazlı sistemlerde fazların büyüklüklerinin birbirinden farklı olması ve/veya faz açıları arasındaki 120^0'lik farkın bozulması durumudur. Akım ve gerilim dengesizliği, dengesiz yük bağlantıları, arızalı motor sargıları ve hatalı faz bağlantıları durumlarında oluşan güç kalite sorunlarından biridir. Aynı zamanda, rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebekelerde rüzgardaki ani değişikler ile birden fazla türbinin aynı anda farklı güç üretmesi, kontrol ile anahtarlama sinyallerinin düzgün ayarlanmaması sonucu türbin sistemindeki dönüştürücülerin asimetrik davranışlar sergilemesi sonucunda da akım/gerilim dengesizliği oluşabilir. Gerilim/akım dengesizlik miktarı, üç faz gerilim veya akımlarının ortalama değerinden olan maksimum sapmanın, ortalama değere oranlanıp yüzde cinsinden ifade edilmesi şeklinde tanımlanabilir. Denklem 1.4 ve Denklem 1.5'te gösterilmiştir. $V_{max,sapma}$, faz gerilimlerin ortalama gerilim değerinden en büyük farkı iken $I_{max\ sapma}$, faz gerilimlerin ortalama gerilim değerinden en büyük farkıdır. %5'ten fazla olan dengesizlikler, hassas ekipmanlara zarar verebilir [70,71]. Gerilim dengesizliği, özellikle indüksiyon motorlar için büyük bir endişe kaynağıdır çünkü temel frekansın iki katında yüksek akım ve güç salınımlarına yol açarak tork salınımlarına ve titreşimlere neden olabilir, bu da verimliliği azaltırken sargı sıcaklığını ve kayıpları artırmaktadır. Yine şebekedeki dengesizlikler, DC kapasitör ömrünü önemli ölçüde kısalmasına neden olmaktadır [72].

$$V_{ort} = \frac{V_a+V_b+V_c}{3} \tag{1.2}$$

$$I_{ort} = \frac{I_a+I_b+I_c}{3} \tag{1.3}$$

$$Gerilim\ Dengesizliği(\%) = \frac{|V_{\max sapma}|}{V_{ort}} \times 100 \tag{1.4}$$

$$Akım\ Dengesizliği(\%) = \frac{|I_{\max sapma}|}{I_{ort}} \times 100 \tag{1.5}$$

1.5.4. Frekans Kararlılığı

Arz- talep arasındaki fark sistem frekans değerini etkilemektedir. Üretimin tüketimden fazla olması frekans değerini artmasına daha az olması ise frekans değerinin azalmasına neden olmaktadır. Güç sisteminin frekans kararlılığı, üretim ve tüketim arasındaki dengesizlik sonrasında sabit frekans değerini koruyabilme yeteneğidir ve kontrol stratejileri ile yenilenebilir enerjinin penetrasyon seviyesine bağlı olarak değişir. Yenilenebilir enerji anlık penetrasyon seviyesinin %50'nin üzerinde olması durumunda

şebeke frekans kararlığı önem verilmesi gereken güç kalite sorunlarından biri olmaktadır [73].

Tablo 1. 2. EN50160 standartına göre şebeke frekans sınırları

Frekans Aralığı	Minimum Operasyon Süresi
51,5 Hz -52,5 Hz	10 dakika
50,5 Hz -51,5 Hz	1 saat
49 Hz -50,5 Hz	Sürekli
48,5 Hz – 49 Hz	1 saat
48 Hz - 48,5 Hz	20 dakika
47,5 Hz - 48 Hz	10 dakika

Rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebekelerde sürekli çalışma için Tablo 1.2'de verilen farklı zaman aralıkları için frekans değerinin izin verilen sınırlar dahilinde olması gerekir. Bu durumda rüzgar türbin sisteminin frekans kontrol yeteneğinin olması önem kazanmaktadır. Ulusal Elektrik Şebeke Yönetmeliğine (EPDK) göre şebeke frekansını 50 Hz'i aşması durumunda, rüzgar türbinin ürettiği aktif güç değerini düşürmesi ve Tablo 1.2'deki frekans sınır değerlerini karşılanmaması durumunda şebekeden ayrılması gerekmektedir [63].

1.5.5. Harmonik Bozulma

Harmonik, temel sinüs dalga yapısının bozulması durumudur. Harmonik bileşenler temel frekansın tam katları veya kesirli katları şeklinde olabilir. Kesirli katları şeklindeki harmoniklere ara harmonikler adı verilmektedir. Harmonikler invertörler, DC dönüştürücüler, ark fırınları, statik VAr kompansatörleri, trafolar, değişken frekanslı motor sürücüler, civa buharlı lambalar gibi lineer olmayan yüklerden dolayı oluşmaktadır. Sonuçta harmonik bileşenler, şebekedeki kayıpları artırarak veriminin düşmesine, iletkenlerin daha fazla ısınmasına, gerilim düşümlerinin artmasına, elektronik cihazlar ile haberleşme sistemlerinin bozulmasına yol açmaktadır. Harmonik bozulmaların neden olduğu olumsuz etkiler, filtre devreler ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Gerilim ve akımlar için toplam harmonik bozulma (THB) değeri, Denklem 1.6'daki gibi harmonik bileşenlerin rms değerlerin kareleri toplamının karekökünün alınması ve temel bileşenin

rms değerine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Q_h harmonik bileşenlerin rms değerini, Q_1 ise temel bileşenin rms değerini ifade etmektedir [68].

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Q_h^2}}{Q_1} \times 100 \tag{1.6}$$

Rüzgar türbin sisteminin şebeke entegrasyon etkilerinden biri de harmonik bozulmalardır. Değişken hızlı rüzgar türbin sistemlerinde özellikle tristör tabanlı güç elektroniği dönüştürücülerin kullanılması, şebeke de ciddi harmonik bozulmalara yol açmaktadır. Bu nedenle, rüzgar türbin sistemlerinde genellikle, harmonik bozulma etkisi daha küçük olan 3 kHz"in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışan transistör tabanlı güç elektroniği dönüştürücüler tercih edilmekte ve filtreleme işlemleri ile etki azaltılmaktadır. EN50160 standartına göre şebeke ortak bağlantı noktası gerilimi için harmonik sınır değerleri Tablo 1.3'de verilmiştir [63]. Standartlara göre,

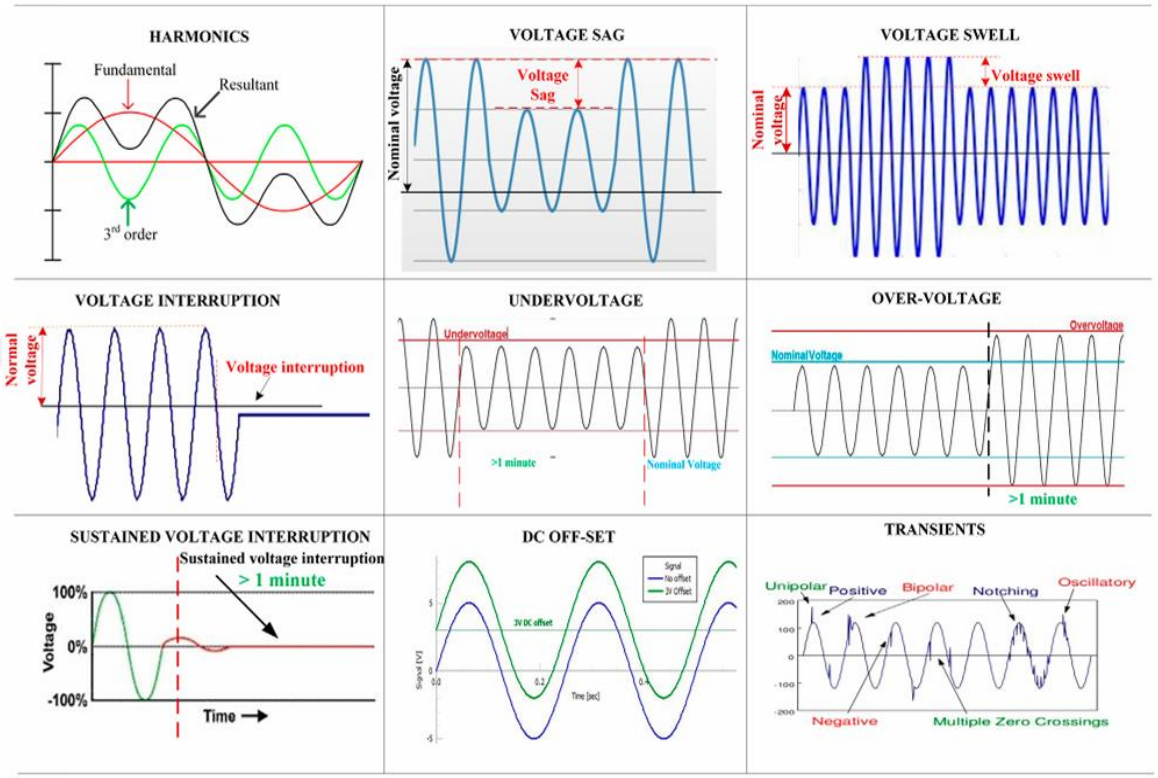
Tablo 1. 3. EN50160 standartına göre gerilim harmonik sınırları

OBN Bara Gerilimi	Tekil Harmonik Bozulma (%)	Toplam Harmonik Distorsiyon (%THB)
V≤ 1 kV	5	8
1kV < V ≤ 69 kV	3	5
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	3	5

- Bir gün boyunca ölçülen tüm 3 saniyelik harmonik değerlerin %99'u, Tablo 1.3'te verilen limit değerlerin 1.5 katını aşmamalıdır.
- Bir hafta boyunca ölçülen tüm 10 dakikalık ortalama harmonik değerlerin %95'i, Tablo 1.3'te verilen temel limit değerlerinden küçük olmalıdır.

Güç sisteminde yaygın olan bazı güç kalite sorunları için dalga formları Şekil 1.8'de gösterilmiştir [74]. Şekildeki ilgili güç kalite sorunları sırasıyla harmonik bozulma, gerilim düşümü, gerilim yükselimi, kesinti, alçak gerilim, aşırı gerilim, kalıcı kesinti, DC ofset ve geçici salınımlardır. DC ofset veya DC sapma, alternatif akım sinyaline doğru akım bileşeninin eklenmesi durumudur. Bu durumda alternatif akım sinyalinin yapısı bozulur ve sıfır ekseni etrafında simetrik salınım yapamaz. DC ofset genellikle trafolarda asimetrik manyetik doyum, dönüştürücülerde asimetrik anahtarlama veya tetikleme

hataları, ani gerilim darbeleri ve arızalanmalar durumunda oluşmaktadır. Elektrik sistemlerinde aşırı ısınmaya neden olarak sistem kararlılığını olumsuz etkilemektedir [74,75].

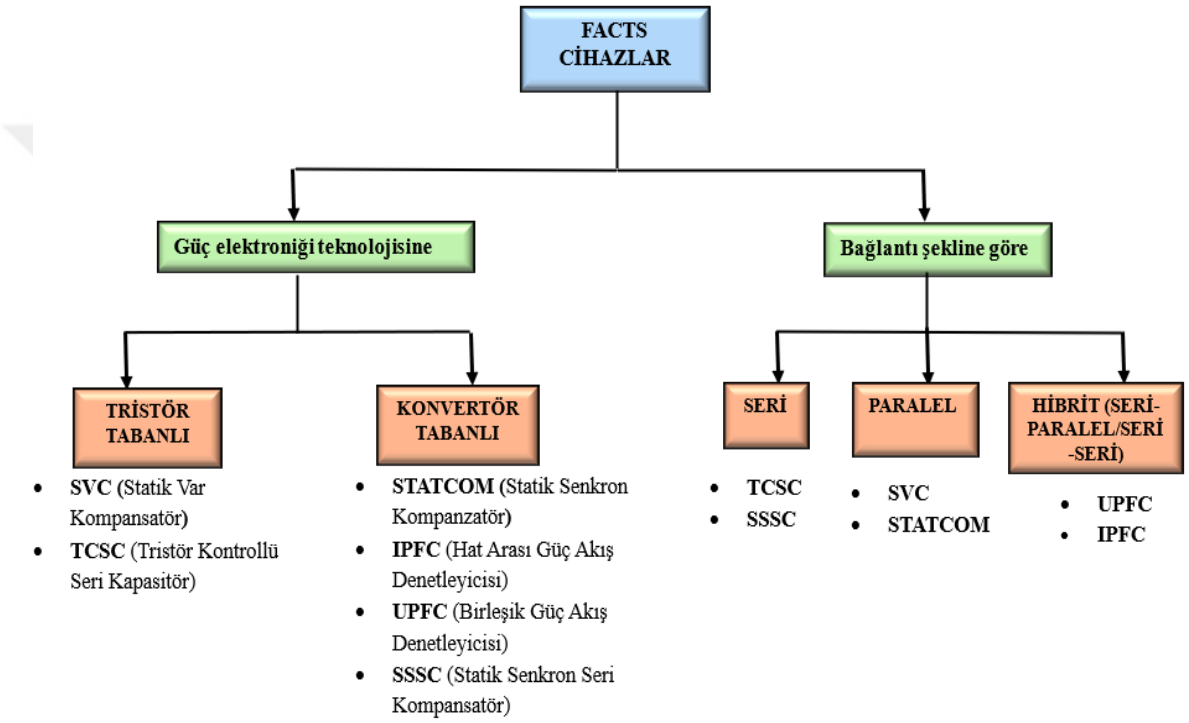


Şekil 1. 8. Güç kalitesi sorunlarının dalga formları

1.6. FACTS Cihazlar

Güç sistemlerinde reaktör ve kondansatör grupları ile gerçekleştirilen kompanzasyon işleminin en önemli sorunu hızlı tepki vermemesidir. Bu durum, kompanzasyon uygulamalarında anahtarlama hızlarının yüksek olması nedeniyle güç elektroniği elemanlarının yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS), güç elektroniği tabanlı cihazlardır. Bu cihazların temel amacı şebekenin endüktif veya kapasitif reaktif güç ihtiyacını en hızlı bir şekilde sağlayarak kompanzasyon işlemini gerçekleştirmektir. Bu sayede gerilim regülasyon işleminin gerçekleştirilmesine, güç sistem kararlığının iyileştirilmesine, salınımların sönümlenmesine, iletim hattı yük taşıma kapasitesinin artırılmasına ve verimi artırarak kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadırlar. Bu cihazların önemli avantajları esneklikleri, kontrol edilebilmeleri ve hızlı yanıt vermeleridir [76-78].

FACTS cihazları farklı şekillerde incelenebilir. Yapısındaki güç elektroniği teknolojisine göre tristör ve konverter bazlı FACTS cihazları şeklinde sınıflandırılabileceği gibi, bağlantı durumuna göre seri, paralel ve (hibrit seri-paralel/seri-seri) kombinasyonlu FACTS cihazları şeklinde sınıflandırılabilirler [79]. Bu cihazların sınıflandırılması ve ilgili FACTS cihazları Şekil 1.9'da gösterilmiştir. FACTS cihazlarının bağlantı şekilleri Şekil 1.10'da gösterilmiştir [80].



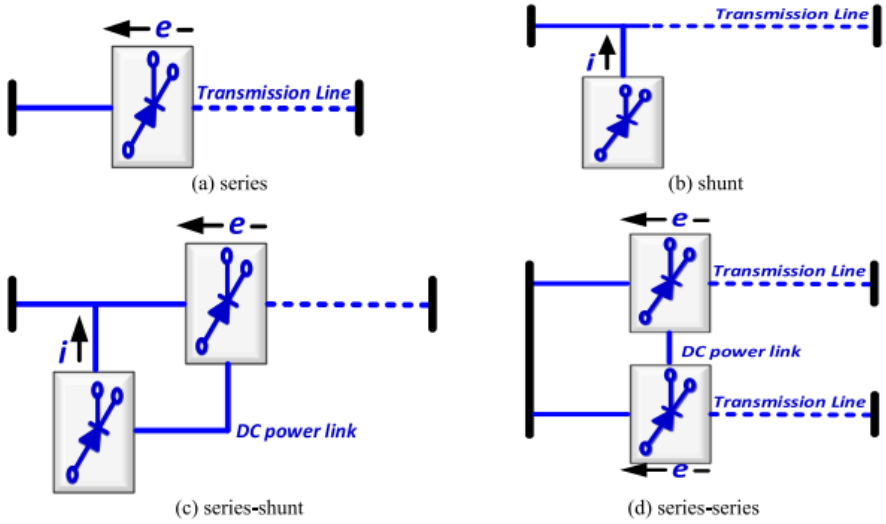
Şekil 1. 9. FACTS cihazlarının sınıflandırılması

Statik Var Kompansatör (SVC), sisteminin kararlılığı ve kontrolünü sağlamak amacıyla gerilim gibi güç sistem parametrelerini kontrol ederek reaktif güç üreten veya tüketen paralel FACTS cihazlarından biridir. Düşük maliyet, basit kontrol ve hızlı cevap yeteneği sağladığı önemli avantajlarından bazılarıdır [77].

SVC'lerin yapısında bulunabilecek elemanlar:

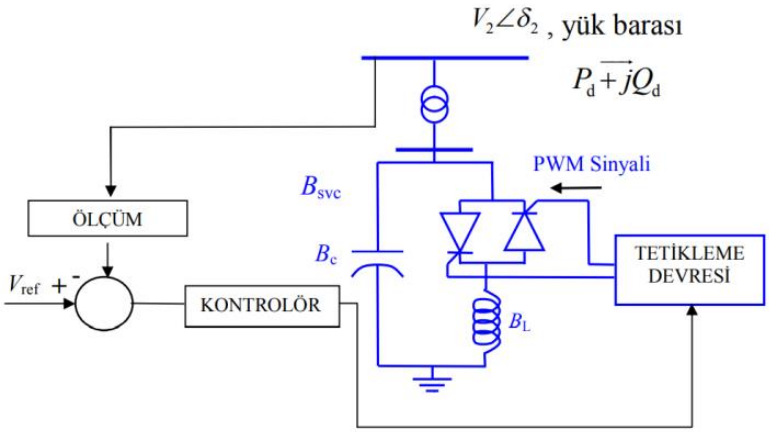
- Tristör Kontrollü Reaktör (Thyristor Controlled Reactor – TCR),
- Tristör Anahtarlamalı Reaktör (Thyristor Switched Reactor – TSR)
- Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (Thyristor Switched Capacitor – TSC)
- Mekanik Anahtarlı Kapasitör (Mechanically Switched Capacitor – MSC),

- Mekanik Anahtarlı Reaktör (Mechanically Switched Reactor – MSR),
- Sabit Kapasitör (Fixed Capacitor – FC),
- Sabit Reaktör (Fixed Reactor – FR)
- Harmonik Filtreler



Şekil 1. 10. FACTS cihazlarının bağlantı şekilleri a) seri b) paralel c) seri-paralel d) seri- seri

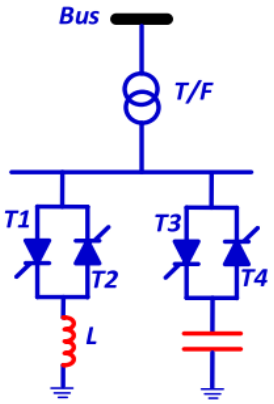
TCR ateşleme açısının değişmesi sonucu edilen değişken empedanslı bir kontrolör özelliği gösterir ve ateşleme açısı 180° iken TCR akımı minimum, 90° iken ise maksimum değerdedir. Yani SVC'nin toplam suseptans değeri, tristörlerin 90° -180° açı aralığında ateşlenmesiyle kontrol edilmektedir [81].



Şekil 1. 11. FC-TCR tasarımlı SVC modeli ve kontrolü

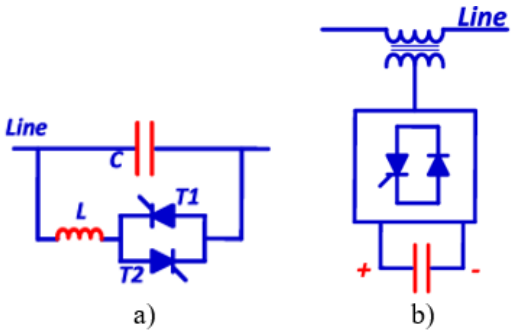
SVC tasarımlarında en yaygın olanları TSC-TCR tasarımı ile FC-TCR tasarımıdır. Şekil 1.11'de FC-TCR tasarımlı SVC modeli, Şekil 1.12'de ise TSC-TCR tasarımlı SVC

modeli gösterilmiştir[80]. SVC'nin temel kontrol diyagramında referans gerilim ile yük bara gerilimi arasındaki fark değerinden tetikleme açısı α üretilerek, tetikleme devresi aracılığı ile uygun PWM sinyali elde edilir. PWM sinyalleri tristörü tetikler ve bu duruma bağlı olarak kontrollü reaktif güç üretimi gerçekleştirilerek, sisteme aktarılır [82].



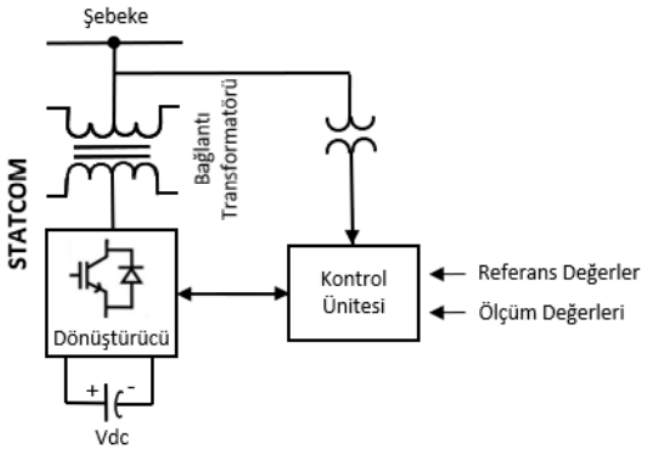
Şekil 1. 12. TSC-TCR tasarımlı SVC modeli

Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ise, TCR devresine kapasitörün paralel bağlanması ile oluşan seri bağlı FACTS cihazlarından biridir. TCSC tristör tetikleme açısını ayarlayarak reaktans değerini değiştirip, endüktif veya kapasitif modda çalışabilir[83]. Elektrik akımının akışını kontrol ederek, AC sistem kararlılığın iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), seri bağlı konvertör tabanlı FACTS cihazlarından biridir. SSSC, hat eşdeğer empedansını ayarlayarak, iletim güç akışını kontrol etmede kullanılır. Rüzgar santrali içeren bir sistemde, salınım sönümleme kontrolörüne sahip bir SSSC, güç akışı yönetimi ile düşük frekanslı salınım sönümlemesini aynı anda gerçekleştirmektedir. Şekil 1.13'de TCSC ve SSSC cihazlarının modeli gösterilmiştir [80].



Şekil 1. 13. FACTS cihaz modelleri a) TCSC b) SSSC

Statik Senkron Kompansatör (STATCOM), günümüzde ise en çok kullanılan FACTS cihazlarından biridir. İletim sistemlerinde kullanıldığında STATCOM ismiyle anılırken, dağıtım sistemlerinde kullanıldığında ise D-STATCOM olarak adlandırılmaktadır. Gerilim regülasyonu, güç faktörünün iyileştirilmesi, harmoniklerin filtrelenmesi gibi işlemler için yaygın olarak kullanılır. Yapısında temel olarak gerilim kaynaklı konvertör, DC enerji depolama cihazı (genellikle bir kondansatör) ve bağlantı transformatörü bulunmaktadır [84]. Dönüştürücü için gerekli olan DC gerilim, kondansatör tarafından karşılanmakta ve şebeke ile dönüştürücü çıkış gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitörün şarj/deşarj işlemleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.14'te temel STATCOM modeli gösterilmiştir [85].



Şekil 1. 14. STATCOM modeli

STATCOM, şebeke gerilimi ve dönüştürücünün çıkış gerilim seviyesine göre 3 farklı çalışma moduna sahiptir.

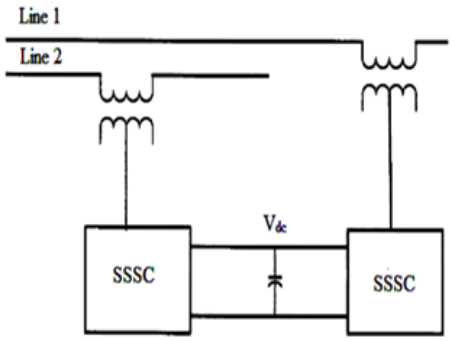
1) Şebeke gerilimi, STATCOM çıkış geriliminden küçükse STATCOM üzerinden şebekeye akım akar yani reaktif güç iletilerek gerilim seviyesi eşitlenir. Bu esnada STATCOM kapasitif modda çalışmaktadır.
2) Şebeke gerilimi, STATCOM çıkış geriliminden büyükse şebekeden STATCOM' a doğru akım akar yani reaktif güç çekilerek, gerilim seviyesi eşitlenir. Bu esnada STATCOM endüktif modda çalışmaktadır.
3) Şebeke gerilimi, STATCOM çıkış gerilimine eşit olması durumunda ise herhangi bir reaktif güç akışı gerçekleşmez[85].

Trafo direncinin ihmal edilmesi durumunda şebekeden STATCOM'a aktarılan aktif güç Denklem 1.7'de gösterilmiştir. STATCOM'un yapısındaki kapasitör, invertör çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre şarj ve deşarj olur. α faz farkı olmak üzere 0'dan büyük ise P>0 olduğunda kapasitör şarj olur tam tersi durumda yani α 0'dan küçük ise P<0 olduğunda kapasitör deşarj olmaktadır. STATCOM tarafından üretilen veya tüketilen reaktif güç miktarı ise Denklem 1.8 ile hesaplanmaktadır. Burada $V_{Statcom}$ invertör çıkış gerilimi, V_{AC} şebeke gerilimi, X trafo kaçak reaktansıdır[86,87].

$$P = \frac{V_{AC} * V_{Statcom} * \sin \alpha}{X} \tag{1.7}$$

$$Q = \frac{V_{AC} * V_{Statcom} * \cos \alpha - V_{AC}^2}{X} \tag{1.8}$$

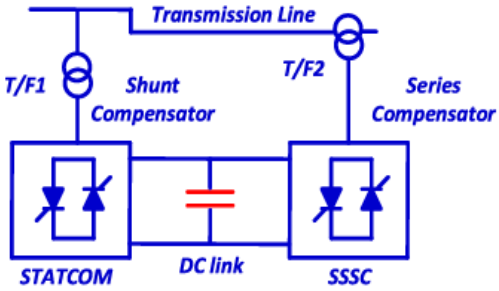
Hat Arası Güç Akış Denetleyici (IPFC), birden fazla iletim hattına sahip sistemlerde hatlar arası güç akışını sağlayan seri seri bağlı hibrid FACTS cihazıdır. DC kapasitöre bağlı SSSC'lerin bir araya gelmesi ile oluşur. DC bağlantı eviriciler arasındaki aktif güç aktarımını sağlar. Böylece bir hattan alınan aktif güç, başka bir hatta aktarılabilir[88]. Temel yapısı Şekil 1.15'de gösterilmiştir [89].



Şekil 1. 15. IPFC modeli

Birleşik Güç Akışı Kontrolörü (UPFC), DC kapasitöre bağlanan STATCOM ve SSSC'nin bir araya gelmesi ile oluşan seri-paralel hibrit FACTS cihazlarından biridir. Bu nedenle yapısında iki gerilim kaynaklı dönüştürücü bulundurmaktadır. Temel yapısı Şekil 1.16' da gösterilmiştir [80]. İletim sistemlerinde aktif ve reaktif güç akışını kontrol ederek, hattın güç aktarım kapasitesini ve kararlılığını iyileştirir. UPFC, özellikle birden fazla yük taşıyan veya birbirine paralel bağlı iletim hatları arasındaki yük transferi problemlerini

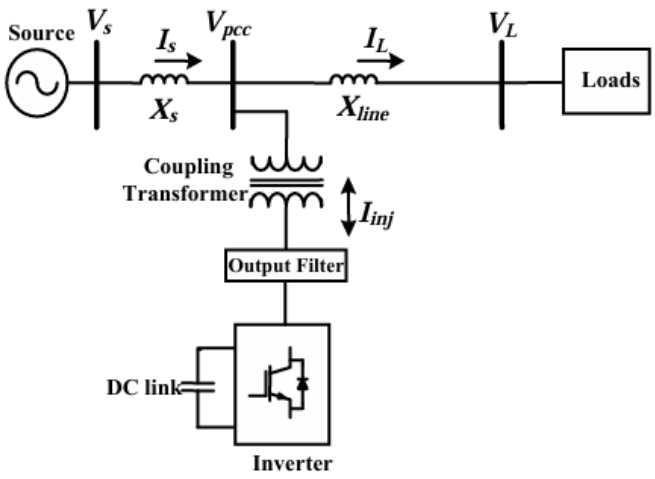
çözümlemede kullanılabilecek cihazlardan biridir. Aynı zamanda gerilim regülasyon sağlama kabiliyetine sahiptir [83,90].



Şekil 1. 16. UPFC modeli

1.6. Özel Güç Cihazlar

FACTS cihazları iletim hatlarında kullanılırken, Özel Güç (Custom Power) cihazları dağıtım sistemlerinde kullanılan FACTS benzeri cihazlardır. Bazı kaynaklarda D-FACTS (Dağıtım Seviyeli FACTS) cihazları olarak ifade edilirler. En yaygın kullanılan Custom Power cihazları; Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör (DSTATCOM), Dinamik Gerilim Düzenleyici (DVR) ve hem seri hem paralel kompanzasyon yapabilen Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyici (UPQC) şeklindedir. STATCOM, dağıtım sistemlerinde kullanıldığı zaman D-STATCOM adını almaktadır. Bu nedenle DSTATCOM, STATCOM ile aynı devre yapısına sahip olmasına rağmen ilgilendiği güç kalite problemleri farklılık göstermektedir.

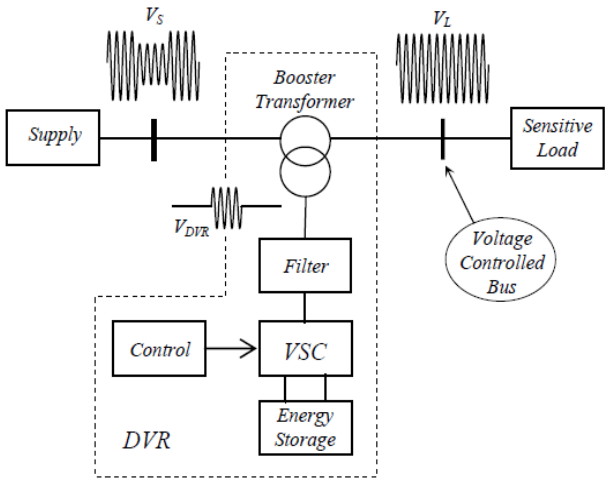


Şekil 1. 17. DSTATCOM devre şeması

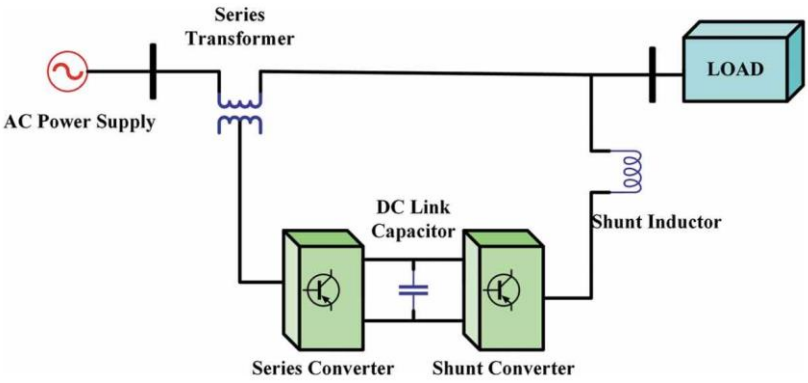
STATCOM şebeke gerilim kararlılığı, reaktif güç kompanzasyonu ve güç faktörü iyileştirmesi sorunlarına odaklanırken, DSTATCOM dağıtım hattındaki yerel yük

değişimlerine, ani gerilim değişimlerine, harmonik bozulmalara ve gerilim dengesizliği sorunlarına odaklanır. Yani STATCOM genellikle, şebekedeki genel problemlerinin çözümünde, DSTATCOM ise dağıtım hatlarındaki yerel problemlerin çözümünde kullanılan bir cihazdır. DSTATCOM, yük akımlarını sürekli olarak izler ve gerekli olan kompanzasyon miktarını belirler. Bu sayede reaktif güç kontrolü sağlayarak gerilim regülasyonu ve harmoniklerin kaldırılmasına katkı sağlar [78,91]. DSTATCOM'un temel devre yapısı Şekil 1.17'de gösterilmiştir [70].

Dağıtım sisteminde gerilim regülasyon işlemi için kullanılan DVR cihazı, DC bağlantı kapasitörü, gerilim kaynağı dönüştürücüsü (VSC), LC filtresi ve seri bağlantılı transformatöründen oluşmaktadır. Bu mevcut yapıya enerji depolama birimi eklenerek farklı DVR tasarımları oluşturulabilir. DVR, enerji sisteminde meydana gelen gerilim düşümünü algılayarak gerekli olan telafi gerilimi üretir ve sisteme aktararak yük geriliminin düzenlenmesini sağlar. Yani oluşan dengesiz bir gerilim düşümü esnasında sistemde ek bir gerilim kaynağı varmış gibi çalışır. Sistemde gerilim yükselmesi olması durumunda ise, ters kutuplu bir gerilim kaynağı gibidir. Şekil 1.18'de DVR modeli gösterilmiştir [92]. UPQC, güç sisteminin dağıtım tarafında kullanılan reaktif güç kontrol cihazıdır. DC barasını ortak kullanan iki invertörden oluşmaktadır. Temel yapısı Şekil 1.19 'da gösterilmiştir [93].



Şekil 1. 18. DVR modeli ve temel devre şeması



Şekil 1. 19. UPQC konfigürasyonu

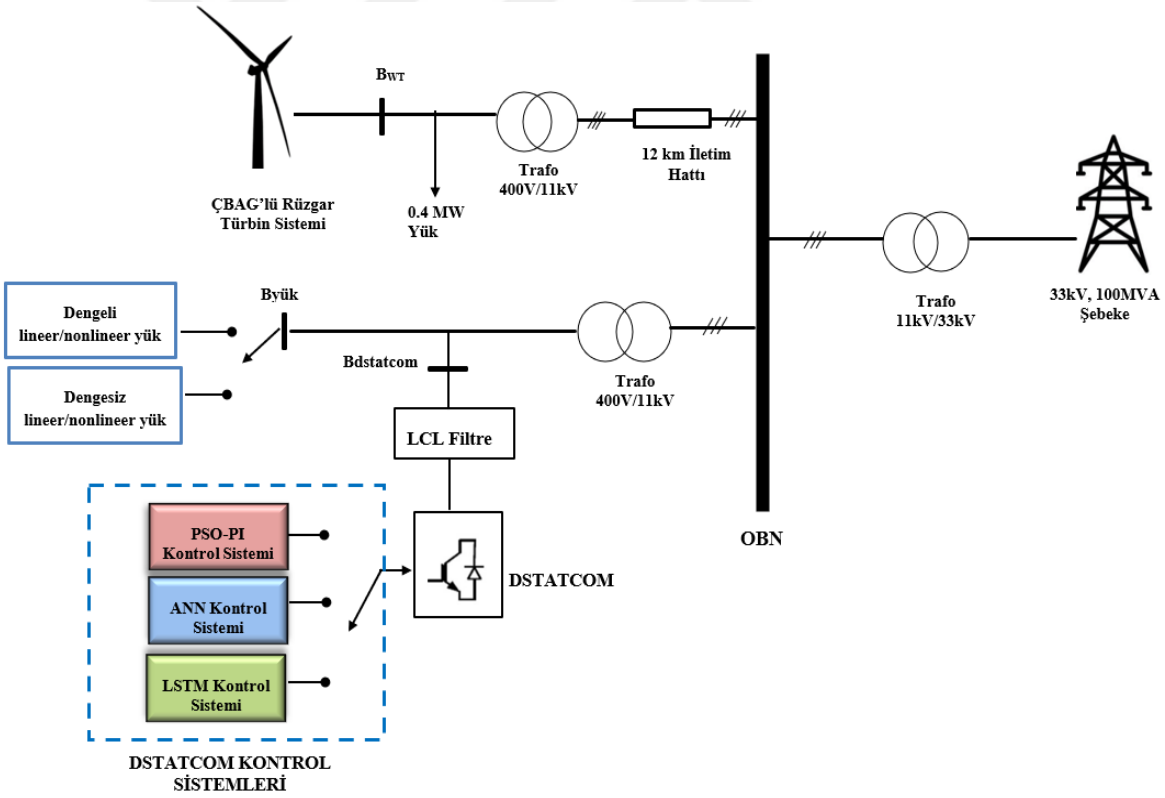
UPQC yapısında, besleme hattına seri olarak bağlanan invertörlere seri aktif filtre, paralel bağlanan invertöre şönt aktif filtre denilir. Seri aktif filtre, gerilim kesintisi, gerilim dengesizlikleri, gerilim düşüm ve yükselimleri ortadan kaldıran bir gerilim kaynağı gibi davranırken, şönt aktif filtre, akım harmoniklerin azaltılmasına, reaktif kompanzasyonu ve güç faktörü düzeltilmesine katkı sağlamaktadır [94,95].

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1.Yöntem

Tez çalışmasında şebekeye bağlı Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörlü (ÇBAG) rüzgar türbin sistemi ile DSTATCOM kompanzasyon elemanı MATLAB/Simulink'te tasarlanarak, Şekil 2.1'de gösterilen güç sistem modeli oluşturulmuştur.



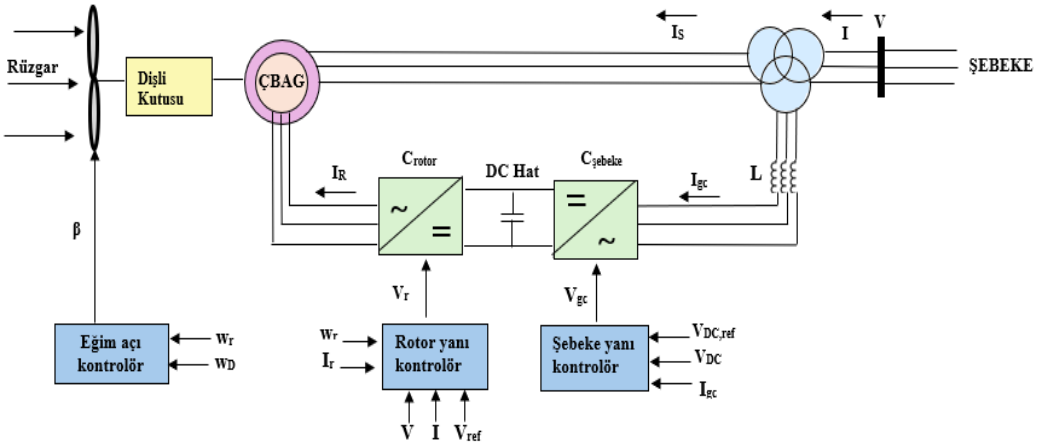
Şekil 2. 1. MATLAB/Simulink'te tasarlanan model

DSTATCOM performansını arttırmak ve güç kalite sorunlarının azaltılması amacıyla yeni ANN ve LSTM tabanlı 2 farklı kontrol sistemi önerilmiş ve ilgili zeki kontrol sistemlerinin performansları geleneksel PSO-PI kontrol sistemi ile karşılaştırılmıştır.

DSTATCOM'un sağladığı iyileştirmeleri gözlemlemek için şebekede meydana gelebilecek ani gerilim değişimleri durumundaki yük gerilimi ile farklı durumlar için akım harmonik bozulmaları detaylı olarak incelenmiştir.

2.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbin Sistemi

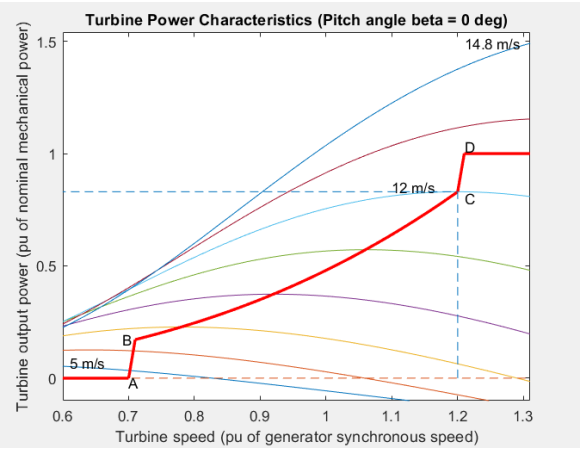
Rüzgâr türbin sisteminde rüzgâr enerjisi sırasıyla rotor tarafından mekanik enerjiye sonra generatör ile elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve elde edilen elektik enerjisi trafo ve iletim hatları aracılığıyla şebekeye aktarılmaktadır [96]. Rüzgâr türbin sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için bileşenlerin dikkatli bir şekilde tasarlanarak sisteme entegre edilmesi gerekmektedir. ÇBAG'lü rüzgar türbin sisteminde, şebekeye generatörün stator sargıları doğrudan bağlanırken, rotor sargıları AC/DC/AC dönüştürücü ile bağlanmaktadır. Bu dönüştürücü, rotor tarafı dönüştürücüsü (C_{rotor}) ve şebeke tarafı dönüştürücüsü (C_{grid}) olmak üzere gerilim kaynaklı iki dönüştürücünün çift yönlü olarak birbirine bağlanmasıyla oluşur. Kullanılan ÇBAG'lü rüzgar türbin modeli Şekil 2.2'de gösterilmiştir. ÇBAG'lerde kullanılan tam ölçekli dönüştürücü ve kontrol sistemleri sayesinde generatörün rotor hızı kontrol edilerek reaktif güç ihtiyacının karşılanması, ani akımların sınırlandırılması sağlanmaktadır. Bu duruma bağlı olarak ÇBAG'lü rüzgar türbin sistemleri şebeke güç kalitesi sorunları bakımından elverişli rüzgar türbin sistemlerinden biridir. Aynı zamanda ÇBAG'lü rüzgar türbin sistemlerinin çıkış gücünün yüksek ve verimli olması, değişken hızlı çalışmaları, düşük maliyetli olmaları önemli avantajlarından bazılarıdır [27]. Bu rüzgar türbin tasarımının en önemli dezavantajı ise stator sargıları şebekeye doğrudan bağlandığı için şebeke arızası esnasında oluşan koruma problemlerin meydana gelmesidir [64,97].



Şekil 2. 2. ÇBAG'lü rüzgar türbin modeli

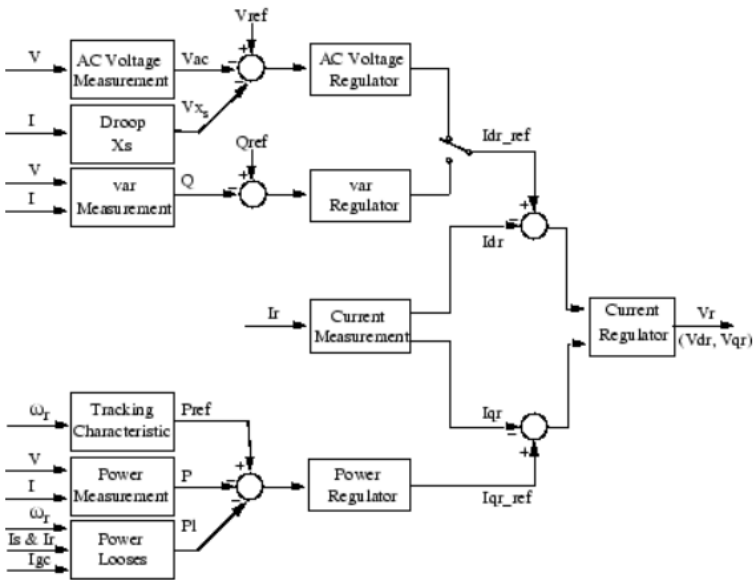
2.2.1.Türbin Takip Karakteristiği ve Kontrol Sistemi

Türbin kontrol sisteminde referans türbin gücü önceden tanımlanmış güç hız karakteristiği ile belirlenmektedir. Bu tanımlanan izleme karakteristik eğrisi ABCD olmak üzere 4 noktadan oluşmaktadır. A noktasına kadar referans güç sıfırdır. B noktasının hızı A noktasının hızından daha büyük olmalıdır. C noktası nominal rüzgar hızındaki duruma karşılık gelirken, D noktasında referans güç 1 pu olarak sabitlenir. Çalışmada kullanılan rüzgar türbininin takip karakteristik eğrisi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



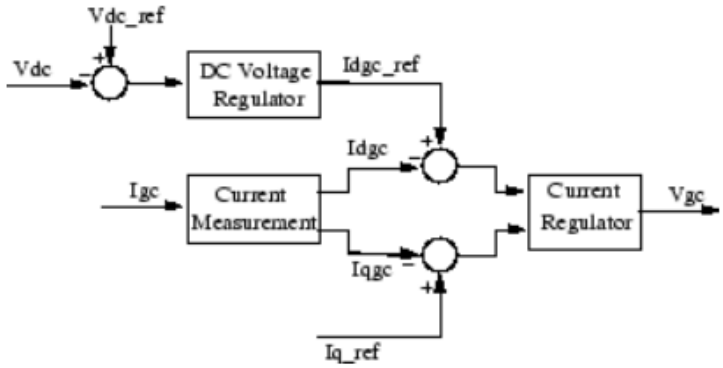
Şekil 2. 3. Rüzgar türbini takip karakteristik eğrisi

Rotor tarafındaki dönüştürücü, rüzgar türbini çıkış gücünü ve şebeke terminallerinde ölçülen gerilimi veya reaktif gücü kontrol etmek için kullanılmaktadır. Çalışmada gerilim regülasyon işlemi yapılmıştır.



Şekil 2. 4. Rotor tarafı dönüştürücü kontrol sistemi

- Rotor tarafı dönüştürücü kontrol modeli Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Rüzgar türbin sisteminin şebeke terminallerinde ölçülen gerçek çıkış gücüne, toplam güç kayıplarına eklenir ve izleme karakteristiğinden elde edilen referans güçle karşılaştırılır. Güç hatasını sıfıra indirmek için güç regülatörü kullanılarak, rotor tarafı C_{rotor} dönüştürücü tarafından rotora enjekte edilmesi gereken referans rotor akımı, I_{qr_ref} elde edilir.
- Rüzgar türbin sistemi çıkışındaki terminalden ölçülen gerçek gerilime, düşüm miktarı eklenir ve referans gerilim değeri ile karşılaştırılır. Gerilim hatasını sıfıra indirmek için AC gerilim regülatörü kullanılır ve rotor tarafı C_{rotor} dönüştürücü tarafından rotora enjekte edilmesi gereken referans rotor akımı I_{dr_ref} elde edilir. Elde edilen referans rotor akımları da gerçek rotor akımları ile karşılaştırılır. Burada elde edilen hata değerlerini de sıfıra indirmek için akım regülatörü kullanılmakta ve rotor tarafı dönüştürücü için referans gerilim bileşenleri üretilmektedir[45,98].



Şekil 2. 5. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrol sistemi

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrol sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Bu kontrol sisteminde ise DC gerilim kontrol işlemi gerçekleştirilmekte ve DC regülatör bloğu ile şebeke tarafı dönüştürücü referans akım bileşeni (I_{dgc_ref}) elde edilmektedir. Daha sonrasında ise referans şebeke tarafı dönüştürücü akımları, gerçek akımlar ile karşılaştırılır ve burada elde edilen hata değerlerini sıfıra indirmek için akım regülatörü ile şebeke tarafı dönüştürücü için referans gerilim bileşenleri üretilmektedir [99].

2.2.2. Matematiksel Model

Rüzgar gücünün belirli bir kısmı türbin rotoru tarafından yakalanmaktadır. Yani burada elde edilebilen gücün toplam rüzgâr gücüne oranı bize türbinin güç katsayısını diğer bir

ifade ile rotor verimini verdiğinden dolayı, türbin gücünü, Denklem 2.1'de gösterildiği gibi rüzgâr gücü ile güç katsayının çarpımı sonucunda elde ederiz [100,101]. Rotor tarafından süpürülen alan ise Denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır. Güç katsayısı λ, β değişkenlerine bağlı lineer olmayan bağıntılarla hesaplanmakta ve literatürde kullanılan farklı bağıntılar bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan ÇBAG'lü rüzgar türbini için güç katsayısı ve uç hız oranı bağıntıları Denklem 2.3 ile Denklem 2.4'te ifade edilmiştir.

$$P_t = \frac{1}{2} p.A.v^3.C_P(\lambda,\beta) \tag{2.1}$$

$$A = \pi R^2 \tag{2.2}$$

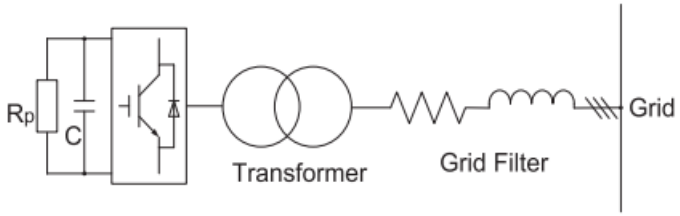
$$C_p(\lambda,\beta) = 0.5176\left[{}^{116}/_{\lambda} - 0.4\beta - 5\right]e^{{}^{21}/_{\lambda}} + 0.0068\lambda \tag{2.3}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1} \tag{2.4}$$

P_t, türbin gücü (W), v rüzgar hızı(m/s), λ uç hız oranı, β kanat eğim açısı, w açısal hız (rad/s), R rotor yarıçapı (m),C_p güç katsayısı, A rotor tarafından süpürülen alan (m^2).

2.3. L-DSTATCOM

Gerilim regülasyonu, güç faktörünün iyileştirilmesi, harmoniklerin filtrelenmesi gibi güç kalite sorunlarının iyileştirilmesine katkı sağlayan STATCOM/DSTATCOM cihazları yapısında temel olarak gerilim kaynaklı konvertör, DC enerji depolama cihazı (genellikle bir kondansatör) ve bağlantı transformatörü ve filtre devresi bulunmaktadır [84]. Şekil 2.6'da şebekeye bağlı bir L-DSTATCOM'un temel konfigürasyonu gösterilmiştir [102].

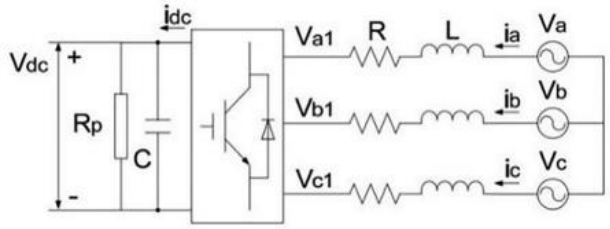


Şekil 2. 6. L-DSTATCOM modeli

Bu cihazların güç sistemine katkıları kullanılan kontrol sistemlerinin performansına göre değişkenlik göstermektedir. Literatürde çeşitli kontrol sistem mekanizmaları sunulmuştur. PI tabanlı kontrol yaklaşımlarının uygulanması için matematiksel modellemenin yapılması gerekir.

2.3.1. L-DSTATCOM Matematiksel Modeli

DSTATCOM model de transformatör yerine bir direnç ve bir indüktör getirilerek modelleme yapılabilir. Bu durumda, dönüştürücü ve şebeke arasında oluşan eşdeğer devre modeli, Şekil 2.7'deki gibi olur.



Şekil 2. 7. DSTATCOM'un eşdeğer devresi

Kontrol sistemi için önce Clarke sonra Park dönüşümü yapılarak üç fazlı bir sistemin elektriksel sinyallerinden d-q sinyalleri elde edilmelidir. Kullanılan Clarke dönüşümü ile Park dönüşümü sırasıyla Denklem 2.5 ve Denklem 2.6'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix} = \frac{2}{2}\begin{bmatrix}1 & -1/2 & -1/2\\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$\begin{bmatrix}d\\ q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix} \tag{2.6}$$

d-q referans çerçevesinde, Şekil 2.7'deki DSTATCOM eş değer devre modeli için gerilim denklemi, Denklem 2.7 ile gösterilmiştir. Bu durumda DSTATCOM'un durum uzay denklemleri, Denklem 2.10 ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix}V_d\\ V_q\end{bmatrix} = R\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix} + L\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix} + w_s L\begin{bmatrix}-i_q\\ i_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}V_{d1}\\ V_{q1}\end{bmatrix} \tag{2.7}$$

w_s şebeke geriliminin açısal frekansı, V_d, V_q şebeke geriliminin d ve q bileşenleri, V_{d1}, V_{q1} dönüştürücü çıkış geriliminin d ve q bileşenleri, R ve L şebeke ile dönüştürücü arasındaki eş değer direnç ve indüktans değeri, i_d ve i_q şebeke ve DSTATCOM aralarında akan d ve q akımlarıdır.

$$V_d = Ri_d + L\frac{\partial i_d}{\partial t} - w_s L i_q + V_{d1} \tag{2.8}$$

$$V_q = Ri_q + L\frac{\partial i_q}{\partial t} + w_s L i_d + V_{q1} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & w_s \\ -w_s & R/L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L}\begin{bmatrix} V_d - V_{d1} \\ V_q - V_{q1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Ayrıştırılmış bir kontrol sistemini tasarlamak amacıyla DSTATCOM'un durum uzay denklemlerinden yararlanılarak, d-q eksenleri için yardımcı bileşenlerin diğer ifade ile kontrol sinyallerinin (V_d',V_q') tanımlanması gerekmektedir. Tanımlanan bu yardımcı değişkenler Denklem 2.11 ve Denklem 2.12 ile gösterilmiştir.

Denklem 2.13 ve 2.14'un sırasıyla Denklem 2.8 ve 2.9'da kullanılması durumunda, kontrol sisteminden elde edilecek olan d-q referans gerilim sinyalleri Denklem 2.15 ve 2.16'daki gibi elde edilmektedir. Bu sinyallerde sonrasında sırasıyla ters Park ve ters Clarke dönüşümleri ile üç fazlı sinyallere dönüştürülerek PWM 'e aktarılır [103].

$$V_d' = V_d + w_s L i_q - V_{d1}^* \quad (2.11)$$

$$V_q' = V_q - w_s L i_d - V_{q1}^* \quad (2.12)$$

$$L\frac{\partial i_d}{\partial t} = -R i_d + V_d' \quad (2.13)$$

$$L\frac{\partial i_q}{\partial t} = -R i_q + V_q' \quad (2.14)$$

$$V_{d1}^* = -V_d' + w_s L i_q + V_d \quad (2.15)$$

$$V_{q1}^* = -V_q' - w_s L i_d \quad (2.16)$$

Ortak bağlantı noktasındaki gerilim oryantasyon çerçevesinde, AC sistem d ekseni gerilimi sabit iken ve q ekseni gerilimi sıfır olmaktadır. Böylece, AC sistemden DSTATCOM' a aktarılan anlık aktif ve reaktif güçler sırasıyla d ve q eksen akımlarıyla orantılıdır ve Denklem 2.17 - Denklem 2.18 ile ifade edilebilir [104].

$$p(t) = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d \quad (2.17)$$

$$q(t) = v_q i_d - v_d i_q = -v_d i_q \quad (2.18)$$

2.3. LCL-DSTATCOM

DSTATCOM'un sağlamış olduğu tüm avantajların yanında, bağlı hassas cihazların arızalanmasına neden olabilecek yüksek frekanslı akım harmoniklerini elektrik

şebekesine enjekte edebilir. Bu durumda oluşabilecek akım harmoniklerini azaltmak için DSTATCOM'un yapısında bulunan dönüştürücü ile şebeke arasına alçak geçiren bir filtre bağlanmaktadır. LCL filtre matematiksel modellemesi daha karmaşık olsa bile, L ve LC filtre devrelerle karşılaştırıldığında, indüktör boyutunun küçük olması, maliyetli olması ve daha iyi harmonik filtreleme performansına sahip olması gibi önemli avantajlar sunar [105-107].

2.3.1. LCL Filtre Tasarımı

LCL filtre tasarımında kullanılan bağıntılar Denklem 2.19 ile Denklem 2.28 arasında ifade edilmiştir.

$$Z_b = \frac{V_{LL,rms}^2}{S_n} \tag{2.19}$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi f Z_b} \tag{2.20}$$

$V_{LL,rms}$ dönüştürücü çıkış rms hat gerilimi, Z_b baz empedans değeri, C_b baz kapasite değeri, C_f ise filtre kapasite değeridir. Z_b ve C_b değerleri sırasıyla Denklem 2.20 ve Denklem 2.21 ile hesaplanır. DSTATCOM filtre kapasitans değerini sınırlayan şebeke güç faktörü değişiminin, nominal güç durumunda %5'e eşit olduğu varsayılır. Bu nedenle Denklem 2.21'de gösterildiği gibi filtre kapasite değeri, baz kapasite değerinin %5'ine eşit olmaktadır [108,109].

$$C_f = 0.05 C_b \tag{2.21}$$

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2} S_n}{3 V_{LN,rms}} \tag{2.22}$$

$$\Delta I_{max} = 0.1 I_{max} \tag{2.23}$$

I_{max} DSTATCOM nominal çıkış akımı, ΔI_{max} maksimum akım dalgalanması, S_n, DSTATCOM nominal görünür güç, L_1 invertör yanı indüktans değeri, L_2: şebeke yanı indüktans değeri ve R_d pasif sönümleme direncidir. I_{max} ve ΔI_{max} değerleri sırasıyla Denklem 2.22 ve Denklem 2.23 ile elde edilir. L_1, L_2 ve R_d değerleri sırasıyla Denklem 2.24, 2.25 ve 2.27 ile hesaplanır.

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{6 f_{sw} \Delta I_{max}} \tag{2.24}$$

$$L_2 = r L_1 \tag{2.25}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1 L_2 C_f}} \tag{2.26}$$

$$R_d = \frac{1}{3w_{res}C_f} \tag{2.27}$$

$$10f_g < f_{res} < 0.5f_{sw} \tag{2.28}$$

r sabiti ise LCL filtrede yer alan şebeke yanı endüktans değerinin, invertör yanı endüktans değerine oranıdır. Bu sabitinin değeri, LCL devresinden yüksek verim sağlamak için 1'den küçük olmalıdır [110]. Aynı zamanda Denklem 2.26 ile hesaplanan rezonans frekans değerinin (f_{res}), anahtarlama frekansının(f_{sw}'nin) yarısından az ve şebeke frekansının (f_g) ise 10 katından fazla olması gerekir [106]. LCL filtre tasarımı yapılırken r sabit değeri ile Denklem 2.28'de belirtilen frekanslar arasındaki şartın sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir.

2.3.2. LCL-DSTATCOM Matematiksel Modeli

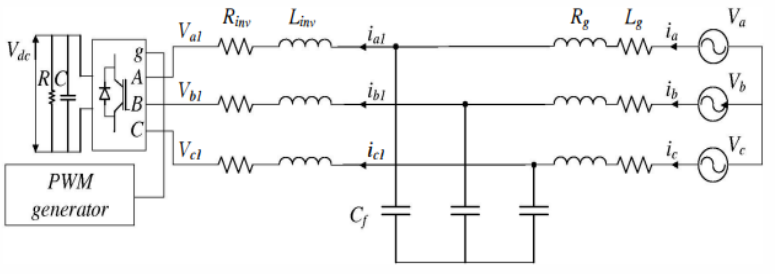
LCL filtreli DSTATCOM'un eş değer devre modeli Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Mevcut devre modeli için d-q referans çerçevesindeki, Kirchhoff gerilim ve akım denklemleri sırasıyla, Denklem 2.29, 2.30 ve 2.31 ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_g \frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + w_s L_g \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

$$\begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} = R_{inv} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} + L_{inv} \frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + w_s L_{inv} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

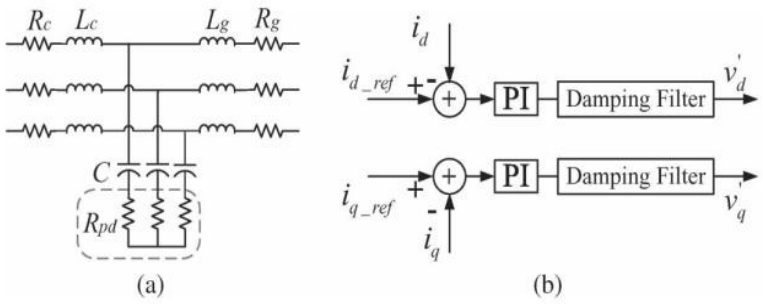
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} + C_f \frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} + C_f w_s \begin{bmatrix} -V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

w_s şebeke geriliminin açısal frekansı, V_d, V_q şebeke geriliminin d ve q bileşenleri, V_{d1}, V_{q1} dönüştürücü çıkış geriliminin d ve q bileşenleri, R_1 ve L_1 dönüştürücü tarafı direnci ve endüktansı, R_2 ve L_2 şebeke tarafı direnci ve endüktansı, i_d ve i_q şebeke ile DSTATCOM arasında akan d ve q akımlarıdır.



Şekil 2. 8. LCL-DSTATCOM'un eşdeğer devresi

C dinamikleri nedeniyle LCL filtreli DSTATCOM'un matematiksel modellemesi ve matematiksel modellemeye dayalı ayrıştırılmış geleneksel kontrol sistem tasarımı daha karmaşık hale gelir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için kontrol işleminde LCL filtresinin kapasitansı ihmal edilebilir. Yani, LCL filtresi L filtresine basitleştirilerek kontrol sistemi oluşturulur. Ancak bu basitleştirme işlemi sistemde salınımlı ve kararsız dinamik davranışlara neden olabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için ise genellikle pasif veya aktif sönümleme işlemi yapılır [111,112]. Pasif ve aktif sönümleme işlemleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir [109].



Şekil 2. 9. Sönümleme işlemleri a) pasif sönümleme b) aktif sönümleme

C dinamikleri ihmal edilmesi durumunda L-DSTATCOM için elde edilen bağıntılar burada da geçerli olmaktadır. d-q referans çerçevesinde, ayrıştırılmış geleneksel kontrol sistemini tasarlamak için tanımlanan DSTATCOM'un kontrol sinyalleri (V_d',V_q'), d-q referans gerilim sinyalleri cinsinden Denklem 2.32 ve Denklem 2.33'teki gibi elde edilir [112].

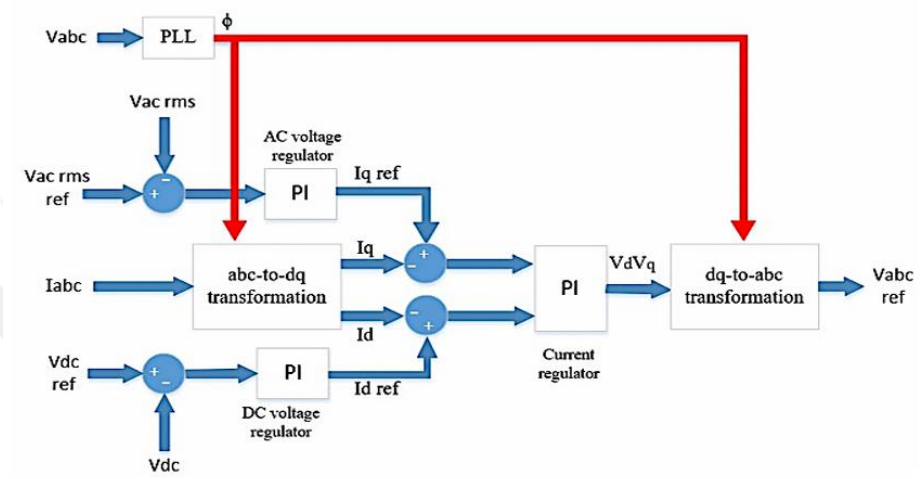
$$V_{d1}^{*} = -V_d' + w_s(L_{inv} + L_g)i_q + V_d \tag{2.32}$$

$$V_{q1}^{*} = -V_q' - w_s(L_{inv} + L_g)i_d \tag{2.33}$$

2.4. DSTATCOM Kontrol Yöntemleri

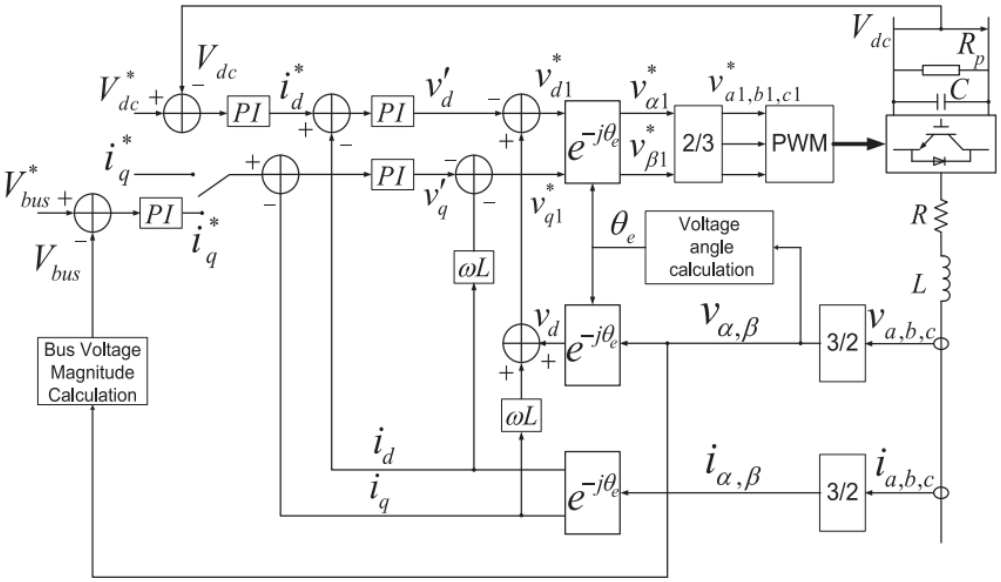
2.4.1. PI Tabanlı Kontrol Yöntemleri

Gerilim kaynağı invertör tabanlı bir STATCOM/DSTATCOM için geleneksel PI kontrol yöntemi Şekil 2.10'de gösterilmiştir [113]. Geleneksel PI kontrol sistemi iç içe bir döngü yapısına sahiptir [3].



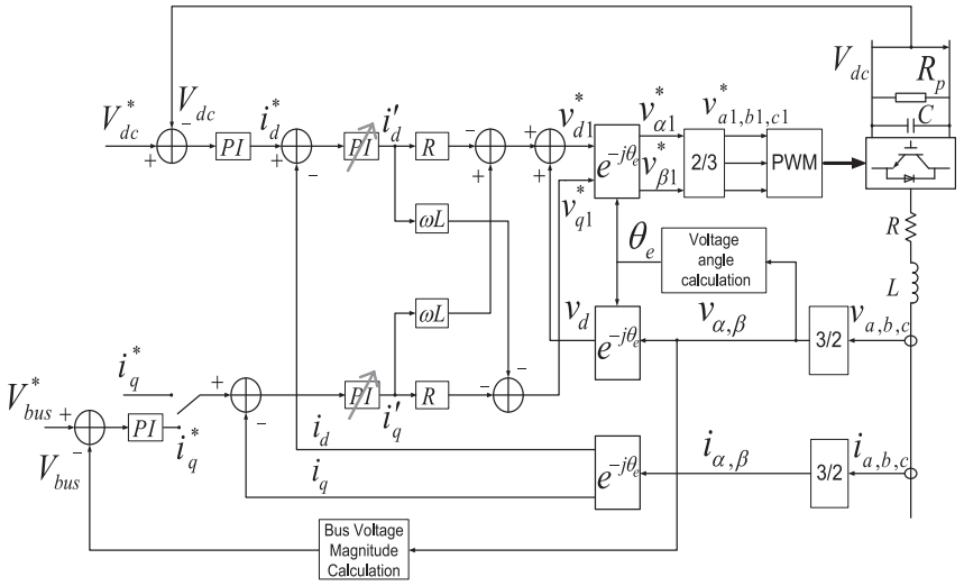
Şekil 2. 10. DSTATCOM geleneksel PI kontrol blok yapısı

Dış döngü, istenen ve gerçek kapasitör DC gerilimleri arasındaki farka bağlı olarak d ekseni akım referansını (i_{dref}), ayarlayan bir DC gerilim denetleyicisi ile AC sistem bara gerilimi desteğine veya reaktif güç kompanzasyon gereksinimine göre q ekseni referans akımını (i_{qref}) ayarlayan AC gerilim denetleyicisinden oluşmaktadır. Yani dış kontrol döngüleri ile referans dq akım bileşenleri elde edilmektedir. İç akım döngüsü denetleyicileri ise, gerçek i_d ve i_q akımlarının, sırasıyla i_{dref} ve i_{qref} referans akım değerlerine ulaşmasını sağlayarak, referans d-q gerilim sinyallerinin üretilmesini sağlarlar. Bu sinyallerde sırasıyla Ters Park ve Ters Clarke dönüşümleri ile üç fazlı sinyallere dönüştürülerek PWM 'e aktarılır ve DSTATCOM kontrolü tamamlanır. DSTATCOM'un geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol mekanizması Şekil 2.11'da gösterilmiştir. Bu kontrol sisteminde d-q gerilim kontrol sinyalleri (V_d', V_q') kullanılarak ayrıştırma işlemi referans sinyallere ulaşılmaktadır [45,99,114].



Şekil 2. 11. Geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol mekanizması

Şekil 2.12'de gösterilen doğru akım vektörü kontrol mekanizması ile geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol yapısı arasındaki temel fark d-q gerilim kontrol sinyali üretmek yerine, d-q akım kontrol sinyalleri (i_d', i_q') üretilmesidir. Ancak doğru akım vektörü kontrol mekanizmasında akım kontrol sinyalleri üretilmiş olsa da gerilim kaynaklı invertörün kontrolü gerçekleştiği için akım sinyalleri kullanılarak yine dönüştürücü referans gerilimleri (V_{d1}*,V_{q1}*) elde edilmektedir [104]. Kontrol sisteminde kullanılan bağıntılar Denklem 2.34 ve 2.35'de verilmiştir.

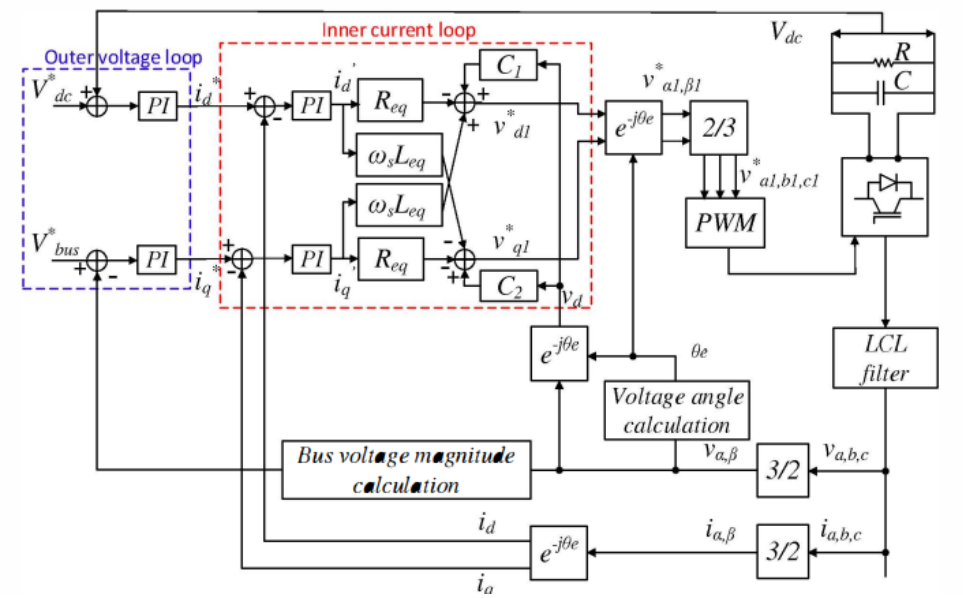


Şekil 2. 12. Doğru akım vektör kontrol mekanizması

$$V_{d1}^{*} = -Ri_{d}' + w_{s}Li_{q}' + V_{d} \tag{2.34}$$

$$V_{q1}^{*} = -Ri_{q}' - w_{s}Li_{d}' \tag{2.35}$$

LCL filtresinin kapasitansının ihmal edilmediği LCL-DSTATCOM için d-q akım kontrol sinyallerinin (i_d', i_q') üretildiği doğru akım vektör kontrol mekanizması ise Şekil 11'de gösterilmiştir. Burada kullanılan bağıntılar da Denklem 2.36 - Denklem 2.41'de ifade edilmiştir [111].



Şekil 2. 13. LCL-DSTATCOM'un doğru akım vektör kontrol mekanizması

$$V_{d1}^{*} = -R_{eq}i_{d}' + w_{s}L_{eq}i_{q}' + V_{d}C_{1} \tag{2.36}$$

$$V_{q1}^{*} = -R_{eq}i_{q}' - w_{s}L_{eq}i_{d}' + V_{d}C_{2} \tag{2.37}$$

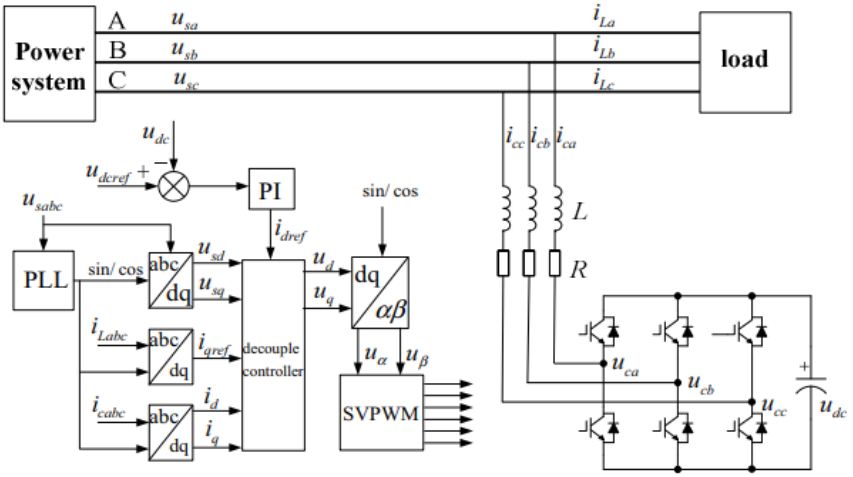
$$R_{eq} = R_{g} + R_{inv} - R_{inv}w_{s}^{2}C_{f}L_{g} - R_{g}w_{s}^{2}C_{f}L_{inv} \tag{2.38}$$

$$L_{eq} = L_{g} + L_{inv} + R_{inv}L_{q}C_{f} - w_{s}^{2}C_{f}L_{inv}L_{g} \tag{2.39}$$

$$C_{1} = 1 - w_{s}^{2}C_{f}L_{inv} \tag{2.40}$$

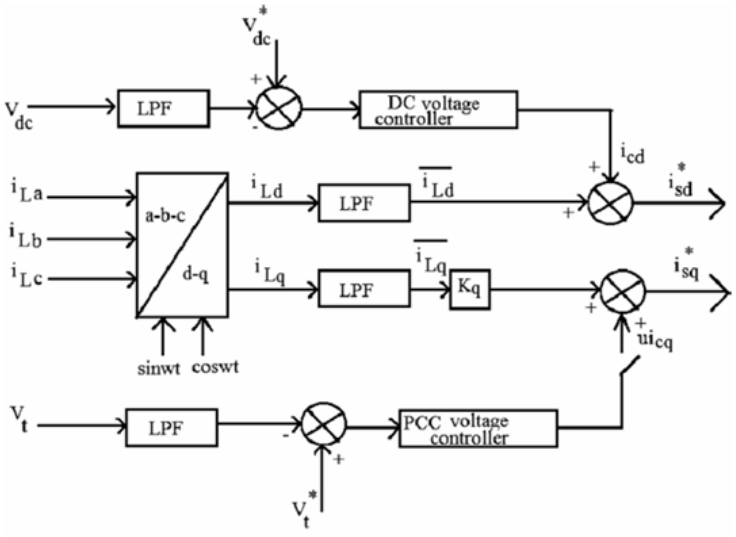
$$C_{2} = R_{inv}w_{s}C_{f} \tag{2.41}$$

Geleneksel kontrol yöntemini AC gerilim denetleyici olmadan yani 3 PI kontrolör bloğu kullanarak da yapabiliriz. Bu durumda i_q yük akımı referans akım olarak alınmaktadır [115-117]. İlgili kontrol mekanizması Şekil 2.14'te gösterilmiştir [118].



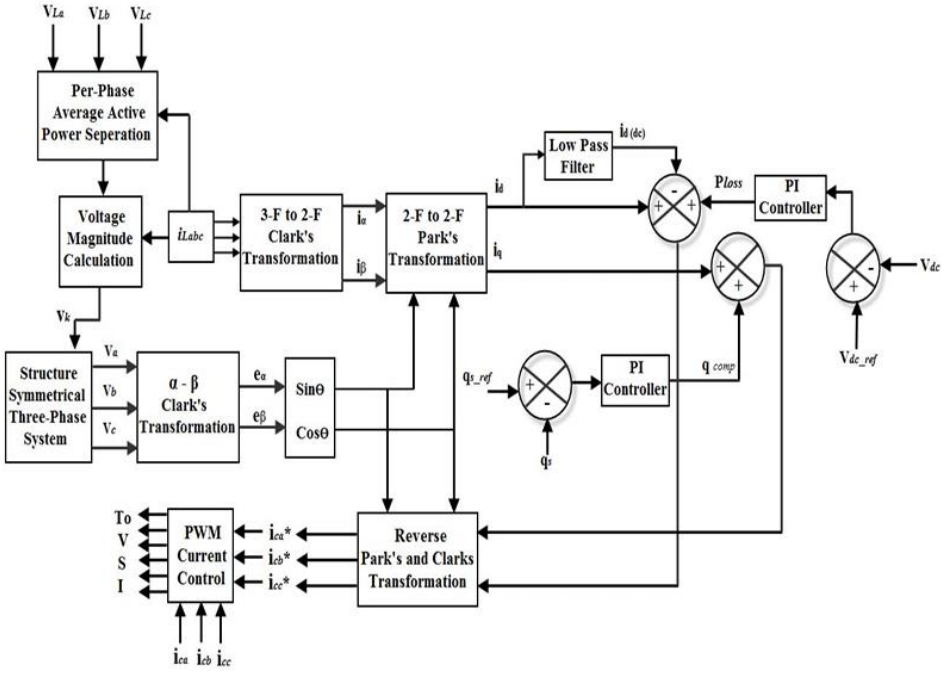
Şekil 2. 14. AC gerilim denetleyici olmadan geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol mekanizması

Senkron referans çerçeve (SRF) yöntemi üç fazlı kontrol sistemlerinde kullanılan ve akımların senkron dönen bir d-q çerçevesine dönüştürülmesine dayanır. Bu nedenle, ayrıştırılmış PI kontrol sistemi de SRF koordinat sisteminde kullanılan bir kontrolcü yapısıdır. Çünkü kontrol sisteminde d-q bileşenlerden yararlanılmaktadır. Şekil 2.15'de DSTATCOM için yaygın olan SRF tabanlı kontrol sistemleri için SRF yönteminin temel blok diyagramı gösterilmiştir [119]. Bu yöntemde genellikle aktif sönümleme işlemi yapılmaktadır. Yani, d-q çerçevesinde sinyaller kontrol esnasında alçak geçiren filtre ile filtrelenir [120].



Şekil 2. 15. Senkron referans çerçeve yönteminin temel blok diyagramı

Şekil 2.16'da geliştirilmiş SRF tabanlı kontrol sistemi gösterilmiştir[121]. Kontrol sisteminde, I_d akım bileşeninden filtre çıkışı çıkarıldığında salınım yapan bileşen elde edilir ve bu bileşene, invertörün güç kaybı bileşeni olan PI denetleyicisinin çıkışı eklenir. Böylece DC gerilim sabit tutulabilir. I_q akım bileşeni ise reaktif güç kontrol döngüsünün çıkışına eklenir ve son olarak, elde edilen iki d-q akım bileşenleri üç faz sinyallere geri dönüştürülür. Bu yöntem dengesiz şebeke koşullarında bile DSTATCOM'un kaynak akımını sinüzoidal hale getirerek hem harmonik filtreleme hem de reaktif güç kompanzasyonunu aynı anda başarıyla gerçekleştirilmesi için sunulmuştur [120].



Şekil 2. 16. Geliştirilmiş SRF tabanlı kontrol sistemi

DSTATCOM için kullanılan diğer bir PI tabanlı kontrol sistemi ise anlık reaktif güç (IRP) kontrol mekanizmasıdır. Anlık reaktif güç teorisi üç fazlı sinyallerin α-β çerçevesinde iki fazlı sinyallere dönüştürülmesine ve bu çerçevede anlık aktif ve reaktif gücün tahminine dayanmaktadır. İlgili kontrol sistemi Şekil 2.17'de, kullanılan bağıntılar ise Denklem 2.42-Denklem 2.45'de gösterilmiştir [122-124]. Kontrol yöntemin dezavantajları dönüşüm gerektirdiği ve güç bileşenleriyle ilgilendiği için hesaplama karmaşıklığının yüksek olması ve güç sinyallerini filtrelemek için kullanılan alçak geçiren filtre nedeniyle hesaplamada gecikmesidir [125].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.42}$$

$$p = \overline{p} + \tilde{p} \tag{2.43}$$

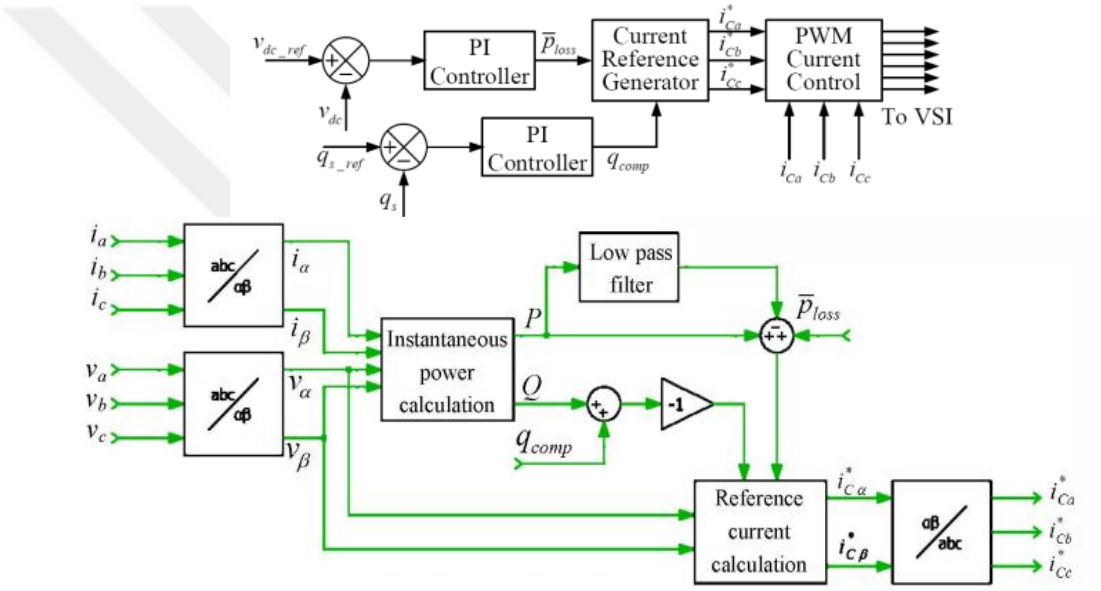
$$q = \overline{q} + \tilde{q} \tag{2.44}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^{*} \\ i_{c\beta}^{*} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^{2}+v_{\beta}^{2}} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + \overline{p_{loss}} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

p ve q : anlık aktif ve reaktif güç

$\overline{p}$ ve $\overline{q}$: anlık görünür gücün ortalama aktif ve reaktif güç bileşenleri

$\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$: anlık görünür gücün salınımlı aktif ve reaktif güç bileşenleri

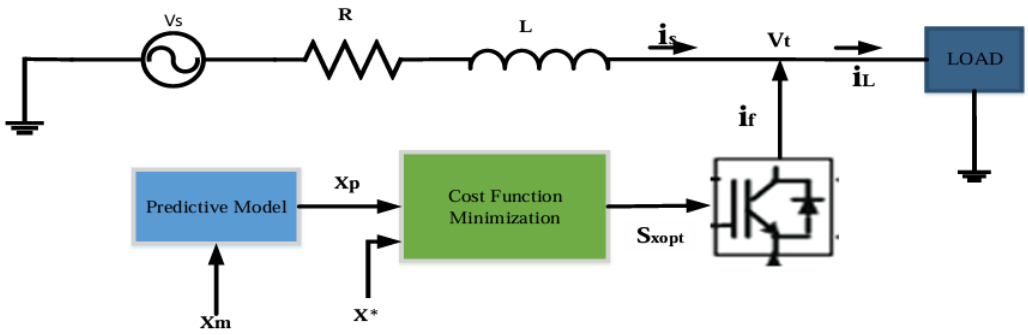


Şekil 2. 17. Anlık reaktif güç kontrol sistemi

2.4.2. Yapay Zeka veya Tahmine Dayalı Kontrol Yaklaşımları

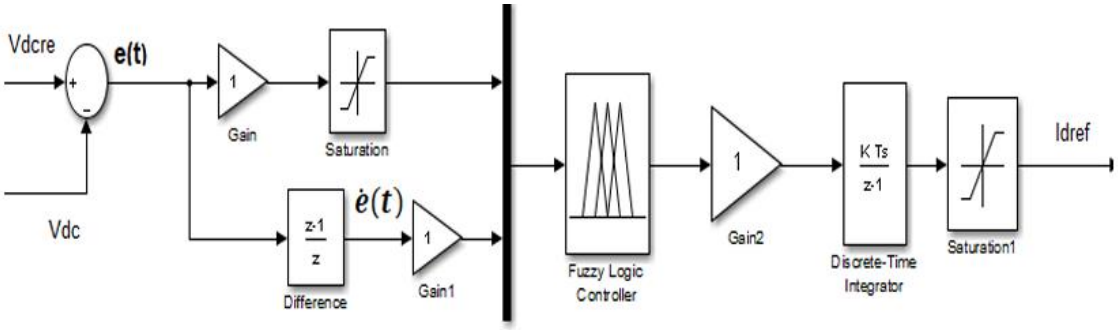
Model Tahmini Kontrol (MPC), özellikle güç kalitesi problemlerini kontrol etmek için DSTATCOM sistemlerinde kullanılan, popüler ve gelişmiş bir kontrol tekniğidir. Bu yöntemde geçmiş verilere dayanarak gelecekteki çıkışları hesaplandığı için olası dalga formu bozulmalarını önceden tahmin edilerek düzeltebilir. Genellikle, bu yöntemde referans akım ile ölçülen gerçek DSTATCOM akım arasındaki farkı minimize etmeye dayanan bir maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu duruma ek olarak yöntemde gerilim düşüm veya yükselmeleri sırasında yük gerilimini 1pu 'da tutulması sağlanabilir. MPC algoritması, iyi dinamik ve kararlı durum tepkisi sağlayarak uygulanması kolaydır ve aynı zamanda maliyet fonksiyonuna kolayca yeni kısıtlamalar eklenebilir. Ağırlık faktörlerinin

ayarlanması, yöntemin temel zorluğudur. Şekil 2.18'de DSTATCOM akım değerlerini kontrol etmek için kullanılan MPC modelinin şematik diyagramı gösterilmiştir [125].



Şekil 2. 18. MPC kontrollü DSTATCOM'un şematik diyagramı

DSTATCOM sistemlerinde kullanılan ve doğrusal olmayan güç kalitesi problemlerini çözümlemek üzere geliştirilen kontrol yöntemlerinden biri de Bulanık Mantık Kontrol (FLC) mekanizmasıdır. Bulanık mantık kontrolün en önemli avantajları matematiksel modele gerek duymaması, dilsel değişkenlerle çalışmasıdır. Bu durum geleneksel yöntemlere göre doğrusal olmayan güç kalitesini iyileştirmede daha başarılı olmasını, daha hızlı dinamik yanıt vermesini, daha az aşım ve daha kısa yerleşme süresine sahip olmasını sağlamaktadır [126,127]. Bu kontrol yaklaşımının dezavantajı ise uzman bilgisine dayanması yani üyelik fonksiyonları ve kuralların manuel olarak ayarlanmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için sinir ağları ve bulanık mantığın birlikte kullanılabileceği Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemi tercih edilmektedir. Şekil 2.19'de DSTATCOM için FLC kontrolör blok diyagramı gösterilmiştir [125].



Şekil 2. 19. DSTATCOM için FLC kontrolör blok diyagramı

DSTATCOM kontrolü için uygulanabilecek yöntemlerden biri de ANN tabanlı kontroldür. ANN kontrolörler, kara kutu mantığıyla çalışarak girdi-çıktı ilişkilerine dayanan doğrusal olmayan kontrolörlerdir. Bu nedenle, aşırı yük, ani yük değişimleri, arıza gibi doğrusal olmayan çeşitli güç kalitesi problemlerin çözümlenmesinde geleneksel yöntemlere göre başarılıdır. Aynı zamanda ANN tabanlı kontrol sistemleri yüksek verimlilik, kararlılık ve dinamik tepki süresine sahiptir. Ağın performansı, seçilen eğitim algoritması, parametre değerleri ve eğitim verisinin büyüklüğü gibi seçimlere karşı hassastır [125,128].

Tahmine dayalı/yapay zeka temelli kontrol sistemlerinde kullanılabilecek algoritmalardan biri de makine ve/veya derin öğrenme algoritmalarıdır. Günümüzde ANN, Bulanık Mantık, ANFIS gibi yapay zekâ tabanlı kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılırken, daha gelişmiş performans sergileyebilecek derin/makine algoritma tabanlı kontrol modelleri yeni geliştirilmeye başlanmıştır. Çünkü bu algoritmalar kontrol sistemleri ve güç kalite sorunları gibi doğrusal olmayan dinamik sistemlerin modellenmesi ve karmaşık sorunların çözümünde kullanılabilecek elverişli algoritmalardır [129]. Tez çalışmasında DSTATCOM kontrolü için derin öğrenme algoritmalarından olan LSTM algoritmasının kullanılması önerilmiştir.

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. ÇBAG Rüzgar Türbin Sistemi

ÇBAG'lü rüzgar türbin sistemleri şebekeye generatörün stator sargıları doğrudan bağlanırken, rotor sargıları AC/DC/AC dönüştürücü ile bağlanmaktadır. ÇBAG'lerde kullanılan tam ölçekli dönüştürücü ve kontrol sistemleri sayesinde generatörün rotor hızı kontrol edilerek reaktif güç ihtiyacının karşılanması, ani akımların sınırlandırılması sağlamaktadır.

Tablo 3. 1. Rüzgar türbin sistemi parametre ve değerleri

PARAMETRELER	DEĞERLER
Türbin Nominal Güç	3 MVA
Rotor Yarıçapı	41.43 m
Hava Yoğunluğu	1.225kg/m^3
Nominal Rüzgar Hızı	12m/s
İzin Verilen Eğim Açısı Aralığı	0-45 ^{o}
Maksimum Güç Faktörü	0.48
C Noktasındaki Güç	0.83 pu
Generatör Nominal Güç	3.33 MVA
Nominal Rms Hat Gerilimi	400V
Temel Açısal Frekans	314.16 rad/s
Kapasitör	0.02 F
DC Gerilim	840 V

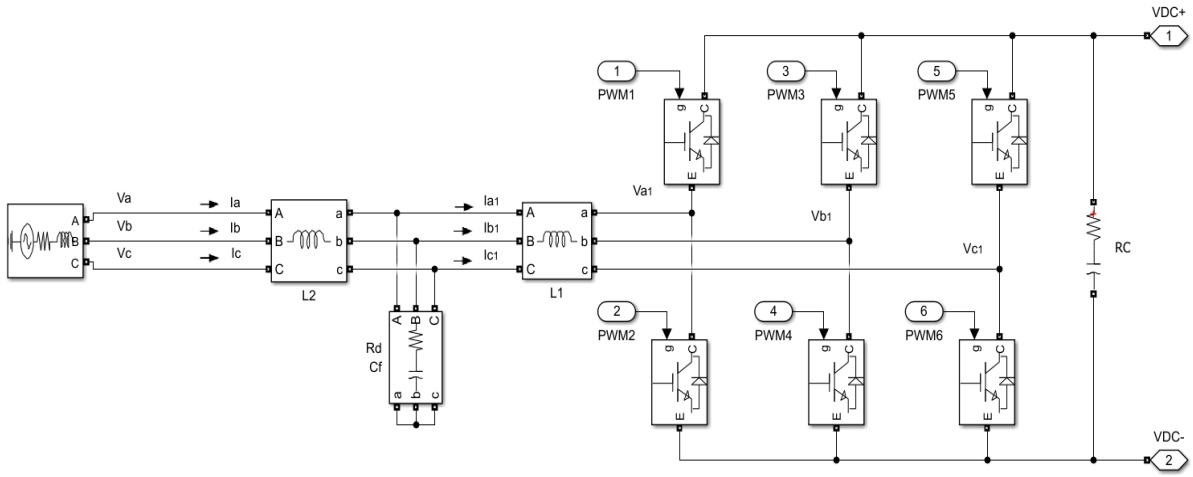
Tez çalışmasında 3 MVA gücünde ÇBAG'lü rüzgar türbin sistemi kullanılmıştır. ÇBAG modelinin tercih edilmesinde, şebeke güç kalitesi sorunları bakımından elverişli rüzgar türbin sistemlerinden biri olması, çıkış gücünün yüksek ve verimli olması, değişken hızlı çalışmaları etkili olmuştur. Çalışmada kullanılan ÇBAG'lü rüzgar türbin sistem modeli için parametre değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

3.2. LCL- DSTATCOM Modeli

Tez çalışmasında, ÇBAG'lü rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu bir şebekede güç kalite sorunlarının iyileştirilmesi amacıyla Şekil 3.1'de gösterilen LCL filtreli DSTATCOM kullanılmıştır. C dinamikleri nedeniyle LCL filtreli DSTATCOM'un matematiksel modellemesi ve matematiksel modellemeye dayalı ayrıştırılmış geleneksel kontrol sistem tasarımı daha karmaşık hale geldiğinden dolayı kontrol işleminde LCL filtresinin kapasitansı ihmal edilebilir. Yani, LCL filtresi L filtresine basitleştirilerek kontrol sistemi oluşturulur. Ancak bu basitleştirme işlemi sistemde salınımlı ve kararsız dinamik davranışlara neden olabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için ise genellikle pasif veya aktif sönümleme işlemi yapılmaktadır [111,112,130]. Çalışmada da LCL filtreli DSTATCOM kontrol sistemi için C dinamikleri ihmal edilmiş ve R_d direnci ile pasif sönümleme işlemi yapılmıştır. DSTATCOM ile LCL filtre parametre değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. 2. DSTATCOM ile LCL filtre parametre değerleri

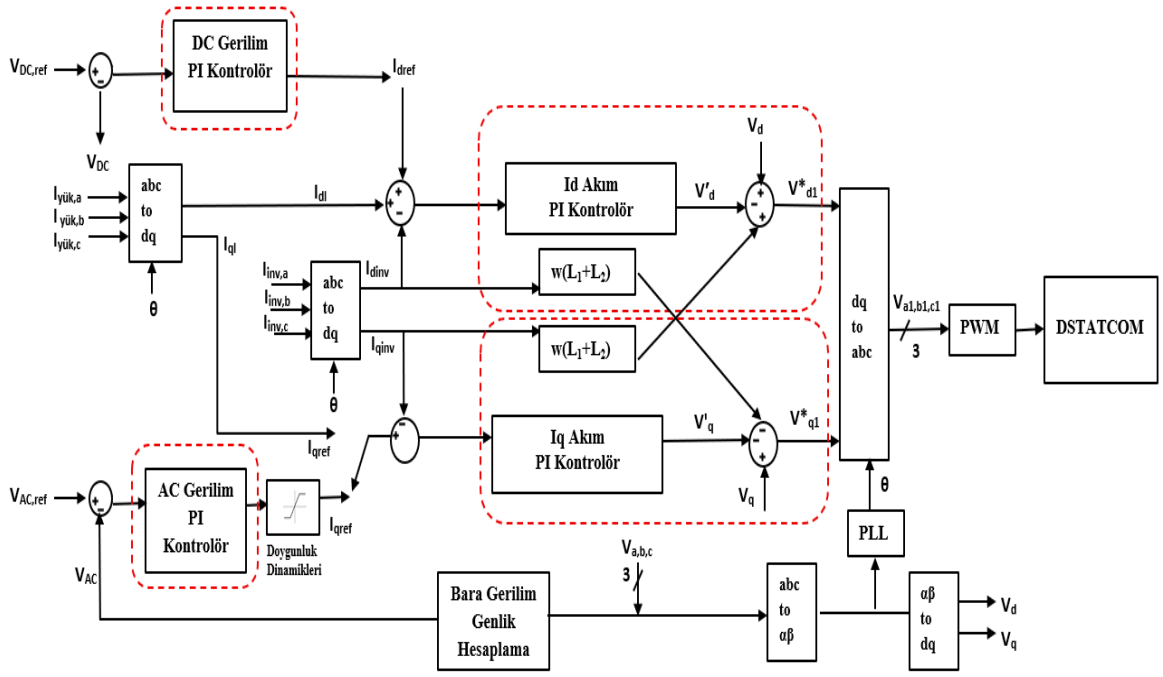
PARAMETRELER	DEĞERLER
Nominal Güç	1 MVA
AC çıkış rms hat gerilimi	400 V
DC gerilim	760 V
Anahtarlama Frekansı	10 kHz
Şebeke Frekansı	50 Hz
L_1	62.054 µH
L_2	37.23 µH
C_f	1mF
R_d	50 mΩ



Şekil 3. 1. DSTATCOM eşdeğer devre modeli

3.3. DSTATCOM Geleneksel PI Kontrol Sistemi

Gerilim kaynağı konvertörlü DSTATCOM için geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol yöntemi, iç içe bir döngü yapısına sahiptir. Dış döngü, DC gerilim ve AC gerilim PI kontrolör bloklarından oluşurken, iç döngü d ve q akım PI kontrolör bloklarından oluşmaktadır.



Şekil 3. 2. DSTATCOM için geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol sistemi yapısı

DC gerilim kontrolörde istenen ve gerçek kapasitör (DC) gerilimleri arasındaki farka bağlı olarak d referans akımının (i_{dref}) üretilmesi sağlanırken, AC gerilim kontrolör ile bara gerilim desteğine veya reaktif güç kompanzasyon gereksinimine göre q referans akımının (i_{qref}) üretilmesi sağlanmaktadır. Yani dış kontrol döngüleri ile referans dq akım bileşenleri elde edilir. İç akım döngüsü kontrolörleri ise, gerçek akım değerlerinin referans akım değerlerine ulaşmasını sağlayarak kontrol sinyallerine ulaşır. Akım kontrolör çıkışlarından elde edilen kontrol sinyalleri ile de ayrıştırma işlemi yapılarak referans d-q gerilim sinyalleri üretilmesi sağlanmaktadır. Bu referans gerilim sinyalleri de sırasıyla Ters Park ve Ters Clarke dönüşümleri ile üç fazlı sinyallere dönüştürülerek PWM 'e aktarılmakta ve DSTATCOM kontrol işlemi tamamlanmaktadır [3,130].

DSTATCOM için modellenen geleneksel ayrıştırılmış PI kontrol sistemi Şekil 3.2 'de gösterilmiştir. Bu kontrol sisteminde şebeke ortak bağlantı noktası (OBN) gerilim genlik değerinde değişiminin olmadığı normal şartlarda, q referans akımı yük akımına göre belirlenirken, gerilim değişimi durumlarında AC gerilim kontrol bloğu tarafından belirlenmektedir Yani gerilim değişimi esnasında AC gerilim kontrolör devreye girmekte ve gerilim değişim miktarına göre DSTATCOM kompanzasyon kapasitesini aşmayacak şekilde q referans akımını üretilmesini sağlamaktadır. PI kontroller hata değerlerini en aza indirmeye çalışarak istenilen referans değerlere ulaşılmasını sağlayan tek giriş tek çıkışlı kontrol bloklarıdır. Yani hata değerleri PI kontrol sistemlerinin temel giriş parametresidir. PI kontrollerde P oransal terimi Kp.e(t) ifadesine karşılık gelerek anlık hatayla orantılı bir kontrol sinyali üretilmesini sağlar. I terimi ise $K_i \int_0^t e(t)dt$ ifadesine karşılık gelir ve hatanın zamanla birikimini inceleyerek kalıcı durum hatasını hafifletir.

3.3.1. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO)

PSO algoritması sürü zekasına dayalı meta sezgisel algoritmalardan biridir. PSO algoritması sağlamlığı ve hızlı yakınsama özelliğinin yanı sıra evrimsel ve matematiksel algoritmalara göre daha az hafıza gerektirir ve uygulanması kolaydır [131]. Bu algoritma, PI/PID parametre ayarlamada yaygın olarak kullanılır. Çünkü, PSO algoritmasının PI kontrol sisteminde sabit durum hatası, daha küçük aşma miktarı, daha kısa yerleşme süresi, bozulmalar esnasında güçlü sönümleme kabiliyeti gibi iyileştirmeler sağladığı ve kontrol sistemlerine dayanan uygulamalarda başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [132,133]. Aynı zamanda literatürde, PSO algoritması ile kontrol sistemlerinin optimize edilmesi durumunda şebeke akımlarında daha düşük %THB değerlerinin elde edildiği

[134], adaptif yapısı sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının bağlı olduğu şebekelerde oluşabilecek değişimlere iyi uyum sağladığı, dolayısıyla güç kalitesini iyileştirerek şebeke kararlılığının korunmasına katkıda bulunduğu belirtilmiştir [135]. Algoritmanın kontrol sistemi ve şebeke güç kalitesi üzerindeki avantajları göz önüne alındığında, rüzgar türbini sisteminin bağlı olduğu şebekedeki DSTATCOM'un geleneksel PI kontrol sistemi için PSO algoritması kullanılmıştır. Ancak, bu algoritma her zaman küresel optimumu garanti etmez. PSO algoritmasının bu dezavantajını iyileştirmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Literatürde, PSO algoritmasının farklı bir algoritma ile birleştirildiği hibrit modeller önerilmiştir. Örneğin, PSO algoritmasının küresel arama yeteneğini artırmak ve sistem kararlılığını iyileştirmek için [136] 'da Osprey Optimizasyon PSO (OOPSO), [137]'de PSO - Yapay Sinekkuşu Algoritması (PSO-AHA) önerilmiştir. Bu durumda uygulanabilecek bir diğer yöntem ise optimizasyon işlemi sırasında farklı şartların oluşturulduğu simülasyon modelini eş zamanlı olarak çalıştırmaktır. Çünkü bu optimizasyon işlemi matematiksel modellemede genellikle ihmal edilen doğrusal olmayan sistem etkilerinin azaltılmasına ve algoritmanın mevcut sistemi daha iyi tanımasına olanak sağlamaktadır [138,139]. Bu amaçla gerçekleştirilen optimizasyon işlemi süresince simülasyon çalıştırılmıştır. PSO algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Çalışmada geleneksel PI kontrol sisteminin performansını iyileştirmek amacıyla çalışmada, PI kontrolör parametre değerleri PSO algoritması kullanılarak ayarlanmıştır. Optimizasyon işleminde K_p ve K_i parametre değerleri için farklı alt ve üst sınır değerlerine sahip iki ayrı sürü oluşturulmuş ve PI kontrolörlerinin parametre değerleri Tablo 3.3'teki gibi elde edilmiştir. Ayarlama işlemi yapılırken hata değerleri sırasıyla Denklem 3.1 ile Denklem 3.4'teki gibi hesaplanırken, ISE performans kriterine göre toplam hata değeri Denklem 3.5'teki amaç fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonu ile tüm kontrolörlerin aynı anda optimize edilmesi sağlanmıştır.

$$e_{dc} = V_{DC,ref} - V_{DC} \tag{3.1}$$

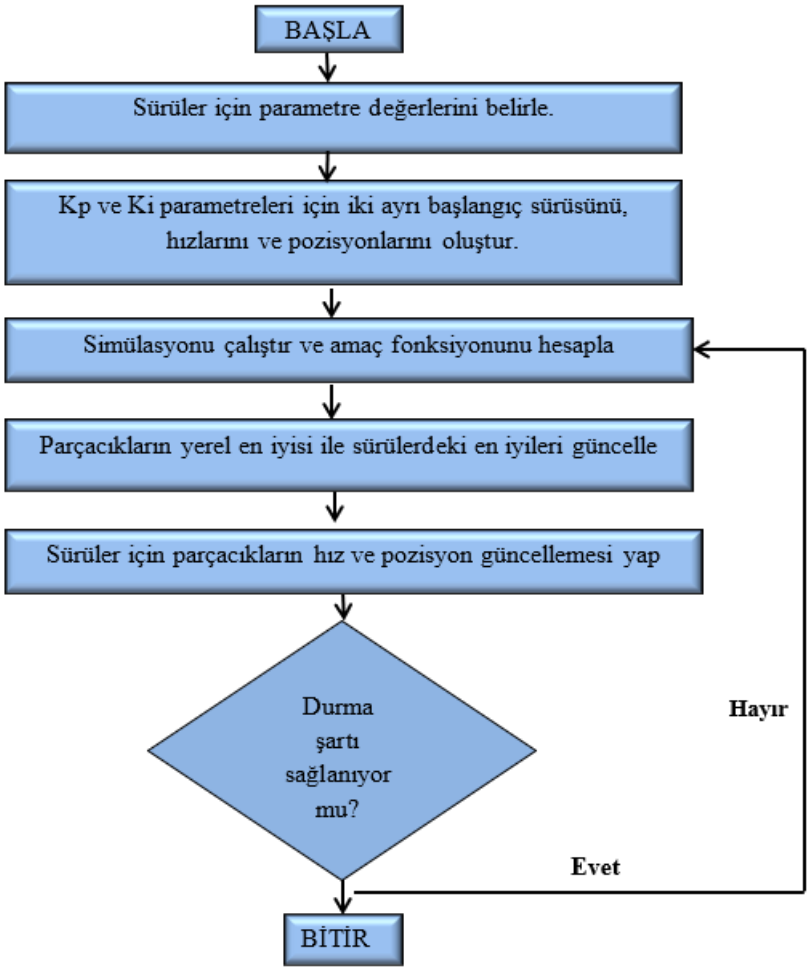
$$e_{ac} = V_{AC,ref} - V_{AC} \tag{3.2}$$

$$e_d = I_{d,ref} - I_d \tag{3.3}$$

$$e_q = I_{q,ref} - I_q \tag{3.4}$$

$$OF(x) = \int_o^\infty e_{dc}^2(t)\,.\,dt + \int_o^\infty e_{ac}^2(t)dt + \int_o^\infty e_d^2(t)dt + \int_o^\infty e_q^2(t)dt \tag{3.5}$$

$$x = [K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, K_{i4}] \quad (3.6)$$



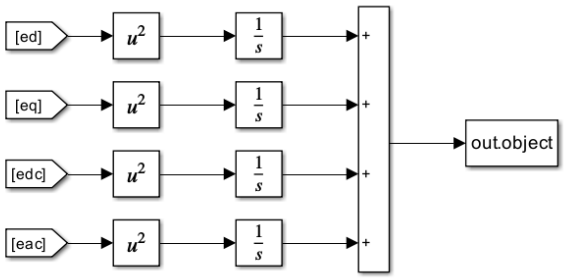
Şekil 3. 3. PSO akış diyagramı

Tablo 3. 3. PSO ile ayarlanan PI parametre değerleri

Kontrolörler	K_p	K_i
DC Gerilim Kontrolör	4.5732	300
AC Gerilim Kontrolör	226.2836	802.2836
Id Akım Kontrolör	83.8358	670.6864
Iq Akım Kontrolör	24.5902	700

Optimizasyon işleminde ilk olarak, PI bloğu içerisindeki her bir kazanç değişkeni 'Model Workspace' ortamında 'Simulink.parameter' olarak tanımlanmıştır. Bu sayede PSO algoritması tarafından belirlenen PI parametre değerlerinin 'Simulink'e aktarımı sağlanmış ve 'sim' komutu ile ilgili parametre değerleri için Simülasyon modeli

çalıştırılmıştır. Simülasyon modelinin çalışması sonucunda elde edilen hata değerleri kullanılarak Şekil 3.4'te Simulink model ile ISE kriterine dayalı amaç fonksiyonu hesaplanmıştır. Hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri 'to File' bloğu ile PSO algoritmasının çalıştırıldığı M-file dosyasına aktarılmıştır. İterasyonlar boyunca elde edilen amaç fonksiyonu değerlerine göre algoritma parçacık ve sürü en iyilerini güncelleyerek optimum çözümlere ulaşmaya çalışmıştır. Sonuç olarak, M-file ile Simulink arasında gerçekleştirilen bu bilgi aktarımı ile PI parametrenin PSO algoritması ile ayarlanması sağlanmıştır.



Şekil 3. 4. ISE kriterine dayalı amaç fonksiyonun Simulink modeli

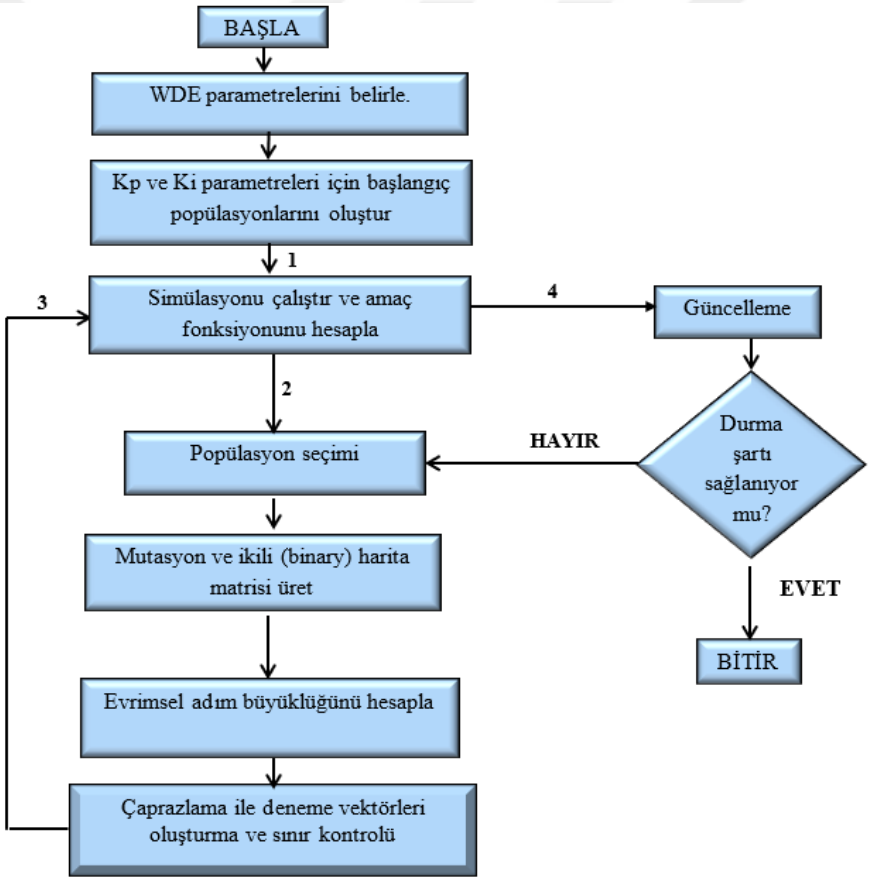
3.3.2. Ağırlaştırılmış Diferansiyel Gelişim Algoritması (WDE)

Geleneksel Diferansiyel Gelişim (DE) algoritmasında küresel optimuma yaklaşırken yakınsama yavaşlar. Bu duruma bağlı olarak Ağırlaştırılmış Diferansiyel Gelişim (WDE) algoritması ilgili arama bölgesini daha iyi seçip yakınsamayı hızlandırmak amacıyla geliştirilmiştir. WDE algoritması seçim, mutasyon ve çaprazlama gibi evrimsel işlemlerinin gerçekleştirildiği ve birbiriyle etkileşimli alt popülasyonların iş birliğine dayanan bir meta sezgisel algoritmadır. Bu algoritmada tüm parametrelerin rastgele belirlenmesi, özyinelemeli olmayan kolayca paralel hale getirilebilecek yapısı nedeniyle oldukça hızlıdır [140]. Bu algoritma karmaşık mühendislik problemi çalışmalarında uygulanmış ve başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [141,142].

Tablo 3. 4. WDE ile ayarlanan PI parametre değerleri

Kontrolörler	K_P	$K_İ$
DC Gerilim Kontrolör	5.3279	335.5349
AC Gerilim Kontrolör	238.3428	746.1171
Id Akım Kontrolör	62.5558	676.8448
Iq Akım Kontrolör	21.1881	591.8446

Çalışma da farklı bir meta-sezgisel algoritma kullanılarak PSO-PI kontrol sistem performansının değerlendirilebilmesi ve önerilen zeki kontrol sistemlerinin katkılarının doğrulanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda WDE meta sezgisel algoritması, DSTATCOM kontrolündeki PI kontrolörlerinin parametrelerini ayarlamak amacıyla kullanılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek adına, PSO ile optimizasyon sırasında kullanılan sürü büyüklüğü, iterasyon sayısı ve amaç fonksiyonu aynı olacak şekilde parametre ayarlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan WDE algoritmasının akış diyagramı Şekil 3. 4'te ve elde edilen PI parametre değerleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. WDE akış diyagramı

3.4. Tasarlanan Zeki Kontrol Sistemleri

ANN ve LSTM tabanlı kontrol sistemleri, DSTATCOM geleneksel kontrol sisteminde yer alan PI kontrolörlerinin yerine zeki kontrolörlerin getirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu nedenle, geleneksel kontrol sisteminde yer alan her bir PI kontrolör için zeki kontrolör tasarlanırken ilgili PI kontrolörün giriş ve çıkış değişkenleri dikkate alınmıştır. Ancak

modellenen PI bloklarının giriş-çıkış değişkenleri ile zeki kontrolörlerin giriş-çıkış değişkenleri arasında iki temel farklılık vardır. Birinci farklılık, PI bloklarının giriş değişkeni sadece hata değerleri iken zeki kontrollerinin girişi hata (e) ve hatanın integrali (s) olarak belirlenmiştir. Burada s parametresinin girişe dahil edilmesinin nedeni s değerinin, parametre değişiklikleri durumunda zeki kontrol sistemde oluşabilecek kalıcı durum izleme hatasının çözülmesini sağlamasıdır [5]. İkinci farklılık ise akım kontrolörlerinin çıkışlarıdır. I_d akım ve I_q akım PI kontrolör çıkışları sırasıyla V_d' ve V_q' kontrol sinyalleridir. Bu kontrol sinyalleri kullanılarak ayrıştırma işlemi ile referans V_d^* ve V_q^* sinyalleri elde edilir. Tasarlanan zeki kontrol sistemlerinde referans sinyalleri herhangi bir ayrıştırma işlemi yapılmadan doğrudan elde edilmiştir. Yani, I_d akım ve I_q akım zeki kontrolörlerin çıkışları V_d^* ve V_q^* referans sinyalleri olarak belirlenmiştir. Bu yolla, kontrol sisteminin filtre parametre değişim dayanıklılığının artırılması amaçlanmıştır.

Zeki kontrol sistemleri tasarlanan her kontrolör modelin sistem içerisindeki görevi ayrıdır. Tüm şebeke koşulları için DC gerilim kontrolör modeli I_{dref} akımını üreterek DC gerilim regülasyonunu sağlarken, I_d ve I_q akım kontrolör modelleri sırasıyla aktif ve reaktif güç kontrolünü gerçekleştirmektedirler. AC gerilim kontrolör modeli ise şebeke gerilim değişimi sırasında gerekli I_{qref} akımını belirleyerek AC gerilim desteği sağlar. Yani, AC kontrolör modeli sadece gerilim değişimi sırasında çalışırken, diğer kontrolör modelleri tüm şebeke koşulları altında aktif olarak çalışmaktadır.

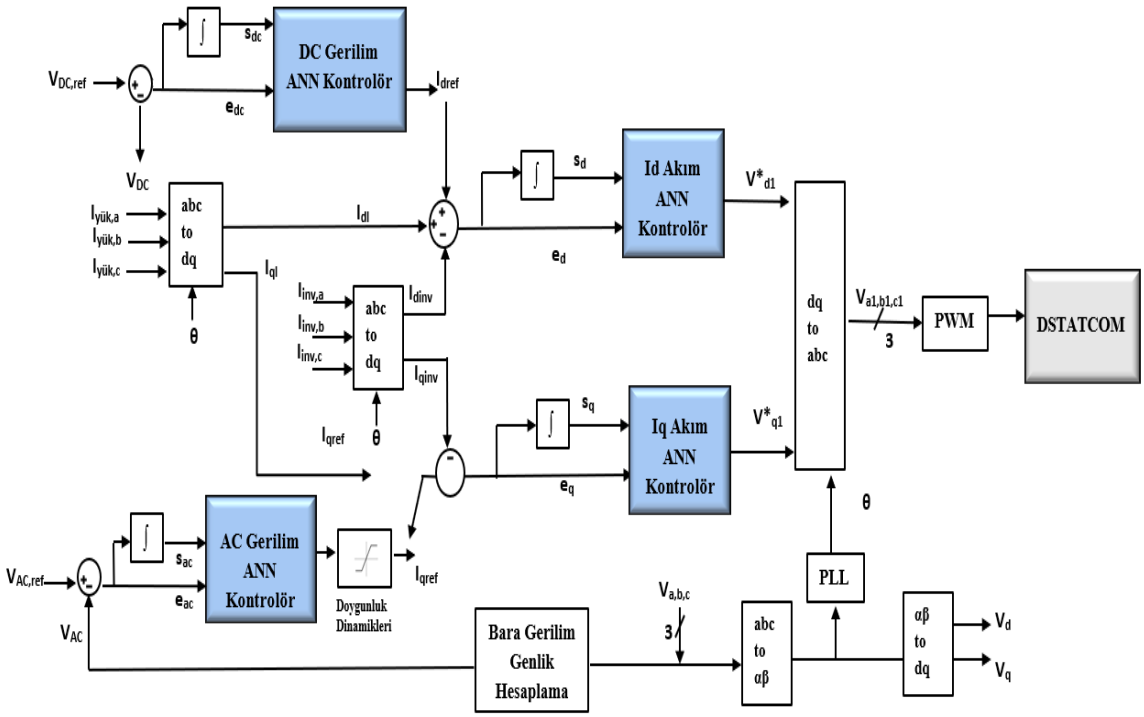
3.4.1. Veri Seti

Eğitim süreci için gerekli veri seti, simülasyonda farklı yük değişimleri, gerilim düşüşü ve yükselme işlemleri gerçekleştirilerek geleneksel PI kontrol sisteminden alınmıştır. Elde edilen her bir parametre için toplam 157.500 adet veri, %80 eğitim, %10 doğrulama ve %10 test olmak üzere ANN kontrol blokları için rastgele ve LSTM kontrol blokları için sıralı olarak ayrılmıştır.

3.4.2. ANN Tabanlı Kontrol Sistemi

ANN algoritması kontrol sistemlerinde kullanılabilecek elverişli yöntemlerden biridir. Çünkü bu algoritmanın uyarlanabilir öğrenme yeteneği, ANN tabanlı kontrol sistemlerinin PI/PID kontrol sistemlere göre daha üstün performans sergilemesini sağlamaktadır. Literatürde ANN'in kontrol sistemlerindeki başarısını ispat eden geçmiş

ve güncel birçok çalışma vardır. Gerçekleştirilen çalışmalarda ANN algoritmasının kontrol sistem sonuçlarında daha küçük aşma miktarı, daha kısa yerleşme süresi, daha hızlı stabilizasyon gibi iyileştirmeler sağladığı ve doğrusal olmayan durumlarda sistem dayanıklılığını arttığı ifade edilmiştir [143]. ANN algoritması, kontrol sisteminde sağlamış olduğu bu avantajlar sayesinde güç dalgalanmaları, harmonik bozulmalar, frekans dengesizliği gibi güç kalite sorunlarının iyileştirilmesinde başarılı sonuçlar vermektedir [130,144,145]. Bu durumlara bağlı olarak çalışmada ANN tabanlı kontrol sistemi tasarlanmıştır.

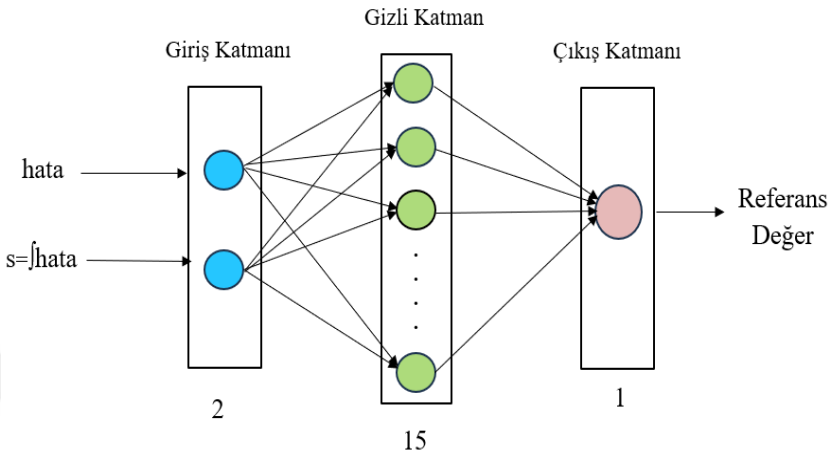


Şekil 3. 6. DSTATCOM için tasarlanan ANN tabanlı kontrol sistem modeli

Geleneksel PI kontrol sistemindeki PI kontrol blokları yerine ANN kontrolörleri tasarlanmış ve DSTATCOM kontrolü için yeni bir ANN tabanlı kontrol sistemi modellenmiştir. Oluşturulan kontrol sisteminde, ikisi gerilim, ikisi akım olmak üzere toplam 4 ayrı ANN kontrol bloğu bulunmaktadır. Modelin doğruluğunu artırmak için verilere Denklem 3.1'de gösterilen min-max normalizasyon yöntemi uygulanmıştır.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{3.1}$$

ANN kontrolörlerinin parametre değerleri Tablo 3.6 'da, modellenen ANN tabanlı kontrol sistemi ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir. 2 giriş ve 1 çıkışa sahip ANN kontrolörlerinin yapısı Şekil 3.7 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7. ANN kontrolörlerinin yapısı

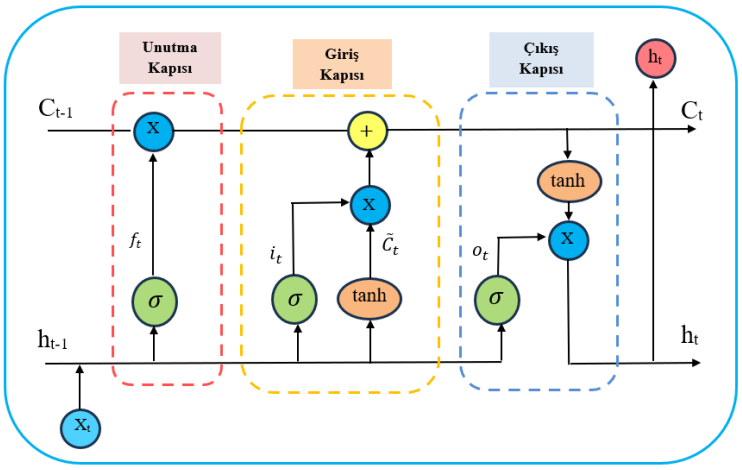
Tablo 3. 5. ANN kontrolörlerin parametre değerleri

Parametreler	ANN Kontrolörler			
	DC Gerilim Kontrolör	AC Gerilim Kontrolör	I_d Akım Kontrolör	I_q Akım Kontrolör
İterasyon Sayısı	137	305	450	296
Katman Sayısı	3			
Gizli katman sayısı	1			
Gizli katman nöron sayısı	15			
Eğitim algoritması	Levenberg-Marquardt Algorithm			
Aktivasyon Fonksiyonu (gizli katman/çıkış katmanı)	tansig/purelin			

3.4.3. LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde yaygın kullanımı, güç sistemindeki belirsizliklerin artmasına ve sistemin doğrusal olmayan dinamik özellikler göstermesine neden olmaktadır. Bu durum, mevcut kontrol sistemlerini yetersiz

kılmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, doğrusal olmayan sistemleri kontrol ederek belirsiz ve karmaşık problemleri çözmek için kullanışlı yöntemlerdir [146]. LSTM, yaygın olarak kullanılan derin öğrenme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, RNN'de gözlenen gradyan patlaması ve kaybolma problemlerinin çözülmesine olanak tanır ve karmaşık sıralı veriler için uzun ve kısa vadeli bağımlılıkları yakalamada etkilidir. Tekrarlayan yapısı ve güçlü belleği nedeniyle, doğrusal olmayan sistemlerde ve zamana bağlı tahmin çalışmalarında başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir [130,147-149]. Çalışmada kullanılan verilerin zamana bağlı olması ve güç kalitesi problemlerinin doğrusal olmayan belirsiz yapılara sahip olması nedeniyle, LSTM algoritması DSTATCOM kontrolü için bir derin öğrenme yöntemi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. 8. LSTM hafıza hücresi

LSTM hafıza hücresi Şekil 3.8'de gösterildiği gibi sırasıyla unutma kapısı (f_t), giriş kapısı (i_t) ve çıkış kapısı (o_t) olmak üzere 3 kapıdan oluşmaktadır. Unutma kapısı, hangi bilginin hücre durumundan atılacağı kararının verildiği kapıdır. Bu kapıda, (t-1) anındaki önceki hücrenin gizli çıkış vektörü (h_{t-1}) ile t anındaki giriş vektörü (x_t) sigmoid fonksiyonuna aktarılmakta ve çıkışın 0 ile 1 arasında sınırlandırılması sağlanmaktadır. 1 değeri, bilgiyi tamamen saklamayı ifade ederken, 0 değeri bilgiden tamamen kurtulmayı ifade etmektedir. Bir sonraki kapı ise bilgilerin güncellendiği giriş kapısıdır. Burada sigmoid fonksiyonu ile hangi bilginin güncelleneceğine karar verilirken, tanh fonksiyonu ile yeni bilgiler için Denklem 3.5'de gösterilen aday vektörler ($\tilde{C}_t$) oluşturulur [5,150]. Sigmoid ve hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonları sırasıyla Denklem 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda yeni hücre durumu (C_t) , Denklem 3.6'da gösterildiği gibi elde edilmektedir. Yani yeni hücre durumunun kontrolü unutma ve giriş

kapısı ile sağlanmaktadır. LSTM'nin son kapısı ise sigmoid fonksiyonu ile hücredeki hangi bilgilerin çıktı olarak aktarılacağı kararının verildiği çıkış kapısıdır. Burada, tanh fonksiyona aktarılan yeni hücre durumu çıkış kapısının çıktısıyla çarpılır ve LSTM hücresinin yeni çıkışı (h_t) elde edilir [151-153].

$$f_t = \sigma\left(W_f[x_t, h_{t-1}] + b_f\right) \tag{3.2}$$

$$i_t = \sigma(W_i[x_t, h_{t-1}] + b_i) \tag{3.3}$$

$$o_t = \sigma(W_o[x_t, h_{t-1}] + b_o) \tag{3.4}$$

$$\tilde{C}_t = tanh(W_c[x_t, h_{t-1}] + b_c) \tag{3.5}$$

$$C_t = f_t C_{t-1} + \tilde{C}_t \tag{3.6}$$

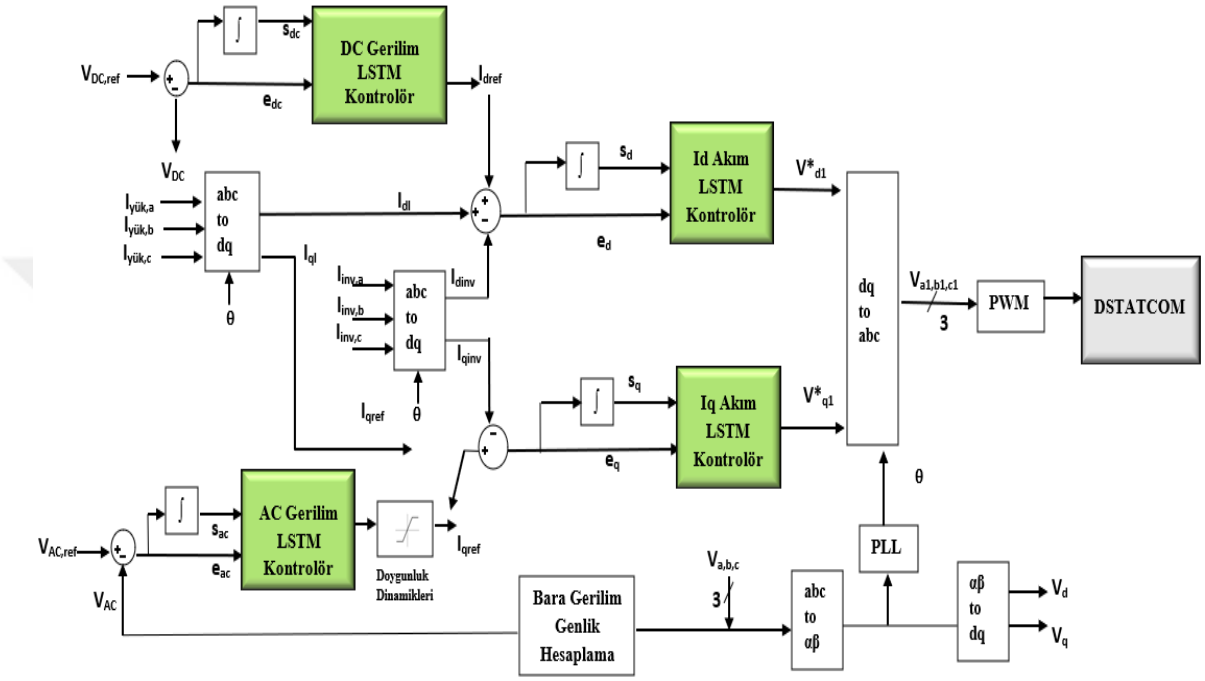
$$h_t = o_t \tanh(C_t) \tag{3.7}$$

$$\sigma_x = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{3.8}$$

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \tag{3.9}$$

LSTM'nin yapısındaki parametre fazlalığı nedeniyle hesaplama karmaşıklığı zorluğu dikkat edilmesi gereken sorunlardan biridir. LSTM' nin hesaplama karmaşıklığı gerçekleştirilen işlem sayısı ile eğitilebilir parametre sayısına bağlı olarak hesaplanabilir. Yapısında her biri dört farklı terimden oluşan bias kümesi [b_f, b_i, b_o, b_c], giriş verileri için ağırlık kümesi [W_f,W_i,W_o,W_c] ve gizli durumlar için yinelemeli ağırlık kümesi [U_f,U_i,U_o,U_c] vardır. Bu duruma bağlı olarak *m* adet girişi, *n* adet çıkışı olan ağda, LSTM hücresindeki her kapı ve hücre durumu için *n* adet bias kümesi *nm* boyutunda *U* matrisi ve *nn* boyutunda *W* matrisi bulunmaktadır. Yani LSTM bellek karmaşıklığı $4(nm + n^2 + n)$ ile hesaplanmaktadır. Bir eğitim adımındaki işlem sayısı yani zaman karmaşıklığı ise $mn(n+(m-1)) = n^2m+nm^2 - nm$ ile hesaplanmaktadır. Bu durum 3 kapı, hücre durumu ve k zaman adımı için gerçekleştirildiğinde LSTM zaman karmaşıklığı $4k(n^2m+nm^2 - nm)$ olarak elde edilecektir [154,155]. Bu zorluğu azaltmak için, LSTM' de ağırlık optimizasyon teknikleri olarak gelişmiş meta-sezgisel algoritmalar kullanılabilir. Bu algoritmalar basit ve esnek oldukları için, amaç fonksiyonuna odaklanırlar ve gradyan hesaplaması gerektirmezler [154]. Literatürde hesaplama karmaşıklığı için önerilen yöntemlerden biri, ağırlık matrisi çarpanlarına ayırma işlemidir [156]. ANN modeli için toplam parametre sayısı $(nm + 2n + 1)$ ile hesaplanır [130,157].

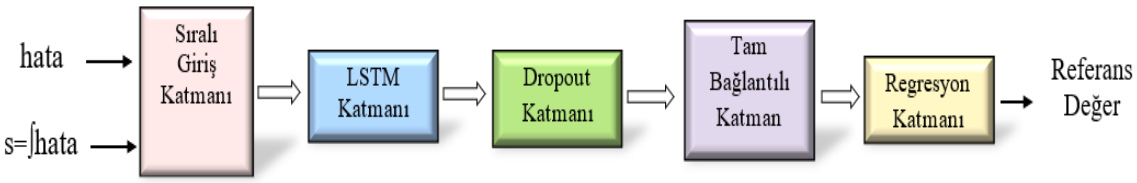
Geleneksel PI kontrol sistemindeki PI kontrol blokları yerine LSTM kontrolör blokları tasarlanmış ve DSTATCOM kontrolü için yeni bir LSTM tabanlı kontrol sistemi modellenmiştir. Bu nedenle modellenen kontrol sisteminde, ikisi gerilim, ikisi akım olmak üzere toplam 4 ayrı LSTM kontrolör bloğu bulunmaktadır.



Şekil 3. 9. DSTATCOM için tasarlanan LSTM tabanlı kontrol sistem modeli

ANN tabanlı kontrol sisteminde olduğu gibi, bu kontrol sisteminde de referans gerilim sinyalleri doğrudan akım kontrolörlerinin çıkışından üretilmiştir, yani herhangi bir ayrıştırma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Modelin doğruluğunu artırmak için verilere Z-Puanı normalizasyon yöntemi uygulanmıştır. Z-Puanı normalizasyon yöntemi, hesaplama, Denklem 3.10'da gösterildiği gibi verilerin standart sapması ve aritmetik ortalaması kullanılarak gerçekleştirilmektedir [147]. μ(x) verilerin aritmetik ortalaması, σ(x) ise verilerin standart sapmasıdır. LSTM kontrolörlerinin parametre değerleri Tablo 3.6 'da, modellenen LSTM tabanlı kontrol sistemi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. 2 giriş ve 1 çıkışa sahip LSTM kontrolörlerinin yapısı ise Şekil 3.10 'da gösterilmiştir.

$$x' = \frac{x-\mu(x)}{\sigma(x)} \tag{3.10}$$



Şekil 3. 10. LSTM kontrolörlerinin yapısı

Tablo 3. 6. LSTM kontrolörlerin parametre değerleri

Parametreler	LSTM Kontrolörler			
	DC Gerilim Kontrolör	AC Gerilim Kontrolör	I_d Akım Kontrolör	I_q Akım Kontrolör
Maksimum iterasyon	1	2	3	2
Droupout	0.2	0.3	0.2	0.2
Katman sayısı	5			
Gizli katman sayısı	1			
Gizli katmandaki LSTM birimlerinin sayısı	64			
Optimizasyon algoritması	Adam			
Öğrenme oranı	0.01			
Minibatchsize	1024			

Tasarlanan modellerin yüksek doğruluğa sahip olmasının yanı sıra Simulink ortamında kararlı bir performans sergilemesi de oldukça önemlidir. Bu nedenle manuel olarak çok sayıda deneme ile gerçekleştirilen hiper parametre ayarlamasında, bu iki kriter dikkate alınmıştır. Modeller için Mean Squared Error (MSE) kayıp fonksiyon kullanılmıştır. Öncelikle, modellerin eğitim sürecinde yüksek doğruluk ve küçük hata değerlerine ulaşması hedeflenmiş ve hiper parametre değerleri ayrı ayrı değiştirilerek en uygun parametre değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Küçük hata değerine sahip olacak şekilde eğitim işlemleri gerçekleştirildikten sonra sırasıyla I_d akım, I_q akım, DC gerilim ve AC gerilim kontrolör modelleri Simulink'e aktarılmış ve her bir model aktarımında farklı şartlar altında kontrol sistem sonuçları test edilerek, %THB değerlerinde iyileştirme sağlanıp sağlanmadığına bakılmıştır. Küçük MSE değerine sahip olan bir modelin Simulink'te farklı şartlar altında kararsız performans sergilemesi ve/veya %THB

değerlerinde iyileştirme sağlamaması durumunda farklı hiper parametre değerleri ile eğitim işlemi tekrarlanmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen çok sayıda deneme sonucunda her iki kriteri de sağlayacak en uygun hiper parametre değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

ANN ve LSTM modelleri için performans ölçütü olarak MSE ve R^2 değerleri kullanılmıştır. MSE değeri Denklem 3.11 ile elde edilirken, R^2 değeri Denklem 3.12 ile hesaplanmaktadır. y_i, $\tilde{y}i$ ve $\bar{y}$ sırasıyla gözlenen değeri, tahmin edilen değeri ve ortalama değeridir. N ise veri sayısını ifade etmektedir [158].

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \tilde{y}_i)^2 \tag{3.11}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \tag{3.12}$$

Tablo 3. 7. ANN ve LSTM kontrolör modellerinin performansları

Kontrolör Modelleri	ANN Tabanlı Kontrol Sistemi			LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi		
	MSE	R^2	Eğitim Süresi	MSE	R^2	Eğitim Süresi
DC Gerilim Kontrolör	1.014e-06	0.9988	28 s	5.297e-07	0.9991	49 s
AC Gerilim Kontrolör	9.400e-07	0.9996	1 dk 4 s	3.133e-07	0.9993	2 dk 7 s
I_d Akım Kontrolör	2.135e-03	0.9935	1 dk 30 s	3.479e-04	0.9964	3 dk 6 s
I_q Akım Kontrolör	2.401e-06	0.9997	58 s	4.437e-06	0.9957	2 dk 14 s

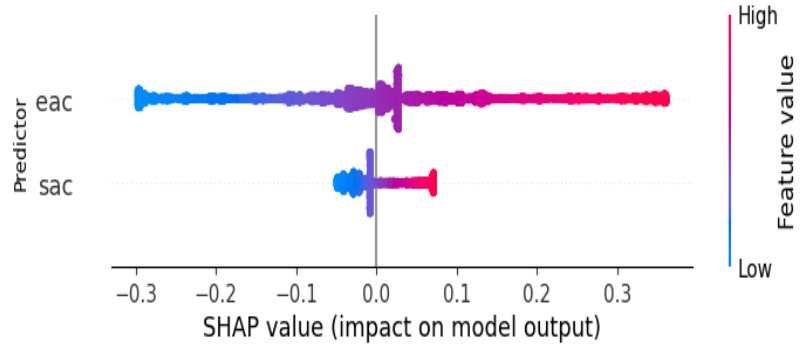
Tablo 3.7'de ANN ve LSTM kontrolör modellerine ait performans metriği sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlara göre, ANN modeli I_q akım denetleyicisi için daha küçük MSE değerine sahipken, LSTM modelleri kalan tüm denetleyiciler için daha küçük MSE değerlerine sahiptir. Aynı zamanda, hem LSTM hem de ANN kontrolör modelleri için R^2 değerleri 0,99 bandında elde edilmiştir. Bu değer, modellerin yüksek doğruluğa sahip

olduğunu göstermektedir. MSE ve R^2 değerleri açısından her iki sistem için de en başarılı model AC gerilim kontrolörü iken, en az başarılı model DC gerilim kontrolörü olmuştur. Artan parametre sayısı eğitim süresinin uzamasına neden olmaktadır. LSTM modellerinin parametre sayısı ANN modellerine göre daha fazla olduğu için tüm kontrolörler için ANN eğitimi daha kısa sürede tamamlanmıştır.

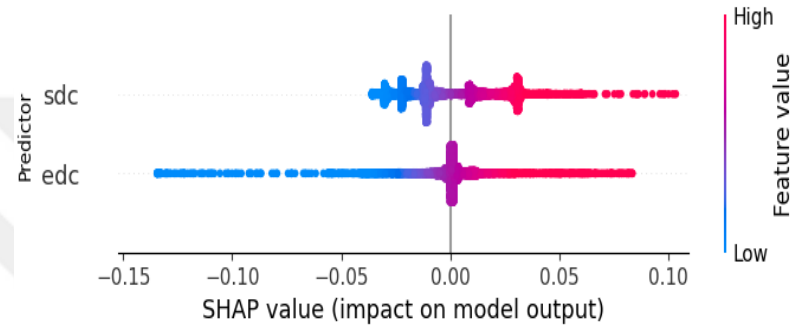
3.4. SHAP Analiz

SHapley Additive exPlanations (SHAP), her bir özelliğin çıkış üzerindeki etkisini gösteren oyun teorisi tabanlı bir yöntemdir. SHAP özet grafikleri ile modelin girdi ve çıktıları arasındaki ilişkiyi anlayabiliriz. Bu grafiklerde özellikler önem sırasına göre y ekseninde yukarıdan aşağıya doğru sıralanır. x eksenindeki SHAP değerlerinin büyüklüğü özelliklerin katkısı hakkında bilgi verirken, işareti özelliğin tahmin üzerindeki etki yönünü gösterir. Yani pozitifse SHAP değerleri tahmin değerini artırırken, negatif SHAP değerleri azaltır. Grafikte renkler ise sırasıyla kırmızı yüksek mavi ise düşük olacak şekilde özellik büyüklüğünü belirtir [159,160].

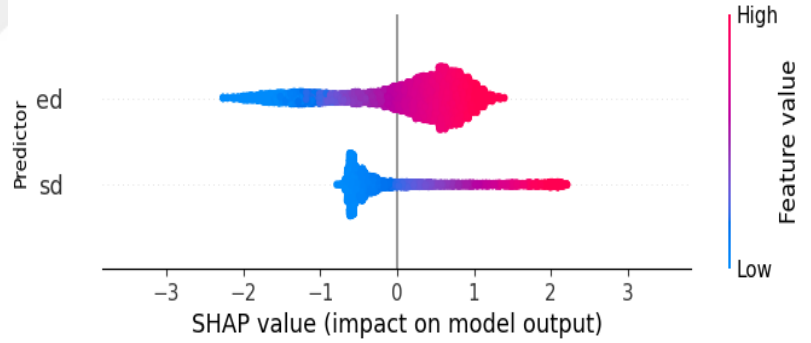
Şekil 3.11'de LSTM modeller için SHAP özet grafikleri gösterilmiştir. AC ve DC gerilim kontrollör modeli için yüksek hata ve integral değerleri model çıktısını artırırken, düşük hata ve integral değerleri model çıktısını azaltmaktadır. Önem sırasına göre DC gerilim modelinde edc, AC gerilim modelinde sdc y ekseninde üst tarafta yer alırken, her iki model için e özelliğinin s özelliğine göre daha geniş bir SHAP dağılımına sahiptir. Kalınlık verilerin yoğunluğu hakkında bilgi vermektedir. Gerilim kontrolör modellerinde nispeten daha simetrik bir dağılım varken, akım kontrollör modellerinde yüksek e değerleri ile düşük s değerleri daha yoğun olarak bulunmaktadır. I_q ve I_d kontrollör modelleri için de yüksek hata ve integral değerleri model çıktısını artırırken, düşük hata ve integral değerleri model çıktısını azaltmaktadır. Aynı zamanda her iki modelde de e pozitife doğru , s ise negatife doğru geniş bir SHAP dağılımına sahiptir. Bu durum model tahmini için her iki özelliğinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



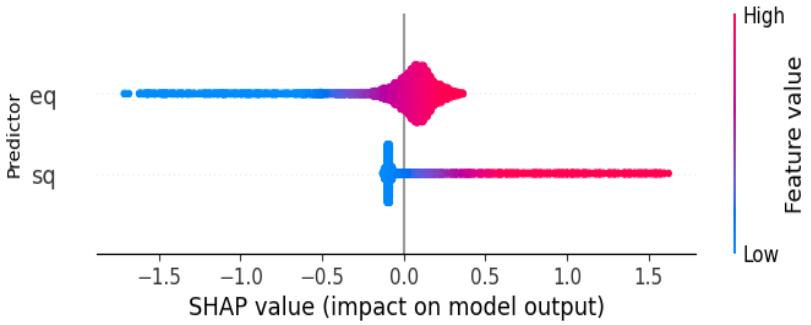
(a)



(b)



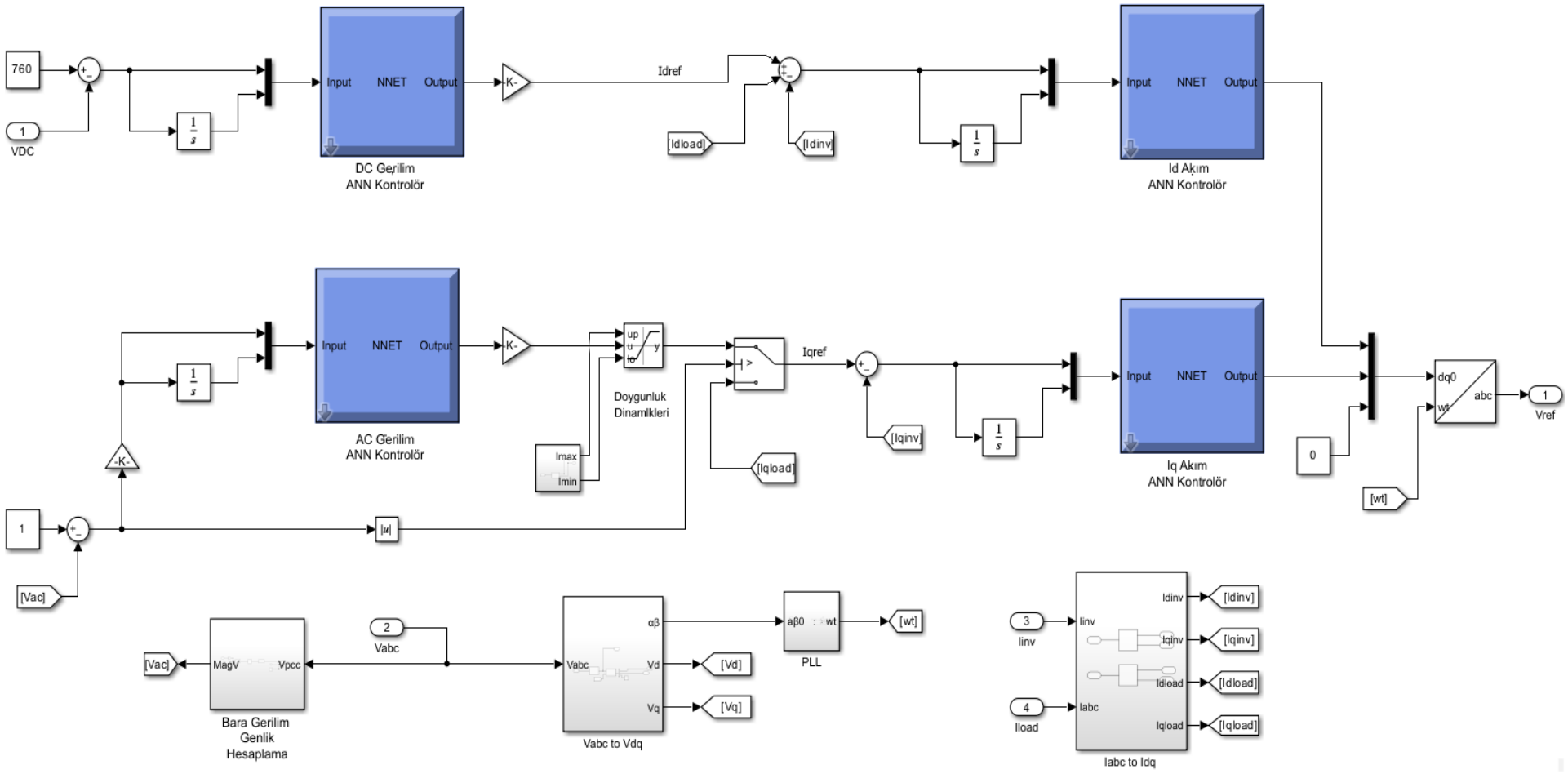
(c)



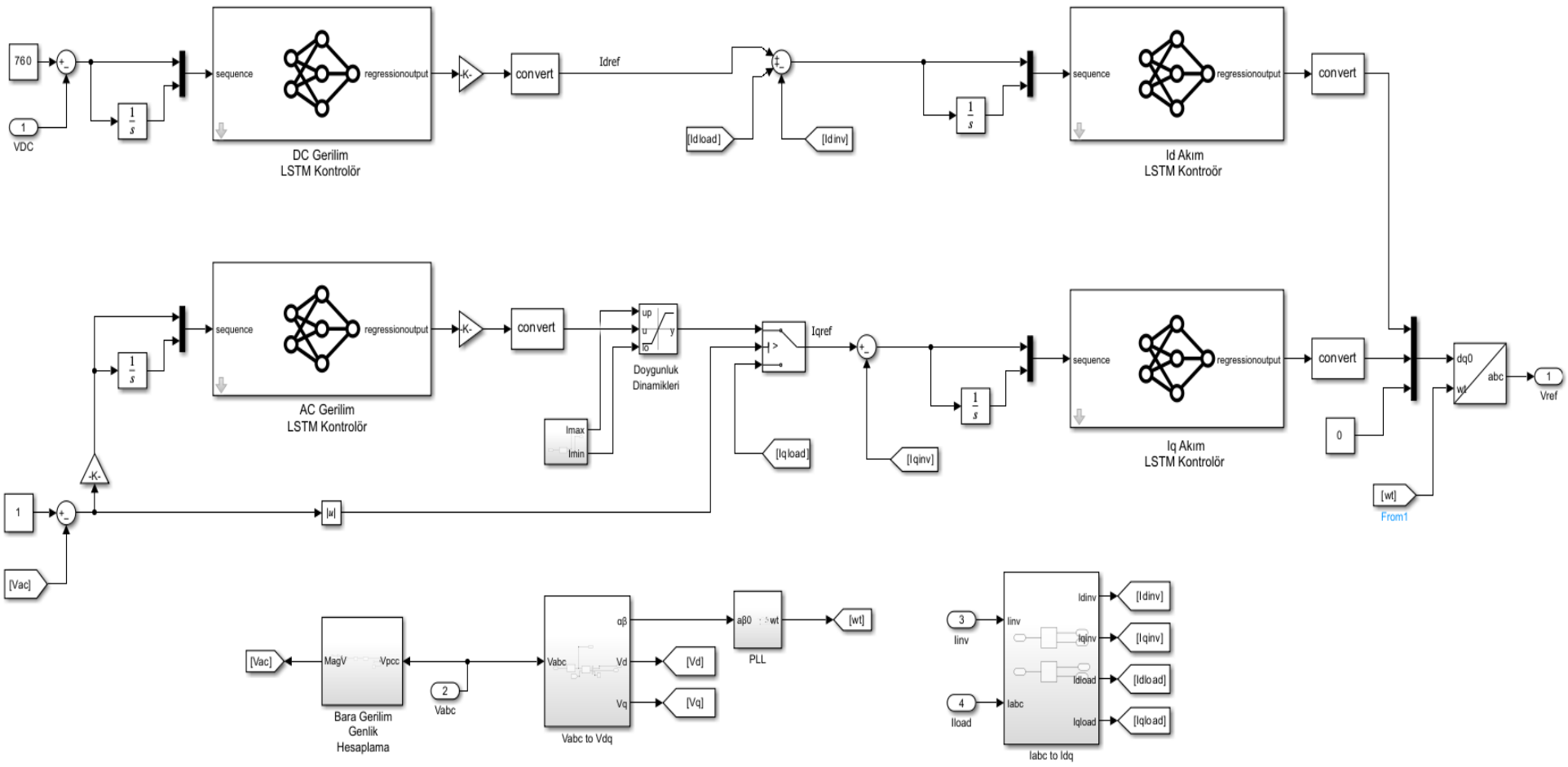
(d)

Şekil 3. 11. LSTM kontrolör modelleri için SHAP özet grafikleri

a) AC Gerilim b) DC Gerilim c) I_d Akım d) I_q Akım



Şekil 3. 12. ANN tabanlı kontrol sisteminin MATLAB/Simulink modeli



Şekil 3. 13. LSTM tabanlı kontrol sisteminin MATLAB/Simulink modeli

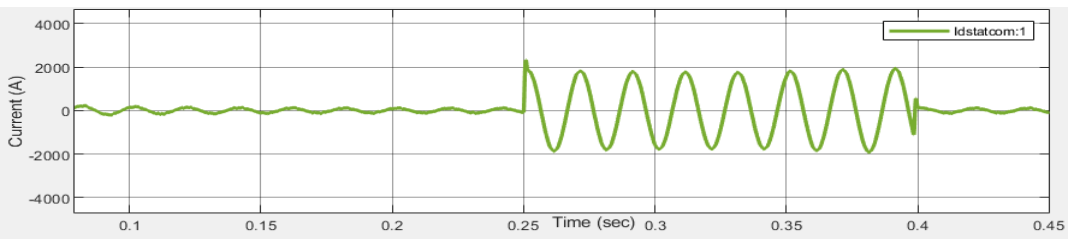
3.5. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan ANN ile LSTM tabanlı kontrol sisteminin MATLAB/Simulink modelleri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

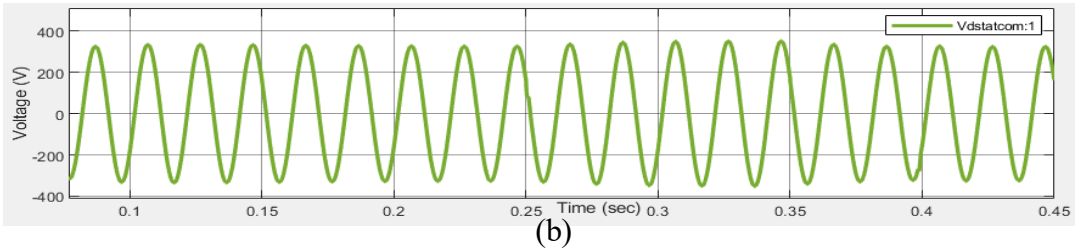
3.5.1. Şebeke Gerilim Değişimleri

DSTATCOM çıkış gerilimi, OBN gerilim değerinden büyük olursa DSTATCOM kapasitif modda çalışır ve reaktif güç enjekte eder. DSTATCOM çıkış gerilimi, OBN gerilim değerinden küçük olduğunda ise DSTATCOM endüktif modda çalışarak reaktif gücü absorbe etmektedir. DSTATCOM'un ürettiği veya absorbe ettiği reaktif güç miktarı, kontrol sisteminde elde edilen q referans akımına bağlıdır [45,161]. Bu akımın değeri normal şartlarda yük akımı ile belirlenirken gerilim değişimi durumunda AC gerilim kontrolör tarafından belirlenmektedir. Gerilim değişimi durumlarında AC Gerilim kontrol bloğu devreye girmekte ve DSTATCOM kompanzasyon kapasitesini aşmayacak şekilde gerilim değişim miktarına bağlı olarak q referans akımını üretmektedir. Bu sayede gerilim değişimi esnasında üretilen endüktif veya kapasitif DSTATCOM çıkış akımı ile yük gerilim profilinin iyileştirilmesini sağlanır.

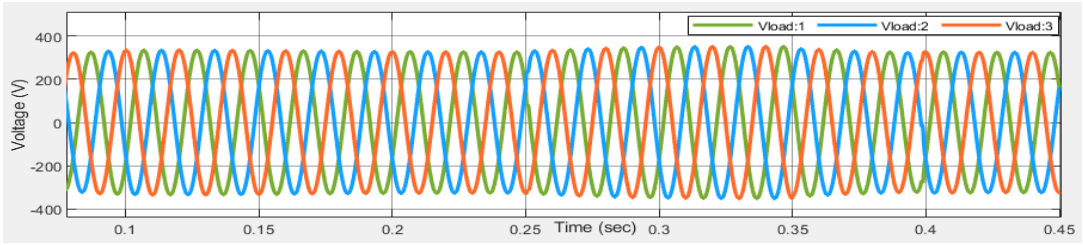
Çalışmada, 0.25-0.35s'ler arasında sırasıyla şebeke gerilimde %10'luk gerilim düşüm ve yükselmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ani gerilim değişimleri durumunda DSTATCOM'un performansı, 3 farklı kontrol sistemi için ayrı olarak incelenmiştir. PSO-PI, ANN tabanlı ve LSTM tabanlı kontrol sistemleri için gerilim yükselim sonuçları sırasıyla Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da gösterilirken, gerilim düşümü durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19' da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gerilim değişimi esnasında AC kontrolör ile DSTATCOM çıkış akımının üretildiği ve bu sayede DSTATCOM'un gerilim düşümünde kapasitif modda, gerilim yükselimde ise endüktif modda çalışarak yük gerilim profilinin iyileştirilmesine katkı sağladığı gözlemlenmiştir.



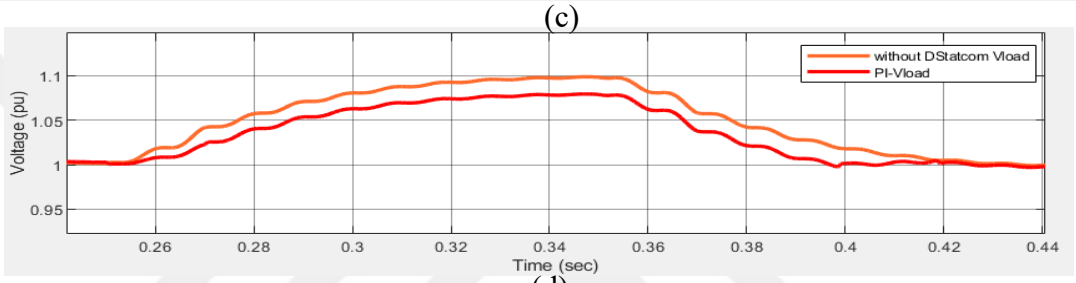
(a)



(b)

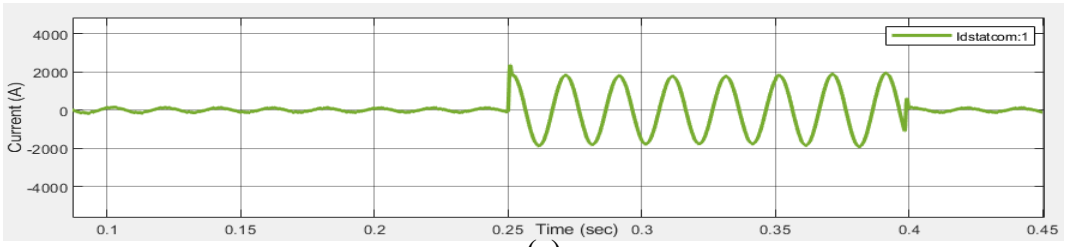


(c)

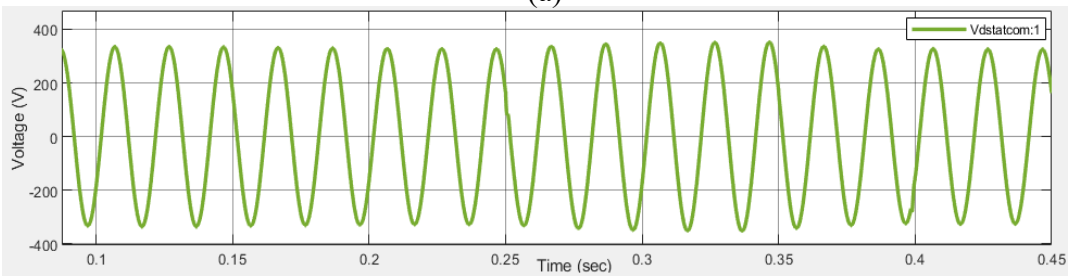


(d)

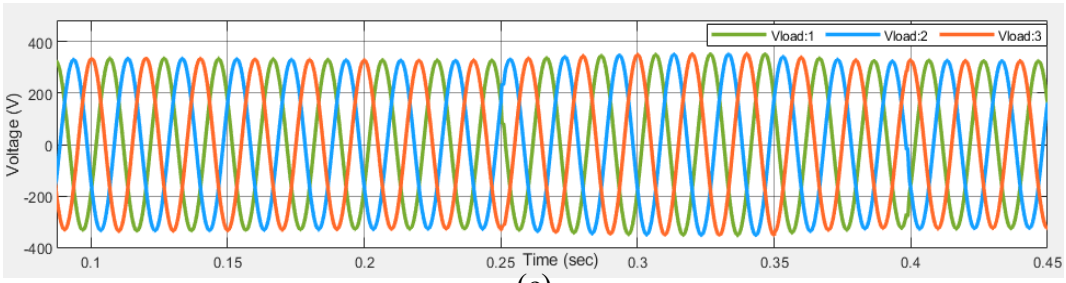
Şekil 3. 14. Şebeke gerilim yükselimi durumunda geleneksel PI kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri



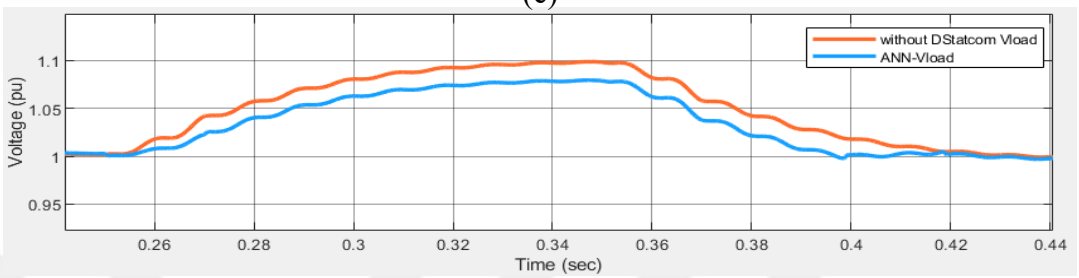
(a)



(b)

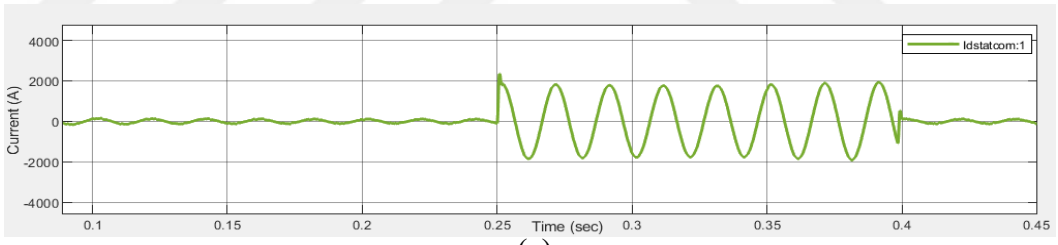


(c)

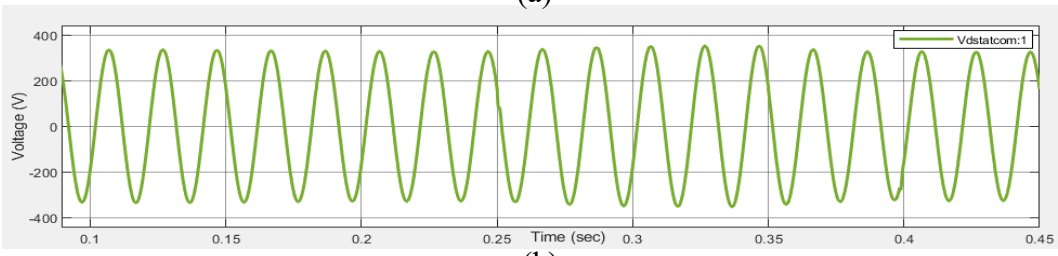


(d)

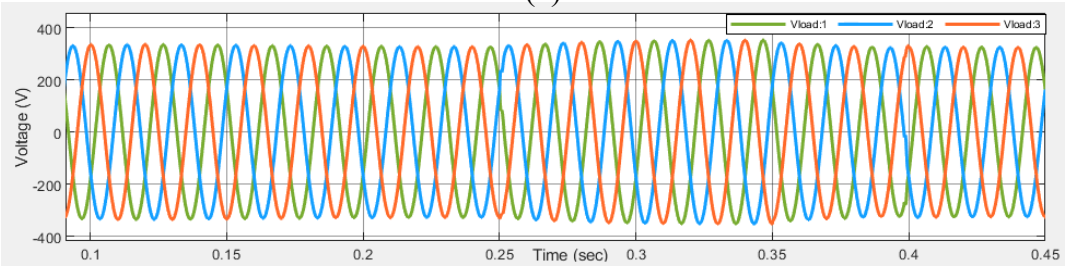
Şekil 3. 15. Şebeke gerilim yükselimi durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri



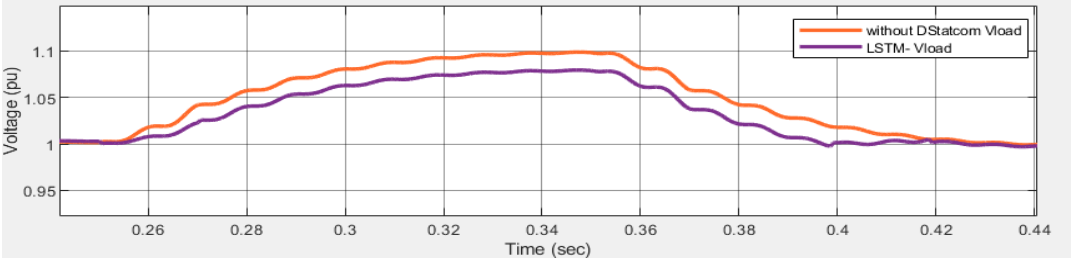
(a)



(b)

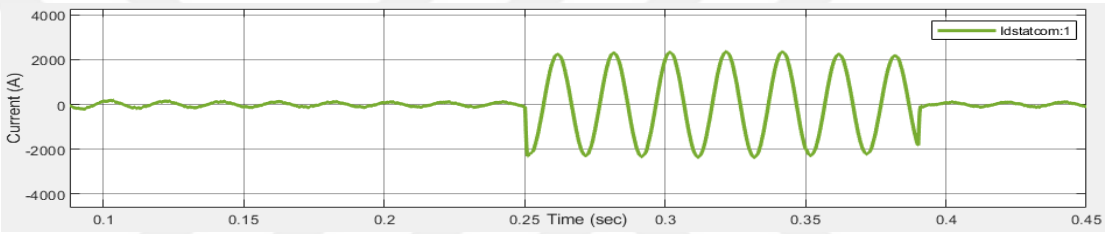


(c)

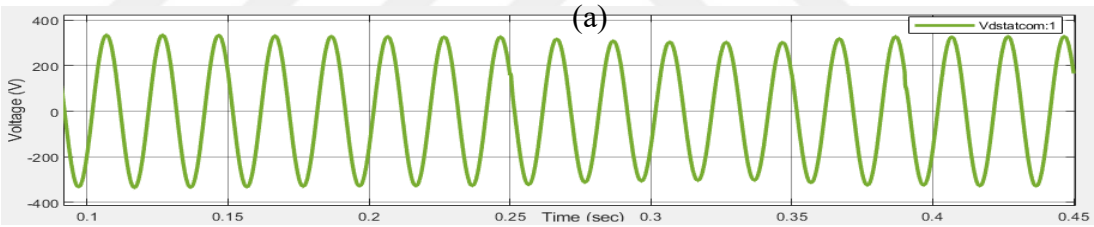


(d)

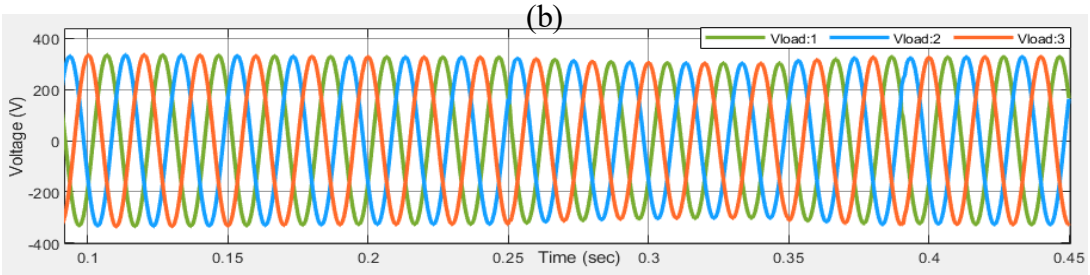
Şekil 3. 16. Şebeke gerilim yükselimi durumunda LSTM tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri



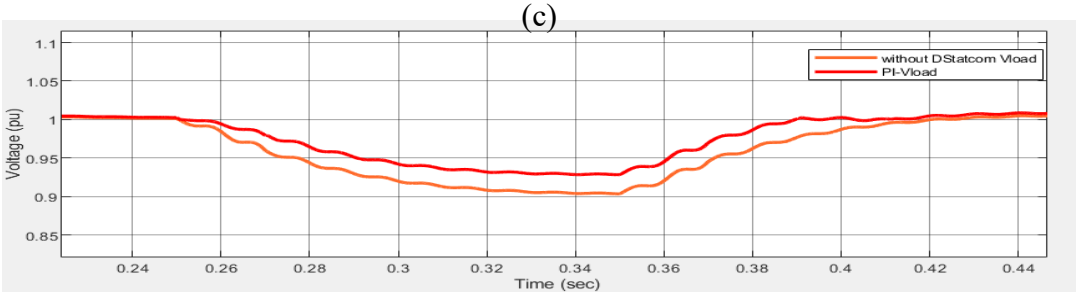
(a)



(b)



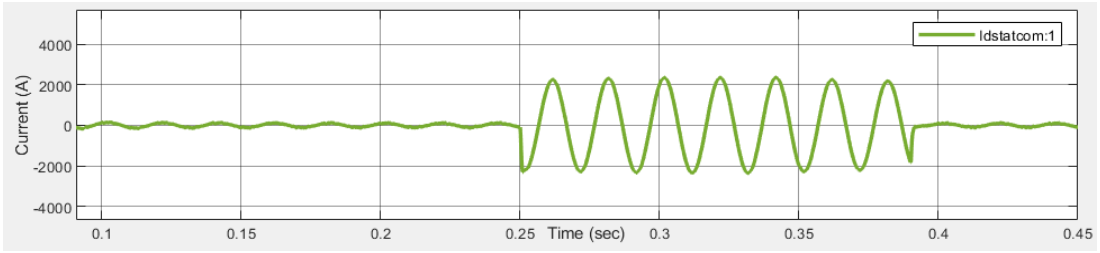
(c)



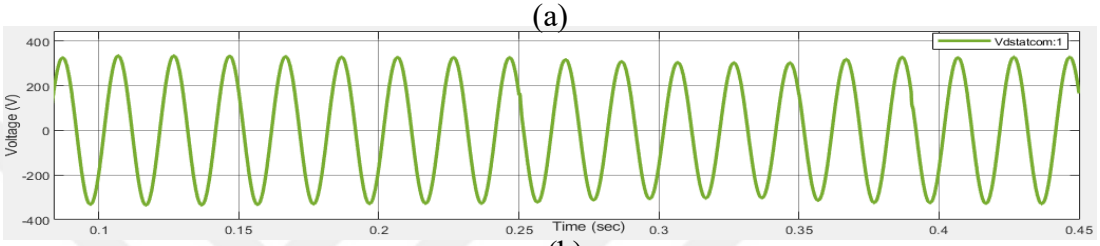
(d)

Şekil 3. 17. Şebeke gerilim düşümü durumunda geleneksel PI kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b) DSTATCOM

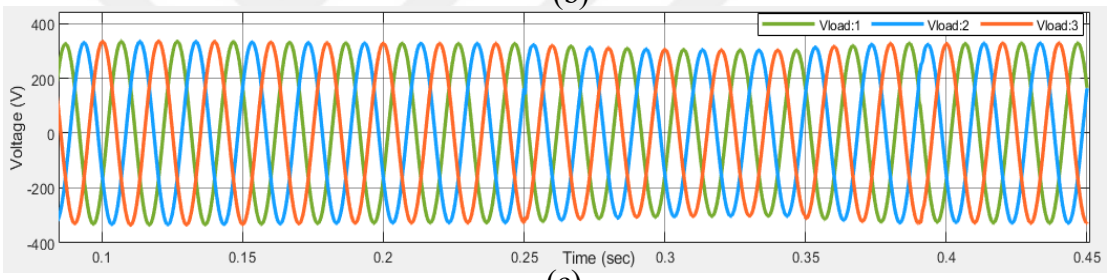
gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri



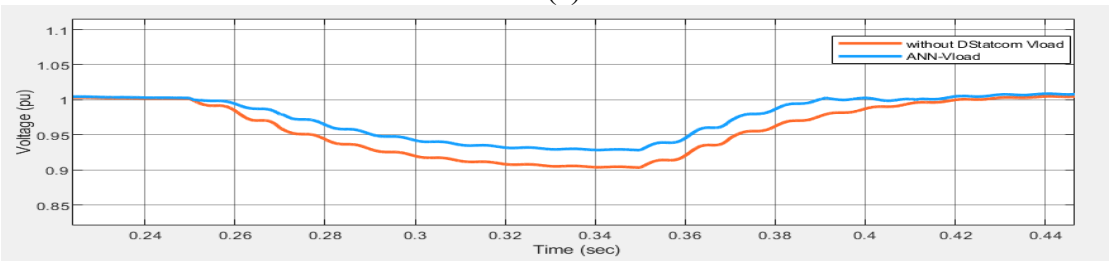
(a)



(b)

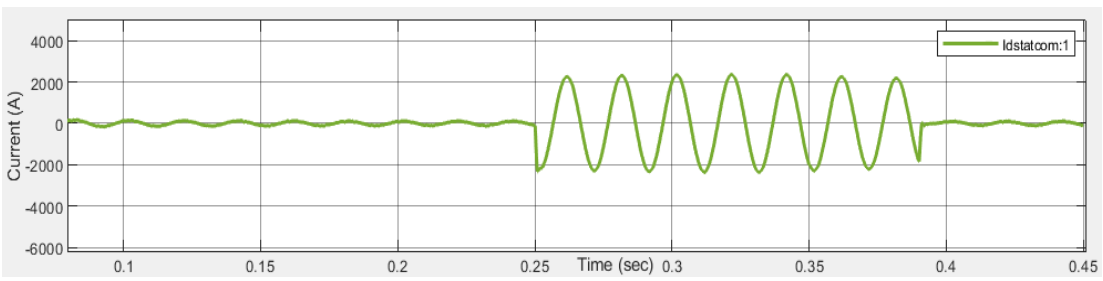


(c)

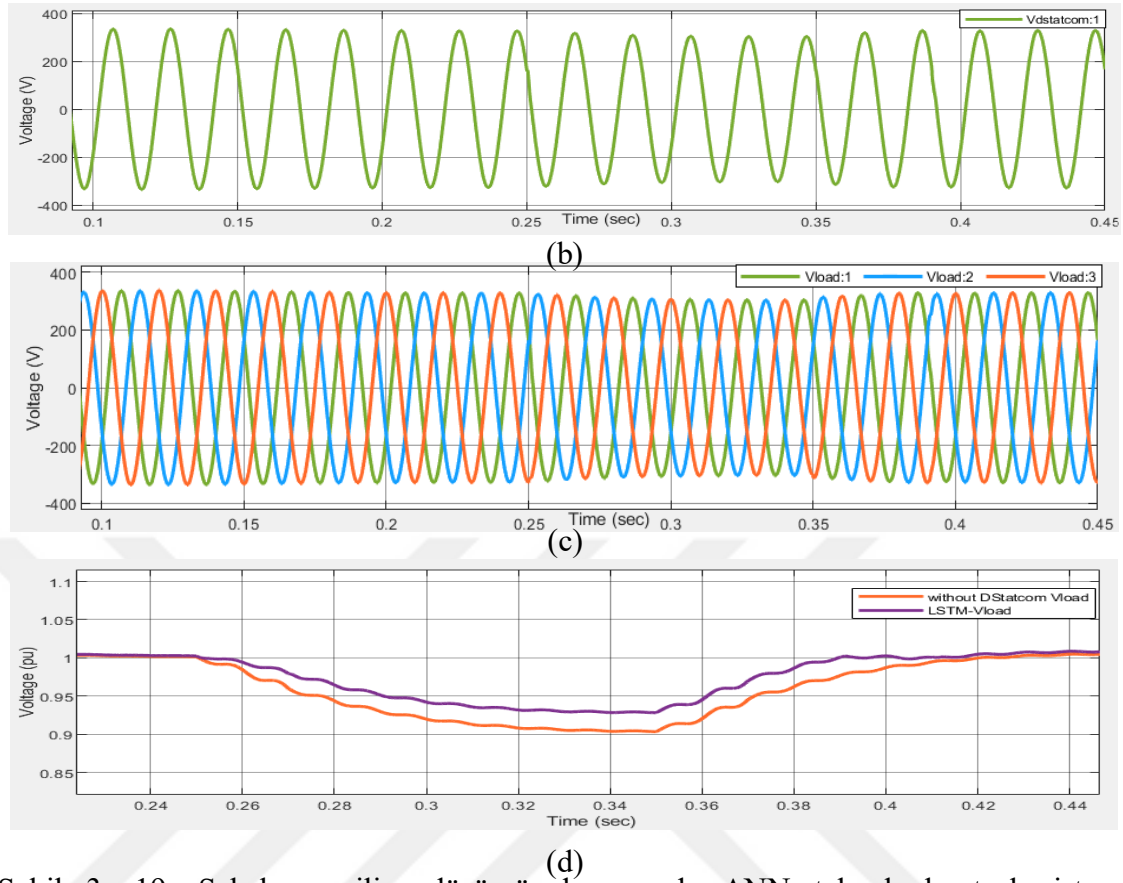


(d)

Şekil 3. 18. Şebeke gerilim düşümü durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri



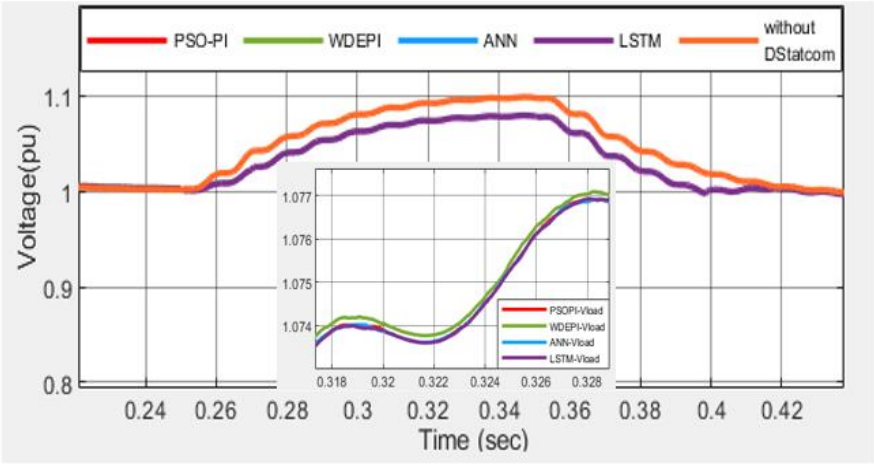
(a)



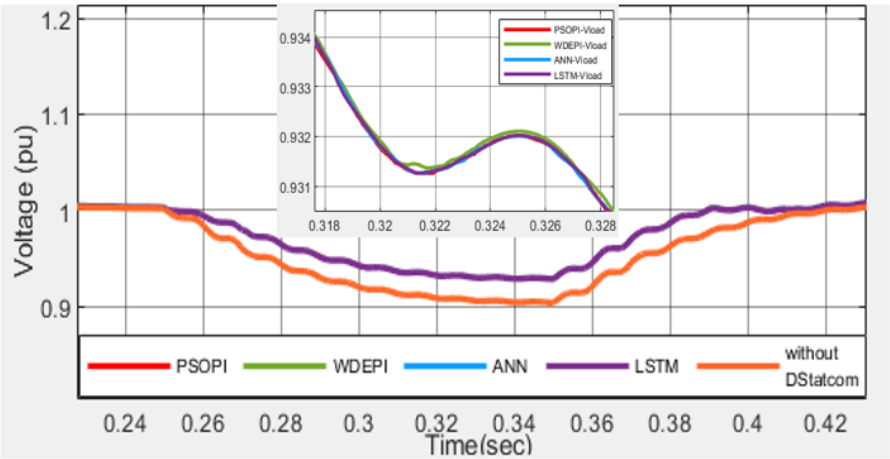
Şekil 3. 19. Şebeke gerilim düşümü durumunda ANN tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında elde edilen çıkışlar a)DSTATCOM akımı, b)DSTATCOM gerilimi c) Yük gerilimi d) DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz pu yük gerilimleri

Gerilim yükselim ve düşüm esnasında kontrol sistemlerinin DSTATCOM'suz duruma göre sağladıkları iyileşmeye performans karşılaştırması yapmak için WDE-PI kontrol sistemiyle birlikte yük gerilim sonuçları üst üste bindirilerek sırasıyla Şekil 3.20 ve 3.21'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde PSO-PI, ANN ve LSTM kontrol sisteminin sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu ve gerilim değişimi durumunda benzer performans gösterdikleri görülmüştür. WDE-PI kontrol sistemi, PSO-PI sistem performansını değerlendirmek ve zeki kontrol sistemlerinin katkılarını doğrulamak için tasarlanmıştır. WDE-PI kontrol sisteminin gerilim düşümünde 3 kontrol sistemine göre daha iyi, gerilim yükselmesinde ise daha kötü performans sergilemiştir. Ancak WDE-PI ile 3 kontrol sistemi arasındaki fark ihmal edilebilir düzeyde, yani çok küçüktür. Sonuç olarak DSTATCOM bağlı olduğunda kullanılan tüm kontrol sistemleri için yük geriliminde yaklaşık %2-3 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca DSTATCOM bağlı olmadığında yük geriliminin 0.42 s'de, bağlı olduğunda ise 0.39 s'de yük geriliminin 1 pu

'ya ulaştığı görülmüştür. Yani DSTATCOM bağlantısında yük gerilim profili iyileştirilerek gerilimin daha kısa sürede kararlı hale gelmesine katkıda bulunulmuştur.



Şekil 3. 20. Şebeke gerilim yükselim durumunda DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz yük geriliminin pu çıkışları



Şekil 3. 21. Şebeke gerilim düşüm durumunda DSTATCOM'lu ve DSTATCOM'suz yük geriliminin pu çıkışları

3.5.2. Harmonik Analiz

DSTATCOM ve OBN bara akımlarındaki kontrol sistemlerinin harmonik iyileştirme performansları karşılaştırılmıştır. Sisteme bağlanan yükler, zeki kontrol sistemleri eğitim verisini oluştururken kullanılan yüklerden farklı olacak şekilde rastgele olacak şekilde seçilmiştir. İlk olarak endüktif ve kapasitif lineer yüklerden oluşan iki farklı yük için harmonik analiz gerçekleştirilmiştir. 0.37 s'ye kadar 0.54 MW - 0.42 MVAr rezistif-

endüktif, 0.58 s'ye kadar 0.64 MW-0.46 MVAr rezistif-kapasitif olan 1. yük durumunda DSTATCOM ve OBN bara akımlarındaki %THB sonuçları Tablo 3.8 'de verilmiştir. 1. yük bağlandığında WDE-PI sistemi sonuçlarına göre, her iki akım için de tüm fazlarda akıllı kontrol sistemleri WDE-PI kontrol sisteminden daha başarılıdır. PI sistemleri birbirleri ile karşılaştırıldığında, PSO-PI sisteminin endüktif yük bağlantısında, WDE-PI sisteminin ise kapasitif yük bağlantısında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yani PSO-PI sisteminden faydalanılarak zeki kontrol sistemleri oluşturulmasına rağmen, bu sistemlerle kapasitif yük bağlantısında WDE-PI sistemine göre daha küçük harmonik değerleri elde edilmiştir

Akım %THB değerleri incelendiğinde tasarlanan yeni zeki kontrol sistemlerinin PSO-PI sisteme göre daha düşük harmonik bozulma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kapasitif yük bağlantısında akımların c fazında ANN kontrol sistemi LSTM tabanlı kontrol sistemine göre daha iyi sonuç verirken, diğer tüm durumlarda LSTM tabanlı kontrol sistemi en iyi sonuçları vermiştir. Burada, PSO-PI sisteme göre %0.28'lik maksimum harmonik iyileştirme miktarı endüktif yük bağlıyken DSTATCOM bara akımının a fazında LSTM tabanlı kontrol sistemi ile sağlanmıştır.

Tablo 3.6.Tablo 3. 8. Yük 1 için akımların % THB değerleri

Yük 1		PSO-PI Kontrol Sistemi			WDE-PI Kontrol Sistemi			ANN Tabanlı Kontrol Sistemi			LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi		
Fazlar		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0.54 MW 0.42 MVAr	I_{OBN}	1.04	1.05	1.03	1.12	1.19	1.12	0.89	0.90	0.89	0.82	0.88	0.85
	$I_{DStatcom}$	1.32	1.33	1.30	1.38	1.44	1.36	1.14	1.13	1.12	1.04	1.10	1.08
0.64 MW 0.46 MVAr	I_{OBN}	0.91	0.89	0.93	0.88	0.85	0.91	0.85	0.84	0.83	0.81	0.83	0.85
	$I_{DStatcom}$	1.69	1.66	1.72	1.64	1.58	1.69	1.58	1.57	1.55	1.52	1.55	1.58

0.37 s'ye kadar 0.61 MW - 0.57 MVAR rezistif - endüktif 0.58 s'ye kadar 0.72 MW - 0.38 MVAR rezistif - kapasitif olan 2. yük durumunda DSTATCOM ve OBN bara

akımlarındaki %THB sonuçları Tablo 3.9 ‘da verilmiştir. Akım %THB değerleri incelendiğinde tasarlanan yeni kontrol sistemlerinin PSO-PI sisteme göre daha düşük harmonik bozulma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre akımların b fazı ile endüktif yük bağlıyken DSTATCOM akımının c fazında ANN kontrol sistemi LSTM tabanlı kontrol sistemine göre daha iyi sonuçlar verirken, diğer tüm durumlarda LSTM tabanlı kontrol sistemi daha iyi sonuçlar vermiştir. Burada, PSO-PI sisteme göre %0.22‘lik maksimum harmonik iyileştirme miktarı kapasitif yük bağlıyken DSTATCOM akımının b fazında LSTM tabanlı kontrol sistemi ile sağlanmıştır.

Tablo 3.7.Tablo 3. 9. Yük 2 için akımların % THB değerleri

Yük 2		PSO-PI Kontrol Sistemi			WDE-PI Kontrol Sistemi			ANN Tabanlı Kontrol Sistemi			LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi		
Fazlar		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0.61 MW 0.57 MVAr	I_{OBN}	0.85	0.83	0.81	0.91	0.98	0.99	0.81	0.80	0.78	0.80	0.82	0.77
	$I_{DStatcom}$	0.94	0.91	0.89	0.97	1.03	1.06	0.89	0.86	0.84	0.88	0.89	0.85
0.72 MW 0.38 MVAr	I_{OBN}	0.86	0.89	0.87	0.81	0.79	0.79	0.81	0.76	0.81	0.80	0.80	0.78
	$I_{DStatcom}$	2.26	2.31	2.27	2.12	2.07	2.07	2.12	2.01	2.11	2.09	2.09	1.97

Tablo 3.7’deki WDE-PI sistem sonuçlarına göre endüktif yük bağlantısında PSO-PI daha iyi sonuç verirken, kapasitif yük bağlantısında WDE-PI daha iyi sonuç vermiştir. WDE-PI sistem kapasitif yük bağlıyken b fazında LSTM tabanlı kontrol sistemden, c fazında da ANN tabanlı kontrol sisteminden daha küçük harmonik değerlere sahiptir. Ancak geri kalan tüm durumlarda zeki kontrol sistemleri daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Harmonik bozulmalara neden olan non lineer yük bağlantısı durumunda DSTATCOM ve OBN bara akımlarındaki %THB sonuçları Tablo 3.8‘de verilmiştir. Çalışmada non lineer yük olarak diyot doğrultucu kullanılmıştır. PSO-PI ve WDE-PI kontrol sistemleri 1. ve 2. yük bağlantılarında %THB değerlerine göre benzer performans gösterse de, doğrusal olmayan yük bağlantısı ve filtre parametresi değişimlerinde iki sistem arasında önemli

farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Tablo 3.10' daki değerlere göre, her iki akım için de tüm fazlarda PSO-PI kontrol sisteminde WDE-PI kontrol sistemine kıyasla daha küçük harmonik değerleri elde edilmiştir. Bu, PSO algoritmasının adaptif yapısının ve farklı doğrusal olmayan koşullar altında iyi adapte olabilmesinin bir sonucudur. Aynı zamanda, filtre parametresi değişiminin olmadığı durum ile değişimin olduğu durum karşılaştırıldığında, en yüksek harmonik artışı WDE-PI sisteminde, en az harmonik artışı ise LSTM tabanlı kontrol sisteminde olmuştur. Yani, filtre parametresi değişimlerinde, tasarlanan akıllı kontrol sistemleri ile PI sistemleri arasındaki %THB farklılıkları artmış ve önerilen akıllı kontrol sistemleri daha sağlam bir performans sergilemiştir.

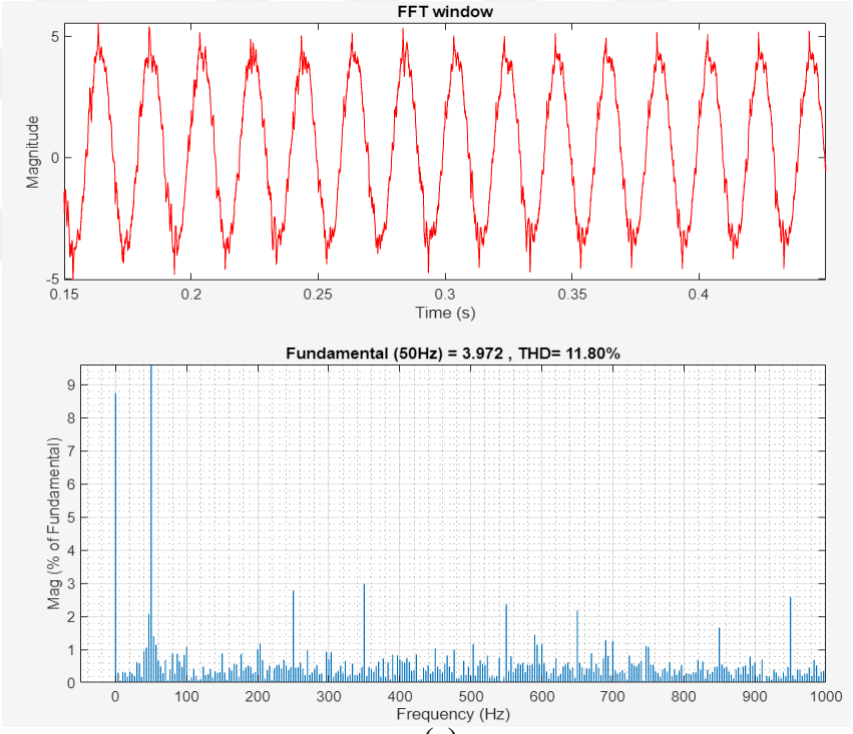
Tablo 3. 10. Nonlineer yük ve filtre parametre değişimi durumlarında akımların % THB değerleri

		PSO-PI Kontrol Sistemi			WDE-PI Kontrol Sistemi		
Fazlar		a	b	c	a	b	c
Nonlineer Yük	I_{OBN}	11.80	12.13	11.75	16.07	15.71	14.76
	$I_{DStatcom}$	14.92	15.67	15.01	16.77	16.69	15.85
Filtre Parametre Değişimi	I_{OBN}	16.07	17.46	16.88	23.62	23.84	24.36
	$I_{DStatcom}$	20.96	22.75	21.75	23.25	23.18	23.77
		ANN Tabanlı Kontrol Sistemi			LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi		
Fazlar		a	b	c	a	b	c
Nonlineer Yük	I_{OBN}	11.05	11.48	11.43	10.83	11.36	10.90
	$I_{DStatcom}$	14.85	14.92	14.55	14.12	14.79	13.67
Filtre Parametre Değişimi	I_{OBN}	15.43	15.70	15.68	15.35	15.23	15.06
	$I_{DStatcom}$	20.64	20.75	20.78	19.89	19.75	19.70

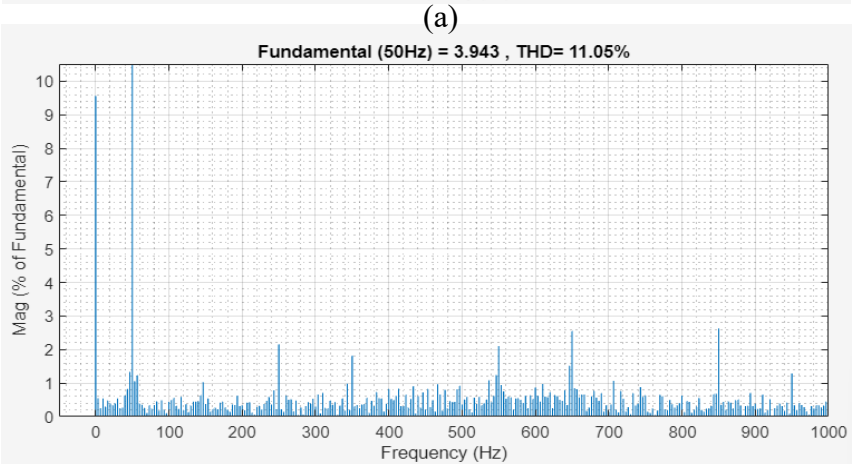
Sistemde nonlineer yük bağlıyken elde edilen %THB değerlerine göre her iki akım için LSTM tabanlı kontrol sistemi 3 fazda en başarılı sonuçları vermiştir. PSO-PI kontrol sisteme göre maksimum harmonik iyileştirme oranları ise ANN tabanlı kontrol sisteminde %0.75, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %0.97'dir. PSO-PI kontrol sisteme göre maksimum harmonik iyileştirme oranları ise ANN tabanlı kontrol sisteminde %0.75, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %1.34'tür. Elde edilen DSTATCOM bara akım %THB değerleri literatürde yer alan benzer bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışma [7]'de şebekeye bağlı DSTATCOM kontrolü için geleneksel kontrol modelinde bulunan PI Kontrolörlerin DBN ve CNN ile yer değiştirmesi ile derin öğrenme tabanlı 2 farklı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni kontrol sistemleri ile akım harmoniklerinin azaltılması ve gerilim profilinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak yeni kontrol sistemlerinin gerilim profil iyileştirme performanslarının PI sistem ile aynı olduğu gözlemlenirken, non-lineer yük bağlantısında bara akım %THB değerleri PI kontrol sistemi için %11.75, DBN kontrol sistemi için %11.74 ve CNN kontrol sistemi için %11.70 olarak elde edilmiştir. Yani, %0.05'lik maksimum iyileştirme miktarı CNN kontrol sistemi tarafından sağlanmıştır. Nonlineer yük bağlantısı durumu için gerçekleştirdiğimiz çalışma ile literatürdeki çalışma sonuçlarını karşılaştırdığımızda, tasarlanan ANN ve LSTM tabanlı kontrol modellerinin akım harmonik iyileştirmede daha başarılı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada üç faz için akım THB değerleri verilerek tasarlanan kontrol sistemlerinin farklı yük koşulları ile filtre parametre değişimi durumunda kararlığı test edilmiş ve daha detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

Filtre devrelerde parametre değerleri elemanın eskimesi, şiddetli hava koşulları veya sıcaklık nedeniyle zamanla değişebilir ve potansiyel olarak istikrarsız dinamikler oluşabilir. LCL filtre nispeten yüksek parametre duyarlılığına sahiptir. Bu durumda kontrol sistem kararlılığı önemli bir rol oynamaktadır [162]. Bu nedenle çalışmada non lineer yük bağlıyken filtrede yer alan indüktans değerleri %50 oranında azaltılmış ve bu durumda akım harmonik değerleri ile bu değerlerde meydana gelen artış miktarları 3 kontrol sistemi için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre filtre parametre değişimi durumunda da en düşük harmonik değerlere LSTM tabanlı kontrol sisteminin sahip olduğu görülmüştür. Filtre parametre değişiminde OBN bara akım için, PSO-PI kontrol sistemine göre minimum harmonik iyileştirme miktarı ANN tabanlı kontrol sisteminde

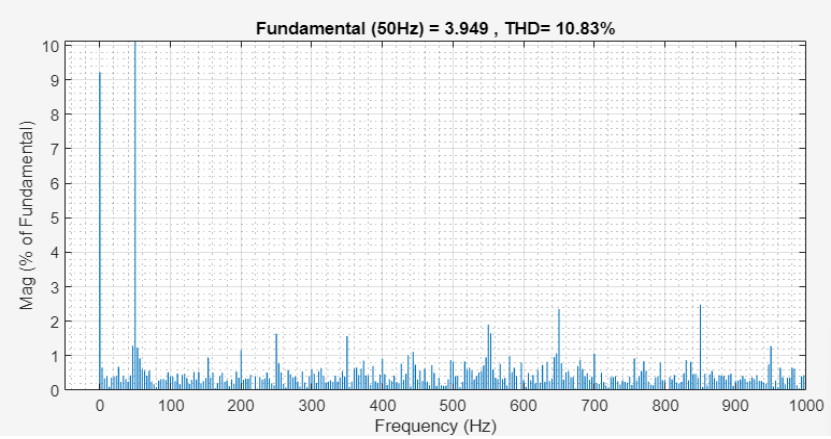
%0.64 iken, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %0.72'dir. PSO-PI kontrol sisteme göre maksimum harmonik iyileştirme oranları ise ANN tabanlı kontrol sisteminde %1.76, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %2.23'tür. DSTATCOM bara akımı için, PSO-PI kontrol sistemine göre minimum harmonik iyileştirme miktarı ANN tabanlı kontrol sisteminde %0.32 iken, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %1.07'dir. PSO-PI kontrol sisteme göre maksimum harmonik iyileştirme oranları ise ANN tabanlı kontrol sisteminde %2, LSTM tabanlı kontrol sisteminde %3'tür. Nonlineer yük bağlantısı için en fazla harmonik iyileşmenin sağlandığı fazlara ait THB analiz sonuçları Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te filtre parametresinin değişmesi durumunda THB analiz sonuçları ise Şekil 3.24 ve Şekil 3.25' te verilmiştir.



(a)



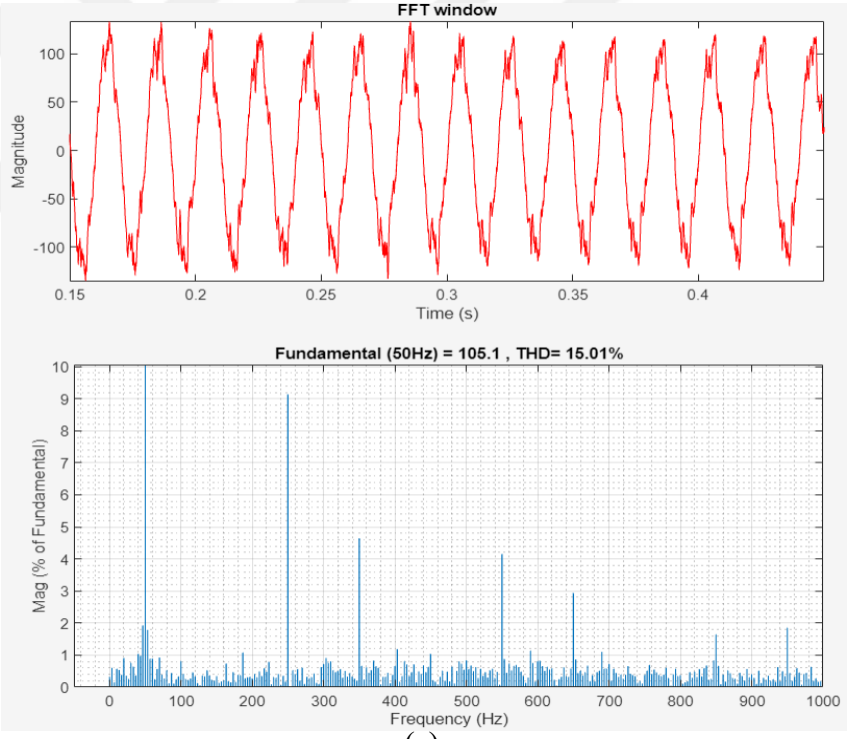
(b)



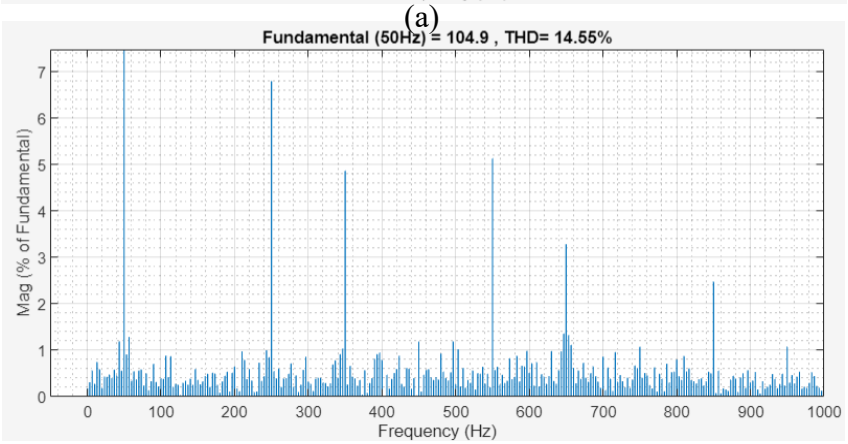
(c)

Şekil 3. 22. Nonlineer yük bağlıyken OBN bara akımın a fazı için THB analiz

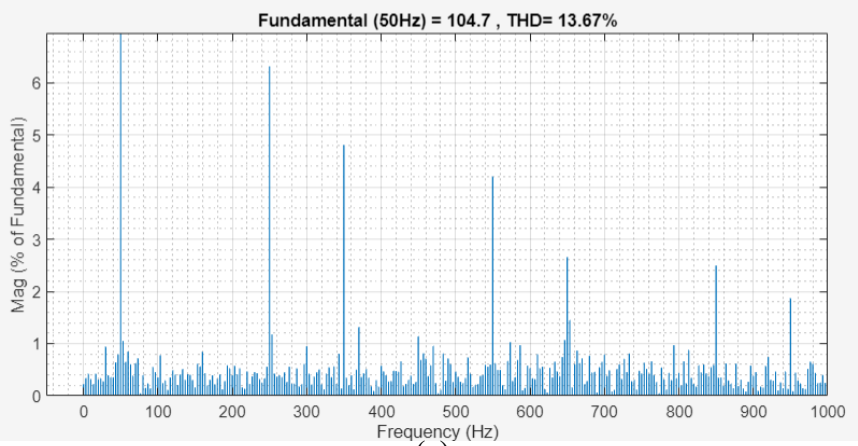
a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol



(a)

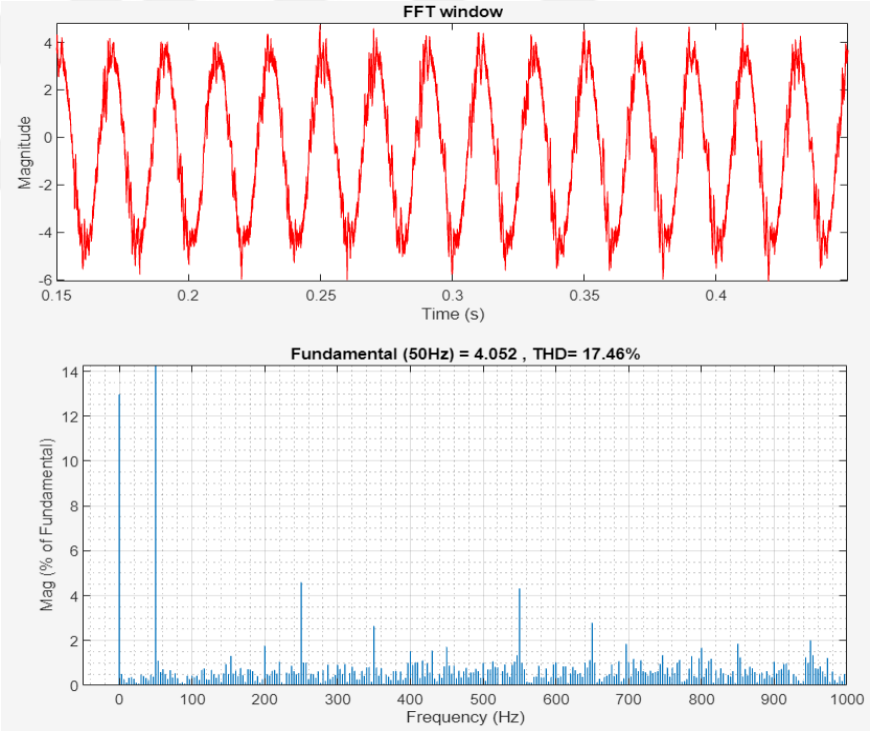


(b)

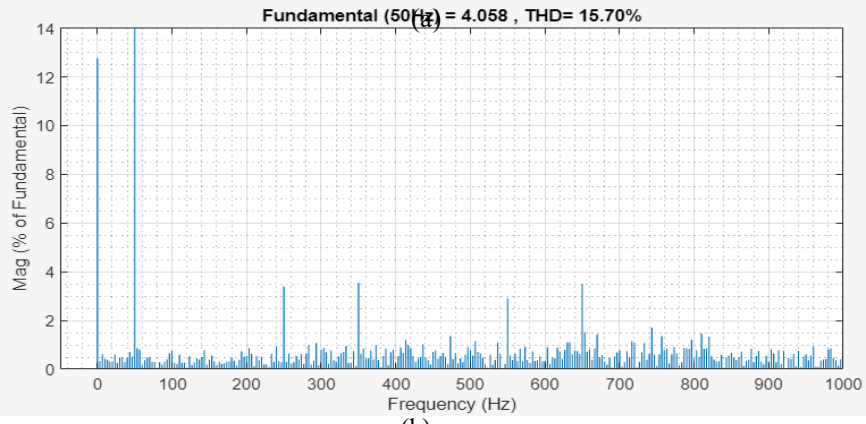


(c)

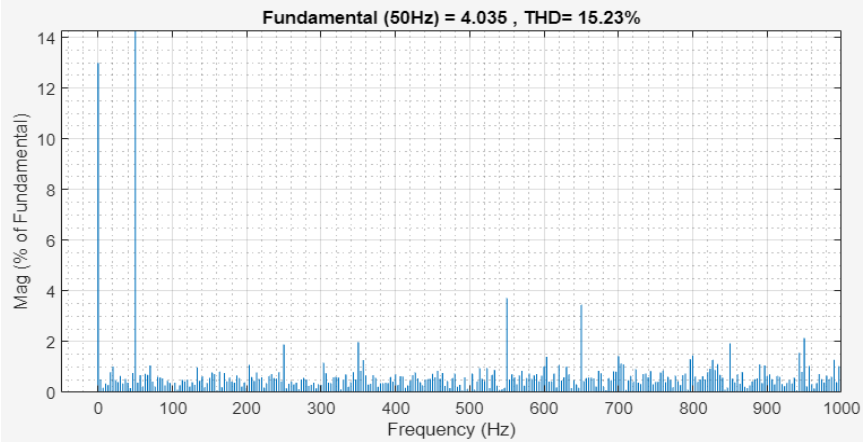
Şekil 3. 23. Nonlineer yük bağlıyken DSTATCOM bara akımın a fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c)LSTM tabanlı kontrol



(a)

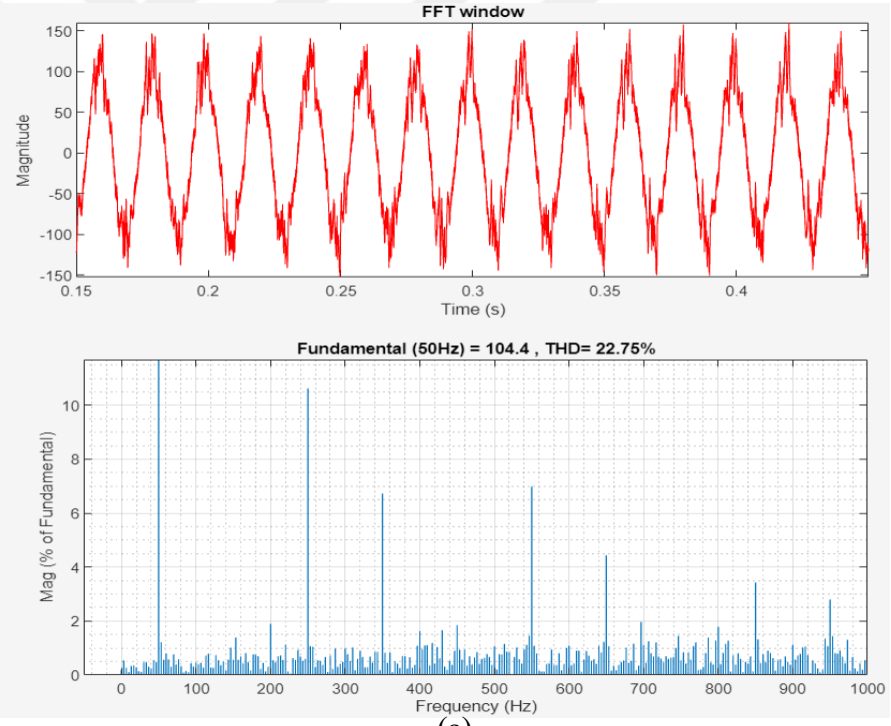


(b)

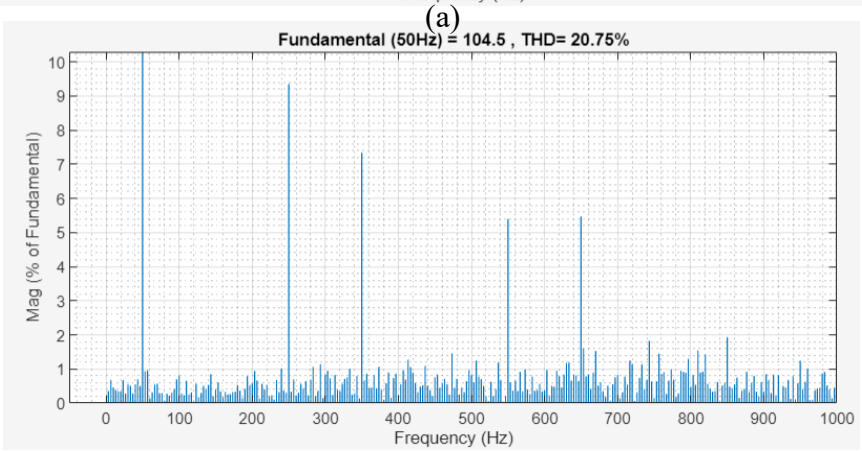


(c)

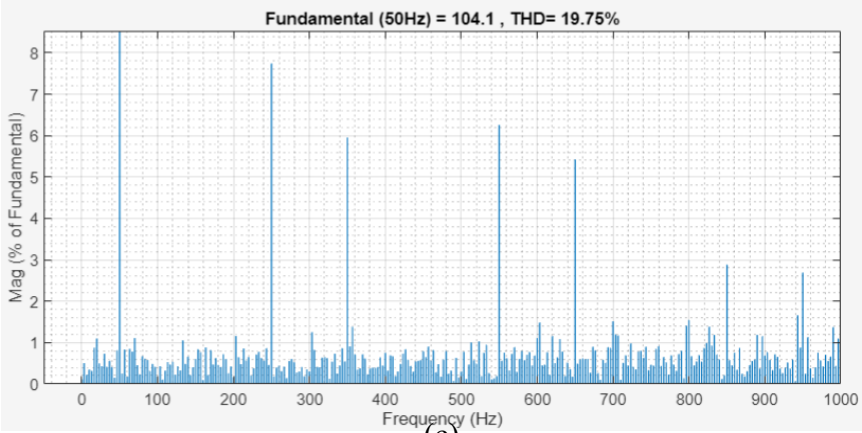
Şekil 3. 24. Nonlineer yük bağlıyken filtre parametre değişimi durumunda OBN bara akımın b fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c) LSTM tabanlı kontrol



(a)



(b)

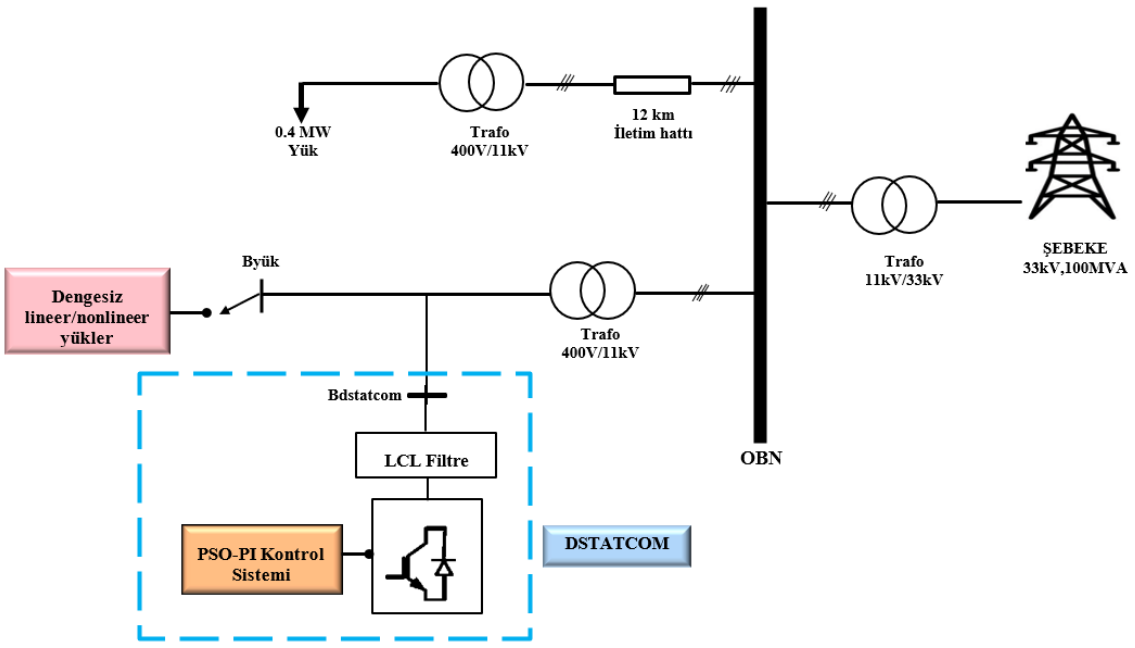


(c)

Şekil 3. 25. Nonlineer yük bağlıyken filtre parametre değişimi durumunda DSTATCOM bara akımın b fazı için THB analiz a) PSO-PI kontrol b)ANN tabanlı kontrol c) LSTM tabanlı kontrol

3.5.3. Dengesiz Yüklenme

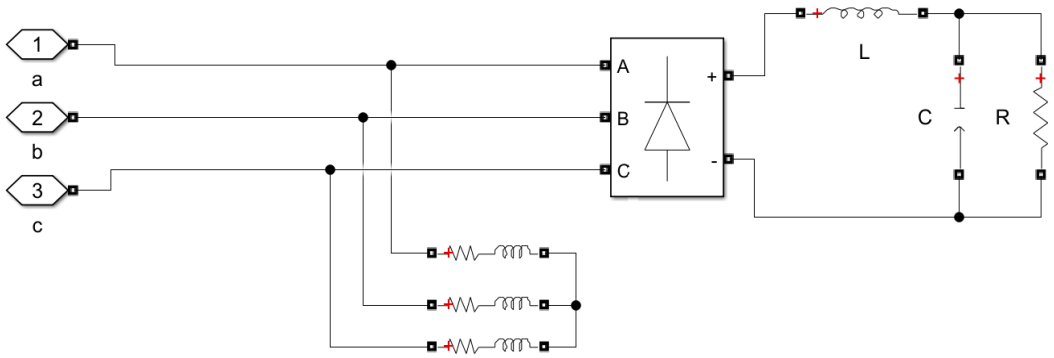
Rüzgar türbin sistemlerinin yapısına bağlı olarak bazı entegrasyon etkileri gözlemlenebilir. Bu etkileri azaltmak, rüzgar enerjisinden verimli olarak faydalanmamız için önemlidir.



Şekil 3. 26. MATLAB/Simulink'te tasarlanan rüzgar türbin sistemsiz model

Çalışmada dengesiz yük bağlantısı durumunda rüzgar türbin sisteminin şebeke bara akım harmoniklerinde 3 faz için artışa neden olduğu gözlemlenmiş ve DSTATCOM için

önerilen LSTM tabanlı kontrol sistemi ile türbinden kaynaklanan harmonik bozulma artışının ortadan kaldırıp kaldırılamayacağı incelenmiştir. Bu kapsamda rüzgar türbin sisteminin şebekeye bağlı olmadığı türbinsiz durum için Şekil 3.26'da gösterilen güç sistem modeli kullanılmıştır.



Şekil 3. 27. Dengesiz-nonlineer yük modeli

Dengesiz yüklenme için dengesiz lineer RL, RC ve nonlineer yük olmak üzere 3 farklı yük bağıntıları gerçekleştirilmiştir. Dengesiz yüklere ait bilgiler Tablo 3.11'de, dengesiz-nonlineer yük modeli ise Şekil 3.27'de verilmiştir. Nonlineer yük için diyot doğrultucu kullanılmış ve her faza bağlanan farklı rezistif- endüktif dirençler ile fazlar arasında dengesizlik oluşturulmuştur.

Tablo 3. 11. Dengesiz- yük bağlantıları

Yükler	Fazlar		
	a	b	c
Rezistif - Kapasitif Yük (RC)	216.91 kVA	221.3 kVA	216.95 kVA
Rezistif - Endüktif Yük (RL)	245.63 kVA	250.80 kVA	260.10 kVA
Nonlinear Yük	R_a=40 Ω L_a=120 mH	R_b=55 Ω L_b=150 mH	R_c=35 Ω L_c=200 mH

Dengesiz lineer rezistif-endüktif ve rezistif-kapasitif yük bağlantısı durumlarında akımların üç faz için %THB değerleri sırasıyla Tablo 3.12 ve 3.13'te verilmiştir. Sonuçlara göre, OBN bara akımının b fazı hariç, diğer tüm durumlarda en küçük %THB değerleri LSTM tabanlı kontrol sistemi ile elde edilmiştir. Dengesiz RL yük bağlantısında PSO-PI kontrol sistemine göre, OBN bara akımının %0.06'lık maksimum harmonik

iyileştirme miktarı b fazında ANN tabanlı kontrol sistemi ile sağlanırken, DSTATCOM bara akımının %0.14'lük maksimum harmonik iyileştirme miktarı b fazında LSTM tabanlı kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Rüzgar türbin sisteminin bağlı olmadığı durum ile karşılaştırma yaptığımızda ise ANN tabanlı kontrol sisteminde rüzgar türbinsiz duruma göre, OBN bara akımının a fazı hariç diğer tüm fazlarda iyileşme sağlanırken, LSTM tabanlı kontrol sisteminde her iki akım için tüm fazlarda harmonik iyileşme sağlanmıştır. Yani dengesiz RL yük için rüzgar türbin sisteminin akımlar üzerindeki harmonik bozulma etkisi LSTM tabanlı kontrol sistemi ile tüm fazlar için ortadan kaldırılarak, daha küçük %THB değerleri elde edilmesi sağlanmıştır.

Tablo 3. 12. Dengesiz-lineer endüktif yük bağlantısında akımların % THB değerleri

Dengesiz-Lineer RL Yük	I_{OBN}			$I_{DStatcom}$		
Fazlar	a	b	c	a	b	c
Rüzgar Türbini Bağlı Değilken	1.40	1.37	1.38	1.87	1.86	1.80
PSO-PI Kontrol Sistemi	1.42	1.39	1.40	1.89	1.87	1.81
WDE-PI Kontrol Sistemi	1.64	1.69	1.65	2.20	2.26	2.12
ANN Tabanlı Kontrol Sistemi	1.40	1.31	1.35	1.82	1.75	1.71
LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi	1.38	1.32	1.33	1.81	1.73	1.70

Tablo 3.11'de verilen dengesiz rezistif - kapasitif yük bağlantısı sonuçlarına göre her iki akım için tüm fazlarda LSTM tabanlı kontrol sistemi ile en küçük %THB değerlerine ulaşılmıştır. Dengesiz RC yük bağlantısında PSO-PI kontrol sistemine göre OBN bara akımındaki %0.18'lik maksimum harmonik iyileştirme miktarı ile DSTATCOM bara akımındaki %0.33'lük maksimum harmonik iyileştirme miktarı, b fazında LSTM tabanlı kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Rüzgar türbin sisteminin bağlı olmadığı durum ile karşılaştırma yaptığımızda ise hem ANN tabanlı kontrol sisteminde hem de LSTM tabanlı kontrol sisteminde, rüzgar türbinsiz duruma göre, her iki akım için tüm fazlarda harmonik iyileşme sağlanarak rüzgar türbin sisteminin akımlar üzerindeki harmonik bozulma etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Tablo 3. 13. Dengesiz-lineer kapasitif yük bağlantısında akımların % THB değerleri

Dengesiz-Lineer RC Yük	I_{OBN}			$I_{DStatcom}$		
Fazlar	a	b	c	a	b	c
Rüzgar Türbini Bağlı Değilken	1.12	1.13	1.15	2.30	2.32	2.38
PSO-PI Kontrol Sistemi	1.19	1.23	1.19	2.38	2.45	2.39
WDE-PI Kontrol Sistemi	1.34	1.38	1.37	2.50	2.46	2.49
ANN Tabanlı Kontrol Sistemi	1.10	1.07	1.11	2.20	2.13	2.26
LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi	1.05	1.05	1.10	2.11	2.12	2.22

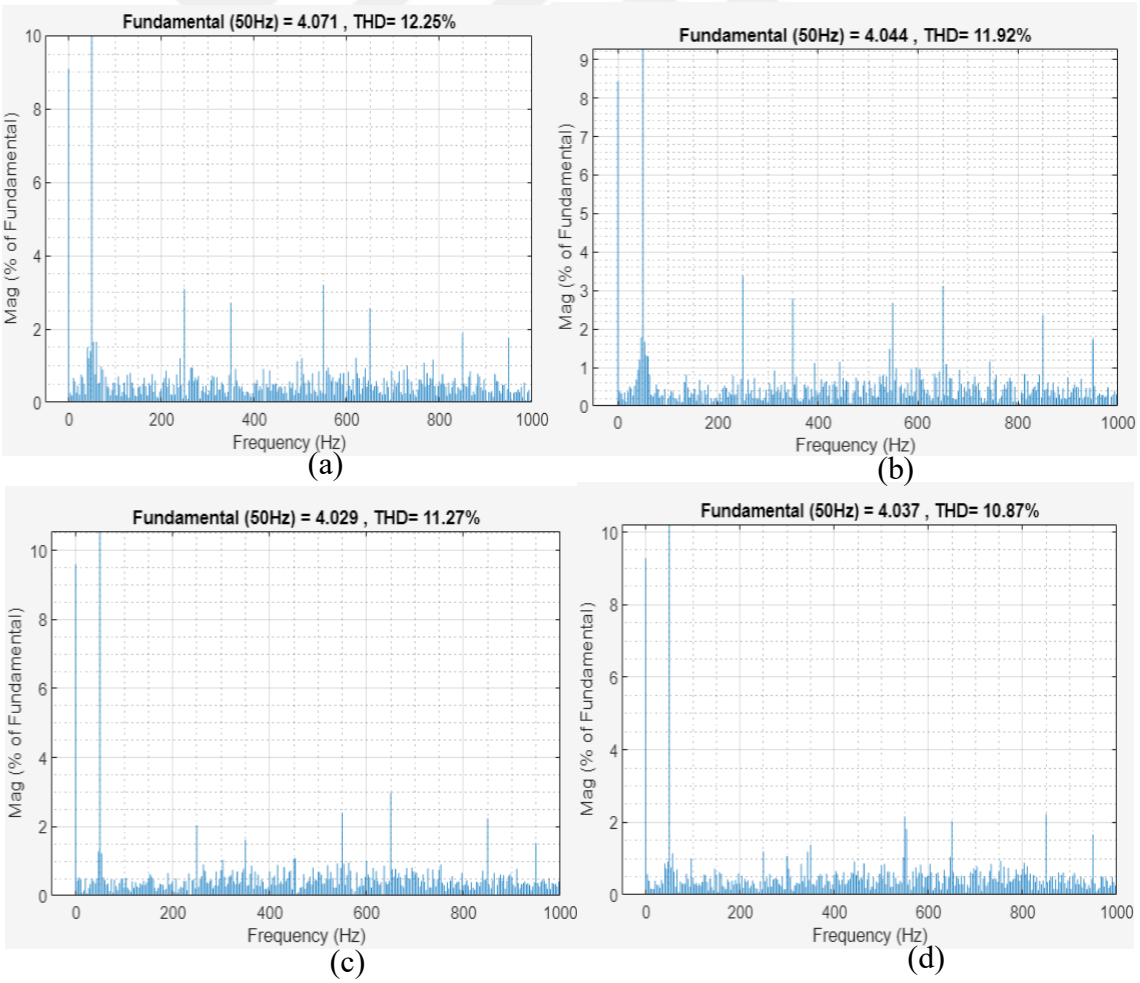
Tablo 3. 14. Dengesiz nonlineer yük bağlantısında akımların % THB değerleri

Dengesiz-Nonlineer Yük	I_{OBN}			$I_{DStatcom}$		
Fazlar	a	b	c	a	b	c
Rüzgar Türbini Bağlı Değilken	11.92	11.59	11.09	15.16	14.74	14.27
PSO-PI Kontrol Sistemi	12.25	11.89	11.70	15.33	15.07	14.69
WDE-PI Kontrol Sistemi	15.86	15.85	14.55	16.61	16.69	15.51
ANN Tabanlı Kontrol Sistemi	11.27	11.49	10.88	14.75	15.02	14.14
LSTM Tabanlı Kontrol Sistemi	10.87	11.13	10.90	13.81	14.20	13.81

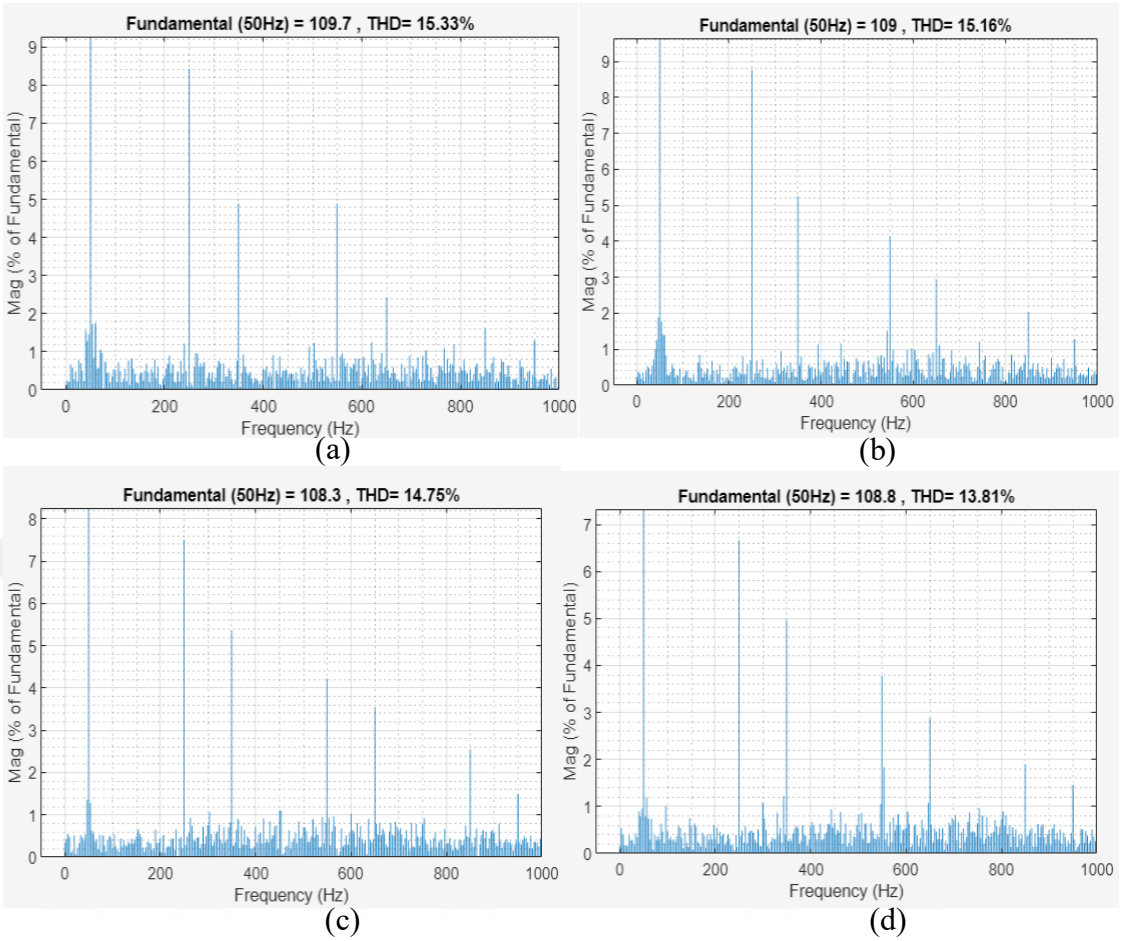
Dengesiz nonlineer yük bağlantısı durumunda elde edilen üç faz için %THB değerleri Tablo 3.14'te verilmiştir. Sonuçlara göre, OBN bara akımının c fazı hariç, diğer tüm durumlarda en küçük %THB değerleri LSTM tabanlı kontrol sistemi ile elde edilmiştir. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken, PSO-PI kontrol sistemine göre OBN bara akımındaki %1.38'lik maksimum harmonik iyileştirme miktarı ile DSTATCOM bara akımındaki %1.52'lik maksimum harmonik iyileştirme miktarı, a fazında LSTM tabanlı kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Rüzgar türbin sisteminin bağlı olmadığı durum ile karşılaştırma yaptığımızda ise ANN tabanlı kontrol sisteminde rüzgar türbinsiz duruma göre,

DSTATCOM bara akımının b fazı hariç diğer tüm fazlarda iyileşme sağlanırken, LSTM tabanlı kontrol sisteminde her iki akım için tüm fazlarda harmonik iyileşme sağlanmış ve rüzgar türbin sisteminin akımlar üzerindeki harmonik bozulma etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Kullanılan tüm dengesiz yük bağlantıları için en yüksek %THB değerlerine WDE-PI kontrol sistemi sahiptir. Yani dengeli nonlineer ve filtre parametre değişimi durumlarında olduğu gibi burada da sistem koşulları kötüleştikçe WDE-PI kontrol sistem performansı zayıflamıştır. Doğrusal olmayan ve/veya dengesizlik durumlarında PSO-PI kontrol sistemi WDE-PI kontrol sisteme göre daha kararlıdır. Bu, PSO algoritmasının adaptif yapısının ve farklı doğrusal olmayan koşullar altında iyi adapte olabilmesinin bir sonucudur. Dengesiz- nonlineer yük bağlantısı için bara akımlarında en fazla harmonik iyileşmenin sağlandığı fazlara ait THB analiz sonuçları Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da verilmiştir.

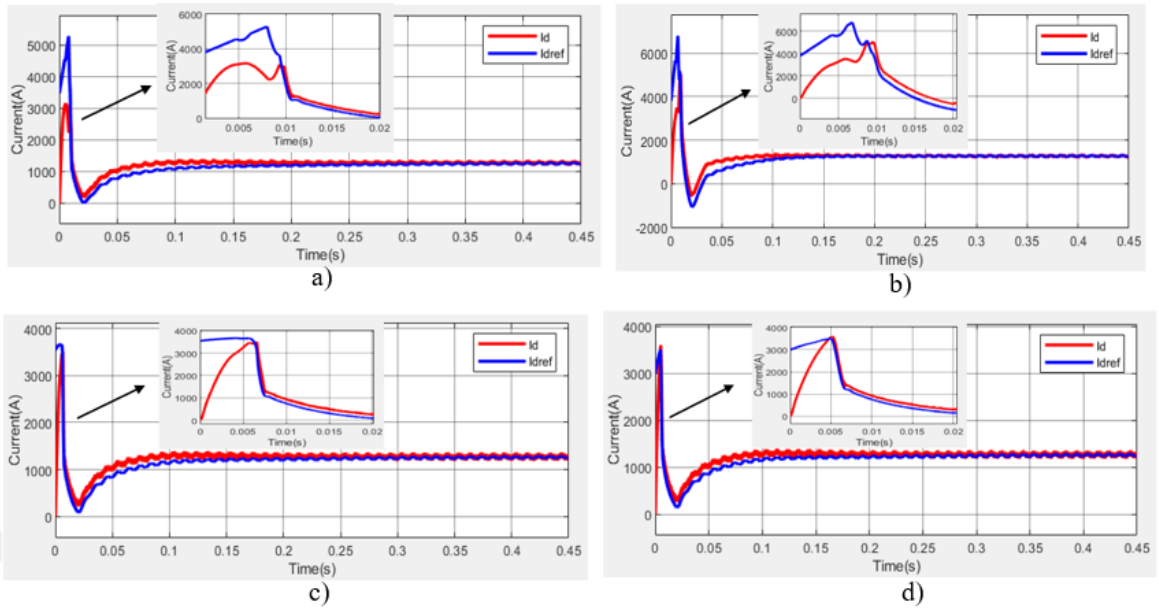


Şekil 3. 28. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken OBN bara akımın a fazı %THB sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c)ANN d) LSTM



Şekil 3. 29. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken DSTATCOM bara akımın a fazı %THB sonuçları a) PSO-PI b) Rüzgar türbini bağlı değilken c) ANN d) LSTM

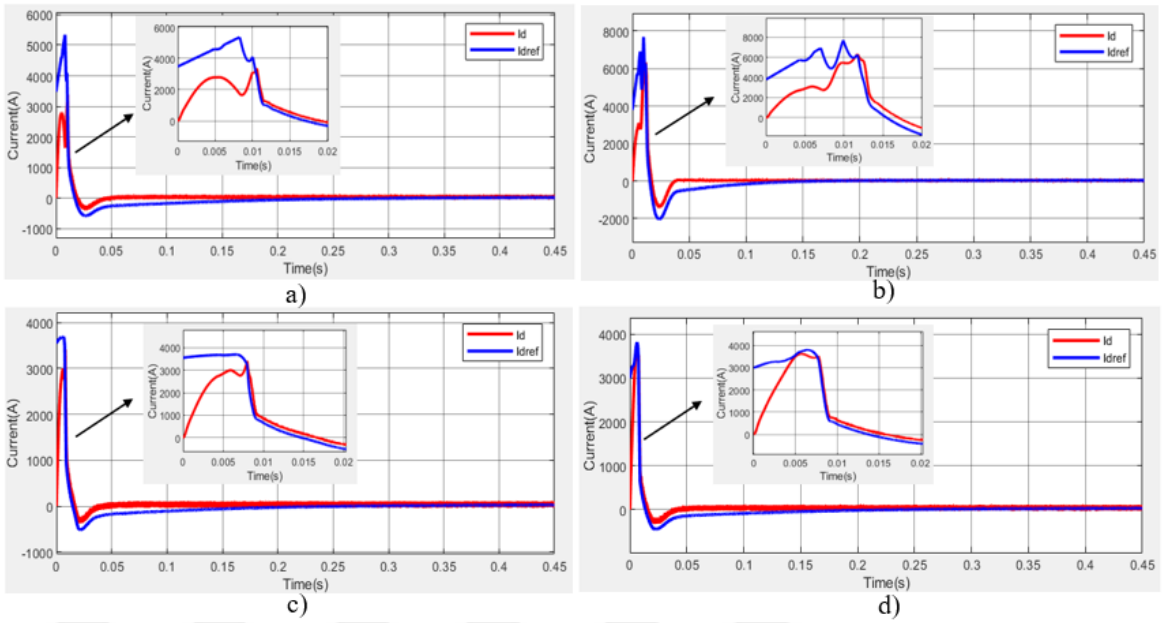
Dengesiz yük bağıntıları kontrol sistem sonuçları karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Yük bağlantılarının dengesiz olması kontrol sistem sonuçlarında akımların salınımlı bir yapıda olmasına neden olmuştur. Dengesiz lineer ve nonlineer yük bağlantıları için kullanılan tüm kontrol sistemi i_d sonuçları sırasıyla Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de gösterilmiştir. Kontrol sistemlerinde referans d akımı (i_{dref}) DC kontrol bloğu tarafından üretilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre başlangıç anında PSO-PI ve WDE-PI sistemlerindeki aşım ve dalgalanma miktarı, zeki kontrol sistemlerine göre daha fazladır. Zeki kontrol sistemindeki salınımlar geleneksel PI kontrol sistemlerine göre daha kısa sürede sönümlenmiş ve bu sistemler daha küçük aşım ile referans akımı takip etmeyi başarmıştır. Başlangıç anında en yüksek aşım ve salınım WDE-PI sistem aitken, zeki kontrol sistemleri birbirine yakın performans sergilemişlerdir.



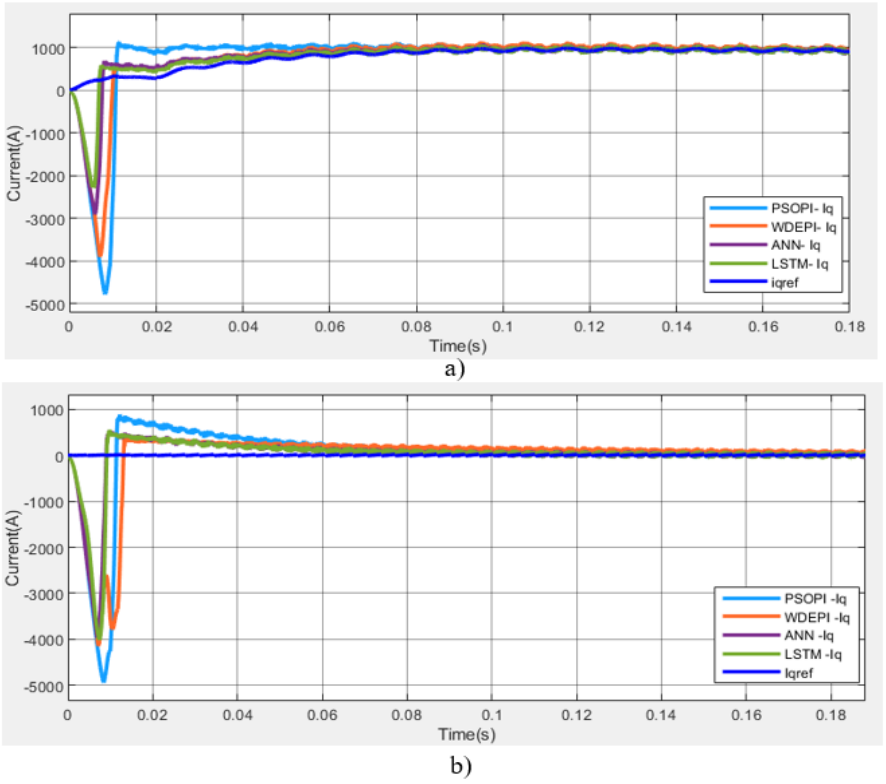
Şekil 3. 30. Dengesiz lineer yük bağlıyken id kontrol sistem sonuçları a) PSO-PI b)WDE PI c) ANN d) LSTM

Kontrol sistemlerinde referans q akımı (i_q) yük tarafından belirlediği için aynı yük bağlantılarında kontrol sistem performanslarını üst üste bindirerek doğrudan karşılaştırma yapılabilir. Dengesiz lineer ve nonlineer yük bağlantısında elde edilen i_q kontrol sistem sonuçları, üst üste bindirilerek Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Bu sayede, kontrol sistemleri arasındaki performans farkı q kontrol sonuçları ile daha net gözlemlenmiştir. Sonuçlarda her iki yük içinde LSTM tabanlı kontrol sisteminin, en küçük aşım ve hata ile referans akıma daha kısa sürede ulaşarak daha üstün bir performans sergilediği görülmektedir. PI sistemleri kendi arasında karşılaştırdığımızda ise PSO-PI kontrol i_d akım sonuçlarında daha kararlı iken WDE-PI i_q akım sonuçlarında daha kararlıdır.

ANN ve LSTM tabanlı kontrol sistemleri ise PSO-PI sisteme göre hem başlangıç anındaki kararlılığın artmasına hem de daha hızlı tepki vererek PSO-PI sisteme göre yerleşme süresinin azaltılmasına katkı sağlamıştır. Elde edilen tüm kontrol sonuçları dikkate alındığında, LSTM tabanlı kontrolün dinamik performans açısından diğer kontrol sistemlerine göre belirgin bir üstünlük sağladığı söylenebilir.



Şekil 3. 31. Dengesiz nonlineer yük bağlıyken i_d kontrol sistem sonuçları a) PSO-PI b)WDE-PI c) ANN d) LSTM



Şekil 3. 32. i_q Kontrol sistem sonuçları a) Dengesiz RL yük bağlıyken b) Dengesiz nonlineer yük bağlıyken

4.BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretimindeki verimi ve güç sistem kararlığı için türbinden kaynaklı oluşabilecek entegrasyon etkilerinin önceden analiz edilmesi ve azaltılmasına yönelik yaklaşımların gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Derin öğrenme algoritmalarının belirsiz ve karmaşık zorlukları çözmedeki başarısı göz önüne alındığında, bu algoritmalar doğrusal olmayan entegrasyon etkilerini azaltarak güç sistem kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunabilir. Ancak literatürde rüzgar türbin entegrasyon etkilerini azaltmak ve/veya kontrol sistemlerini iyileştirmek için derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı çalışma oldukça sınırlı sayıdadır. Gerçekleştirilen çalışma derin öğrenme algoritmalarının güç sistemine sağlayabilecekleri katkılarının test edilmesi kontrol sistemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve literatürde eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ÇBAG'lü rüzgar türbin sisteminin bağlı olduğu şebekeye LCL-DSTATCOM entegre edilmiş ve DSTATCOM kontrolü için ANN ve LSTM tabanlı iki yeni zeki kontrol modeli önerilmiştir.

Önerilen kontrol sistem performansları farklı yük ve koşullar altında geleneksel PSO-PI kontrol sistemi ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, ani gerilim değişimleri sırasında kontrol sistemlerinin birbirine oldukça yakın performans sergiledikleri ve DSTATCOM bağlı olmadığı duruma göre yük geriliminin 1 pu değerine daha kısa sürede ulaşmasını sağlayarak, yaklaşık % 2-3 oranında bir iyileşme sağlandıkları gözlemlenmiştir.

Farklı yük koşuları için bara akımlarının tüm fazları için ayrıntılı harmonik analizler gerçekleştirilmiş ve bara akım harmonikleri iyileştirme açısından tasarlanan yeni zeki kontrol sistemlerinin geleneksel PSO-PI sistemine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, zeki kontrol sistemlerinin PSO-PI sisteme göre akım harmonik iyileştirme

oranları sunulmuş ve nonlineer yük bağlantısı için elde edilen harmonik iyileştirme miktarları literatürdeki benzer bir çalışma [7] ile karşılaştırılarak LSTM tabanlı kontrol yaklaşımının etkinliği doğrulanmıştır.

Filtre devrelerde parametre değerleri elemanın eskimesi, şiddetli hava koşulları veya sıcaklık nedeniyle zamanla değişebilir ve potansiyel olarak istikrarsız dinamikler oluşabilir. LCL filtre nispeten yüksek parametre duyarlılığına sahiptir. Bu durum kontrol sistem kararlılığı için önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada nonlineer yük bağlıyken filtrede yer alan endüktans değerleri %50 oranında azaltılmış ve bu durumda akım harmonik değerleri ile bu değerlerde meydana gelen artış miktarları kontrol sistemleri için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, filtre parametre değişimi durumunda da en düşük harmonik değerlere LSTM tabanlı kontrol sisteminin sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda filtre parametre değişiminin olmadığı durum ile karşılaştırma yapıldığında harmonik bozulmadaki en az artış LSTM tabanlı kontrol sisteminde olmuştur. Yani, LSTM tabanlı kontrol sistemi, sistem koşulları kötüleştikçe daha sağlam bir performans sergileyerek filtre parametre değişimlerine karşı kontrol dayanıklılığını artırmayı başarmıştır.

Rüzgar türbin sistemlerinin yapısına bağlı olarak bazı şebeke entegrasyon etkileri gözlemlenebilir. İlgili güç sistem modelinde dengesiz yüklenme durumlarında rüzgar türbin sisteminin şebeke bara akım harmoniklerinde 3 faz için artışa neden olduğu gözlemlenmiş ve önerilen zeki kontrol sistemleri ile türbinden kaynaklanan harmonik bozulma artışının ortadan kaldırıp kaldırılamayacağı incelenmiştir. Sonuçlara göre, rüzgar türbin sistemi şebekeye bağlıyken önerilen kontrol sistemleri ile türbinsiz durumdan daha küçük %THB değerlerinin elde edilerek, türbin şebeke entegrasyon etkisinin ortadan kaldırıldığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan ANN ve LSTM tabanlı kontrol sistemleri, rüzgar türbini sisteminden kaynaklanan entegrasyon etkilerini azaltarak güç kalitesinin iyileştirilmesine yönelik literatüre yeni bir alternatif yaklaşım sunması açısından önemlidir.

Çalışmada ek olarak, PSO-PI kontrol sistem performansının değerlendirilebilmesi ve önerilen zeki kontrol sistemlerinin katkılarının doğrulanması için farklı bir meta sezgisel optimizasyon algoritması kullanılmış ve WDE-PI kontrol sistemi tasarlanmıştır. Harmonik analizlerde, endüktif yük bağlantısında PSO-PI daha iyi sonuç verirken, kapasitif yük bağlantısında WDE-PI daha iyi sonuç vermiştir. Ancak nonlineer yük

bağlantısı, filtre parametre değişimi ve dengesiz yüklenme koşulları durumlarında WDE-PI kontrol sistemine kıyasla PSO-PI kontrol sisteminde daha küçük harmonik değerleri elde edilmiş ve iki sistem arasında önemli farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Yani sistem koşulları kötüleştikçe, WDE-PI kontrol sistem performansı zayıflamıştır. Bu, PSO algoritmasının adaptif yapısının ve doğrusal olmayan koşullar altında iyi adapte olabilmesinin bir sonucudur.

Farklı yük bağlantılarında elde edilen kontrol sistem sonuçları analiz edildiğinde ise, tasarlanan zeki kontrol modellerinin geleneksel kontrol sistemlerine göre daha küçük aşım miktarı, daha kısa yerleşme süresi ile referans akımları takip ettiği ve başlangıç anındaki aşım ve salınımların azaltılması sağladığı gözlemlenmiştir. PI kontrol sistemleri kendi arasında karşılaştırıldığında ise, PSO-PI kontrol i_d akım sonuçlarında daha kararlı iken, WDE-PI kontrol i_q akım sonuçlarında daha kararlıdır. Elde edilen tüm kontrol sonuçları dikkate alındığında, LSTM tabanlı kontrolün dinamik performans açısından diğer kontrol sistemlerine göre belirgin bir üstünlük sağladığı söylenebilir. Önerilen kontrol sistemlerinin sağladığı iyileştirmelerle DSTATCOM performansının artmasına ve güç kalite sorunlarının azaltılmasına katkı sağlamıştır.

Yapılabilecek çalışmalar,

- Derin öğrenme algoritmaları için dikkate alınması gereken sorunlar arasında zaman ve hesaplama karmaşıklığı yer almaktadır. Hesaplama karmaşıklığı, gerçekleştirilen işlem sayısı ve eğitilebilir parametre sayısı ile doğru orantılıdır. Bu durum özellikle eğitim süresi ve model performansı üzerinde etkilidir. Karmaşıklığın azaltılmasına yönelik çalışmalar, modelin güç sistemine katkılarını artırabilir.
- Tasarlanan zeki kontrol sistemlerinin sağladığı avantajların yanı sıra, önerilen yaklaşımlarla DSTATCOM'un yük gerilim regülasyon performansında önemli bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu nedenle, DSTATCOM gerilim regülasyon performansını iyileştirmek için ek çalışmalar yapılarak kompanzasyon kapasite artırılabilir.
- Farklı FACTS cihazları için farklı algoritmalar test edilerek güç sisteminde daha fazla iyileşme sağlayacak tahmine dayalı yeni kontrol modelleri geliştirilebilir.
- Kontrol sisteminde yer alan kontrolör sayısının azaltılması sağlayacak daha basit tasarımlar araştırılabilir.

KAYNAKÇA

1. Ezhililjenekkha, G. B., Marselinebeno, M., 2020. Review of power quality issues in solar and wind energy. **Materials Today: Proceedings**, **24**: 2137-2143.
2. Kocatepe, C., İnan, A., Arıkan, O., Yumurtacı, R., Kekezoğlu, B., Baysal, M., Bozkurt, A., Akkaya, Y., 2009. Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **13**: 2553-2561.
3. Sadiq, R., Wang, Z., Chung, Y., C.,,Zhou, C., 2021. A review of STATCOM control for stability enhancement of power systems with wind/PV penetration: Existing research and future scope. **International Transactions on Electrical Energy Systems 31** (11): 1-27.
4. Soomro, H. A., Larik, S. A., Mahar, A.M., Sahito, A. A., Soomro, M. A., Kaloi, S.G., 2021. Dynamic Voltage restorer-a comprehensive review. **Energy Reports**, **7**: 6786-6805.
5. Abay, G.S.,Sani, M.A., 2023. Control of a three-phase grid-connected voltage-sourced converter using long short-term memory networks. **Energies**, **16** (1): 1-16.
6. Chen, J. H., Tan, K. H., Lee, Y.D., 2022. Intelligent controlled DSTATCOM for power quality enhancement. **Energies**, **15** (11).
7. Sah, P.,Singh, K.B., 2023. Power quality improvement using Distribution Static Synchronous Compensator **Computers and Electrical Engineering 106**: 1-30.
8. Gandoman, H.F., Ahmadi, A., Sharaf, M., A.,, Siano, P., Pou, J., Hredzak, B.,Agelidis, G., V.,, 2018. Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **82**: 502-514.
9. Singh, B.,Kumar, R., 2020. A comprehensive survey on enhancement of system performances by using different types of FACTS controllers in power systems with static and realistic load models. **Energy Reports**, **6**: 55-79.
10. Afzal, J.M., Ahmad, S., Arshad, A.,Kazmi, A.A.S., 2018. Voltage improvement of loop configured distribution networks with DGs & FACTS devices, *2018 1st*

International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG). Mirpur Azad Kashmir, Pakistan: IEEE.

11. Yadav, P., Yadav, A., Kamar, I., Taif, M.,Singh, S., 2024. *Mitigate voltage dip using FACTS devices. 2024 International Conference on Communication, Computing and Energy Efficient Technologies (I3CEET)*. 360-365.
12. Hemmati, R., Faraji, H.,Beigvand, Y.N., 2022. Multi objective control scheme on DFIG wind turbine integrated with energy storage system and FACTS devices: steady-state and transient operation improvement **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, **135**: 1-16.
13. Agalar, S.,Kaplan, A.Y., 2018. Power quality improvement using STS and DVR in wind energy system, **Renewable Energy**, **118**: 1031-1040.
14. Kaplan, A.Y., 2014. Modeling and Simulating of a Wind Energy System With Static Transfer Switch Using PSCAD Program, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 120 s.
15. Sivakumar, A.T.,Linda, M.M., 2020. Improving the dynamic performance of grid connected wind farms using modern UPFC. **Microprocessors and Microsystems**, **74**: 1-14.
16. Sakipour, R.,Abdi, H., 2022. Voltage stability improvement of wind farms by self-correcting static volt-ampere reactive compensator and energy storage. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems 140**: 1-17.
17. Abas, N., Dilshad, S., Khalid, A., Saleem, M.S.,Khan, N., 2020. Power quality improvement using dynamic voltage restorer. **IEEE Access**, **8**: 164325-164339.
18. Ashok Kumar, L.,Indragandhi, V., 2018. Power quality improvement of grid-connected wind energy system using facts devices. **International Journal of Ambient Energy**, **41** (6): 631-640.
19. Samet, H., Ketabipour, S., Afrasiabi, M., Afrasiabi, S.,Mohammadi, M., 2020. Deep learning forecaster based controller for SVC: wind farm flicker mitigation. **IEEE Transactions On Industrial Informatics**: 1-8.
20. Mohammadpour, A.H., Ghaderi, A., Mohammadpour, H.,Ali, H.M., 2015. Low voltage ride-through enhancement of fixed-speed wind farms using series FACTS controllers. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, **9**: 12-21.

21. Qi, J., Zhao, W.,Bian, X., 2020. Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration. **IEEE Access**, **8**: 209878 - 209885.

22. Ghosh, H., Saha, K. P., Panda, K. G., 2012. Performance comparison between DVR and DSTATCOM used for load voltage control in distribution side, *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*. India: IEEE.

23. Gour, R.,Verma, V., 2022. comparative performance of DVR and STATCOM for voltage regulation in radial microgrid with high penetration of RES. **International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems**, **13** (9): 831-837.

24. Haque, H.M., 2001. Compensation of Distribution System Voltage Sag by DVR and D-STATCOM. Porto Power Tech Conference. Porto, Portugal IEEE.

25. Sayahi, K., Kadri, A., Bacha, F.,Marzougui, H., 2020. Implementation of a D-STATCOM control strategy based on direct power control method for grid connected wind turbine. **Electrical Power and Energy Systems**, **121**: 1-14.

26. Heydari-doostabad, H., Khalghani, R.M.,Khooban, H.M., 2016. A novel control system design to improve LVRT capability of fixed speed wind turbines using STATCOM in presence of voltage fault. **Electrical Power and Energy Systems**, **77**: 280-286.

27. Benali, A., Khiat, M., Allaoui, T.,Denai, M., 2018. power quality improvement and low voltage ride through capability in hybrid wind-PV farms grid-connected using dynamic voltage restorer. **IEEE Access**, **6**: 68634 - 68648.

28. Sunil, P.T.,Loganathan, N., 2012. Power_quality_improvement of a grid connected wind_energy conversion system with_harmonics reduction using FACTS device, I*EEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*. Nagapattinam, India, 415-420.

29. Yuvaraj, V., Raj, P.E., Mowlidharan, A.,Thirugnanamoorthy, L., 2011. Power Quality Improvement for Grid Connected Wind Energy System using FACTS device. *Proceedings of the Joint INDS'11 & ISTET'11*. Klagenfurt am Wörthersee, Austria, 1-7.

30. Hassanein, S.W., Ahmed, M.M., Raouf, O.M., Ashmawy, G.M., Mosaad, I.M., 2020. Performance improvement of off-grid hybrid renewable energy system

using dynamic voltage restorer. **Alexandria Engineering Journal**, **59**: 1567-1581.

31. Amalorpavaraj, J. A. R., Kaliannan, P., Padmanaban, S., Subramaniam, U.,Ramachandaramurthy, K.V., 2017. Improved fault ride through capability in DFIG based wind turbines using dynamic voltage restorer with combined feed-forward and feed-back control, **IEEE Access**, **5**: 20494-20503.
32. Singh, B., Dube, S.K.,Arya, S.R., 2015. An improved control algorithm of DSTATCOM for power quality improvement. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, **64**: 493-504.
33. Qais, H.M., Hasanien, M.H.,Alghuwainem, S., 2020. Whale optimization algorithm-based Sugeno fuzzy logic controller for fault ride-through improvement of grid-connected variable speed wind generators. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, **87**: 1-13.
34. Faroug, M.A.M., Rao, N.D., SamikANNu, R., Venkatachary, K.S.,Senthilnathan, K., 2020. Comparative analysis of controllers for stability enhancement for wind energy system with STATCOM in the grid connected environment, **Renewable Energy**, **162**: 2408-2442.
35. Sharma, A.,Singh, N., 2024. Load frequency control of connected multi-area multi-source power systems using energy storage and lyrebird optimization algorithm tuned PID controller. **Journal of Energy Storage**, **100**.
36. Iqbal, M.S., Limon, M.F.A., Kabir, M.M., Hossain, M.Z., Jubayer, M.F.,Soeb, M.J.A., 2024. A hybrid optimization algorithm based on cascaded (1 + PI)-PI-PID controller for load frequency control in interconnected power systems. **Results in Engineering**, **24**.
37. Magesh, T., Devi, G.,Lakshmanan, T., 2023. Improving the performance of grid connected wind generator with a PI control scheme based on the metaheuristic golden eagle optimization algorithm, **Electric Power Systems Research**, **214**.
38. Imtiaz, S., Yang, L., Munir, H.M., Memon, Z.A., Ali, H.Z., Holderbaum, W.,Ahmed, H.F., 2025. Improving microgrid frequency stability through PI-PIDA-driven STATCOM optimization using a hybrid metaheuristic algorithm. **Energy Reports**, **13**: 2907-2932.
39. Bam, G., Guchhait, P.K., Banerjee, A.,Deepa, S.N., 2024. Symbiosis organisms search algorithm for reactive power compensation of STATCOM-PID assisted

isolated wind integrated hybrid power system model. **Electric Power Systems Research**, **227**.

40. Gao, Y., 2023. PID-based search algorithm: A novel metaheuristic algorithm based on PID algorithm. **Expert Systems with Applications**, **232**.
41. Mishra, S.,Ray, P.K., 2016. Power quality improvement using photovoltaic fed DSTATCOM based on JAYA optimization. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, **7** (4): 1672-1680.
42. Indukuri, S.M., Singh, A.K.,Kumar, D.V., 2024. Power management in grid-connected SPV-DSTATCOM systems with metaheuristic optimization, *2024 International Conference on Intelligent Algorithms for Computational Intelligence Systems (IACIS)*. Hassan, India, 1-6.
43. Khadse, D.,Beohar, A., 2024. Enhancement of power quality problems using DSTATCOM: An optimized control approach. **Solar Energy**, **268** (112260): 1-13.
44. Saxena, K.N.,Kumar, A., 2016. Reactive power control in decentralized hybrid power system with STATCOM using GA, ANN and ANFIS methods. **Electrical Power and Energy Systems**, **83**: 175-187.
45. Bakir, H.,Kulaksiz, A.A., 2020. Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA, **Engineering Science and Technology, an International Journal**, **23**: 576-584.
46. Divya, B.V.,Archana, N.V., 2024. ANFIS-MPC-based DSTATCOM control in microgrid environment for power quality improvement. **SN Computer Science**, **5** (7).
47. Kumar, A.P., Kumar, G.S., Sreenivasarao, D.,Myneni, H., 2019. Model predictive current control of DSTATCOM with simplified weighting factor selection using VIKOR method for power quality improvement, **IET Generation, Transmission & Distribution**, **13** (16): 3649-3660.
48. Yadav, S., Yadav, P., Pandey, J., Vishwakarma, S.,Shekhar, Y., 2024. optimization techniques for fuzzy-PID control of CSC-based D-STATCOM for power quality improvement. **International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology**, **12** (3): 126-134.

49. Lin, F.-J., Tan, K.-H., Kuan, Z.-Y.,Wang, C.-Y., 2025. Droop Controlled Microgrid with Intelligent PV-DSTATCOM for Power Quality Improvement. **IEEE Transactions on Power Electronics**, **40** (9): 12754-12769.
50. Irfan, M.M., Malaji, S., Patsa, C., Rangarajan, S.S.,Hussain, S.M.S., 2022. Control of DSTATCOM Using ANN-BP Algorithm for the Grid Connected Wind Energy System, **energies**, **15** (19).
51. Muraly, N.,Ajay D Vimal Raj, P., 2025. Innovative approach for improving power quality in solar energy systems with DSTATCOM for stabilising the grid and effectively mitigating harmonics, **Renewable Energy**, **250**.
52. Irfan, M. M., Alharbi, M.,Basha, C.H.H., 2025. Artificial neural network controlled DSTATCOM for mitigating power quality concerns in solar PV and wind system. **Sci Rep**, **15** (1): 5016.
53. Ramana, P. V., Rosalina, K. M., 2025. Optimizing weak grid integrated wind energy systems using ANFIS-SRF controlled DSTATCOM. **Sci Rep**, **15** (1): 13662.
54. Jayachandran, J.,Murali Sachithanandam, R., 2016. ANN based controller for three phase four leg shunt active filter for power quality improvement, **Ain Shams Engineering Journal**, **7** (1): 275-292.
55. Subanth, W. S., Malar, M. S., Ahilan, T., 2023. Wind connected distribution system with intelligent controller based compensators for power quality issues mitigation, **Electric Power Systems Research**, **217**.
56. TÜREB, 2025. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği İstatistik Raporu Ocak 2025.
57. Özdoğan, N., 2021. Rüzgar Enerji Santrallerinin Dağıtım Şebekelerine Entegrasyonunun İncelenmesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 111 s.
58. Yonis, A. S., 2022. Modeling, Control and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Based on Wind Turbine System., Institute of Graduate Programs , Karabük University, Karabük, 116 s.
59. Dabakoğlu, A., 2017. Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Performanslarının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 131 s.
60. Turgut, E., Selçuk, K., 2016. Elektrik Enerjisi Üretimi, İletimi ve Dağıtımı, Detay Yayıncılık, Ankara. 388 s.

61. Ceylan, M., 2020. Elektrik Enerjisi Santralleri ve Elektrik Enerjisi İletimi, Dağıtımı, Seçkin Yayıncılık, Ankara. 456 s.
62. Rona, B., 2014. Rüzgar Santrallerinin Güç Sistemine Entegrasyonu ve Şebeke Yönetmenliğine Göre Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
63. Uslu, F. A., 2019. Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
64. Taşcıkarağlu, A., 2008. Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkilerinin Modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 93 s.
65. Ibrahim, H., Ghandour, M., Dimitrova, M., Ilinca, A.,Perron, J., 2011. Integration of wind energy into electricity systems: technical challenges and actual solutions., **Energy Procedia 6**:815-824.
66. Taşdemir, O., 2020. Mikro Şebekelerde Güç Kalitesinin İyileştirilmesi için D-STATCOM Tasarımı ve Analizi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 95 s.
67. Fernandez, M.J., 2015. A voltage disturbances prototype for testing electrical generators connected to microgrids, Universidad Politécnica de Madrid, 219 s.
68. Benzohra, O., Echcharqaouy, S.S., Fraija, F.,Saifaoui D., 2020. Integrating wind energy into the power grid: impact and solutions, **Materials Today: Proceedings**
69. Mantaş, A.C., Yalman, Y., Tekşut, B.,Bayındır, Ç., 2018. Türkiye elektrik iletim şebekesinde güç kalitesi parametrelerinin yönetmelik ve standartlar ışığında yıllara göre değerlendirilmesi. Güç Sistemleri Konferansı. Ankara, 117-124.
70. Yoldaş, Y., 2015. Design and Simulation of DSTATCOM for Power Quality Improvements. Institute of Natural and Applied Sciences, Çukurova University Adana, 120 s.
71. Akkilah, H.M., 2020. Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems using Custom Power Devices, Institute of Graduate Studies, İstanbul Aydın University, İstanbul, 63 s.
72. Kongtrakul, N., Wangdee, W.,Chantaraskul, S., 2023. Comprehensive review and a novel technique on voltage unbalance compensation, **IET Smart Grid**, **6** (4): 331-358.

73. Mararakanye, N.,Bekker, B., 2019. Renewable energy integration impacts within the context ot generator type, penetration level and grid characteristics, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **108**: 441-451.

74. Ravi, T.,Sathish Kumar, K., 2022. Analysis, monitoring, and mitigation of power quality disturbances in a distributed generation system, **Frontiers in Energy Research**, **10**.

75. Dash, A., Bagarty, D.P., Hota, P.K., Muduli, U.R., Hosani, K.A.,Behera, R.K., 2021. Performance Evaluation of Three-Phase Grid-Tied SPV-DSTATCOM With DC-Offset Compensation Under Dynamic Load Condition, **IEEE Access**, **9**: 161395-161406.

76. Bayraktar, E., 2021. Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Artırılmasında FACTS Cihazların Uygulaması. Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis, 78 s.

77. Bogoçoğlu, Ö.G., 2024. Yenilebilir Enerji Kaynaklarının Güç Sistemi Entegrasyonunda Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) Kullanımının Etkileri. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 177 s.

78. Dicle, M., 2019. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri ve Özel Güç Cihazlarında Kullanılan Evirici Yapıların İncelenmesi. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 121 s.

79. Koçakelçi, H., 2025. Güç Sistemlerinin Kontrolünde FACTS - STATCOM Donanımlarının Kullanımı ve Etkilerinin SİMULİNK Model Üzerinde Değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 115 s.

80. Alajrash, B.H., Salem, M., Swadi, M., Senjyu, T., Kamarol, M.,Motahhir, S., 2024. A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems: Addressing power quality, optimal placement, and stability with renewable energy penetration. **Energy Reports**, **11**: 5350-5371.

81. Çifci, A., 2015. FACTS Cihazları Kullanılan Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Fonksiyonu İle Gerilim Kararlılığı Analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 239 s.

82. Köse, E., 2012. Gerilim Kararlılığı İyileştiricilerinin Akıllı Algoritma Tabanlı Kayan Kipli Kontrolü. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 148 s.

83. Özkol, S., 2019. Orta Gerilim Şebekelerinde Kısa Süreli Gerilim Düşümlerine Karşı Önlemler, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 83 s.

84. Lipnicki, P., 2010. Reactive Power Control for Wind Power Plant with STATCOM, Aalborg University, Denmark.

85. Güleryüz, M., 2011. FACTS Cihazları ve Rüzgar Enerji Santrallerinin Gerilim Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 107 s.

86. Bakır, H., 2021. STATCOM İçeren Güneş-Rüzgar Hibrit Mikro Şebekenin Modellenmesi ve Optimizasyonu, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 134 s.

87. Bakir, H.,Kulaksiz, A.A., 2020. Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, **23** (3): 576-584.

88. Sreejith, S., Psimon, S.,Selvan, M.P., 2013. Optimal location of interline power flow controller in a power system network using ABC algorithm. **Archives of Electrical Engineering**, **62** (1): 91-110.

89. Ewaoche, J.O.,Nwulu, N., 2018. Design and Simulation Of UPFC and IPFC for Voltage Stability Under A Single Line Contingency: A Comparative Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Washington*, USA, 1369-1380.

90. Ngei, U.M., Nyete, A.M., Moses, P.M.,Wekesa, C., 2024. Optimal sizing and placement of STATCOM, TCSC and UPFC using a novel hybrid genetic algorithm-improved particle swarm optimization, **Heliyon**, **10** (23): 1-19.

91. Gencer, E., 2018. Orta Gerilim Şebekelerinde Gerilim Sarkmalarına D-STATCOM Etkileri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 87 s.

92. Ramesh, S., Sarvanan, I.,Suresh, P., 2017. Voltage sag compensation in fourteen bus system using IDVR. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, **4** (3): 183-186.

93. Dheeban S. S., Selvan, M., Subramaniam, U., 2021. Artificial neural network based solar energy integrated unified power quality conditioner, **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, **47** (1): 7336-7360.

94. Rasheed, M.A., 2017. Gerilim Düşümlerinde D-STATCOM Kullanarak Güç Kalitesinin İyileştirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 72 s.

95. Bhosale, S.S., Bhosale, N.Y., Chavan, M.A.,Malvekar, A.S., 2018. Power Quality Improvement by Using UPQC: A Review. *International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCOBNT)*. KANNur, India, 375-380.

96. Karthik, V., Kumar, S.T., Suresh, V., Santhoshi, K.B.,Nayak, R.M., 2021. Performance of DFIG fed wind turbine under fault conditions, **Materials Today: Proceedings**: 1-7.

97. Akhmatov, V., 2002. Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools,, **Wind Engineering 26** (2).

98. Kaloi, S. G., Wang, J., Baloch, H.M., 2016. Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system, **Energy Reports**, **2**: 194-200.

99. Bakır, H., 2021. STATCOM İçeren Güneş-Rüzgar Hibrit Mikro Şebekenin Modellenmesi ve Optimizasyonu, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.

100. Weng, T.Y., Hsu, Y. Y., 2016. Reactive power control strategy for a wind farm with DFIG, **Renewable Energy**, **94**: 383-390.

101. Adetokuna, B.B., Muriithib, M.C., Ojoc, O.J., 2020. Voltage stability assessment and enhancement of power grid with increasing wind energy penetration, **Electrical Power and Energy Systems**, **120**: 1-11.

102. Mahela, P.O.,Shaik, G.A., 2015. A review of distribution static compensator, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **50**: 531-546.

103. Chowdhury, M. M., 2014. Modelling and Control of Direct Drive Variable Speed Wind Turbine with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator, Tasmania University, Australia.

104. Li, S., Xu, L., Haskew, T.A., 2013. Control of VSC-based STATCOM using conventional and direct-current vector control strategies, **Electrical Power and Energy Systems**, **45**: 173-186.

105. Rajendran, S., Kumar, M. A., Selvi, I. A.V., 2022. Particle swarm optimization tuned Hybrid Sliding Mode Controller based static synchronous compensator with

LCL filter for power quality improvement, **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, **53**: 1-9.

106. Pandey, R., Tripathy, N.R.,Hanamoto, T., 2017. Comprehensive Analysis of LCL Filter Interfaced Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter-Based DSTATCOM, **energies**, **10** (3): 1-19.
107. Wang, M., Wang, X., Qiao, J.,Wang, L., 2019. Improved current decoupling method for robustness improvement of LCL-type STATCOM Based on Active Disturbance Rejection Control, **IEEE Access**, **7**: 121781-121792.
108. Reznik A., Simoes, G.M., Al-Durra, A.,Muyeen, M.S., 2014. LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems, **IEEE Transaction on Industrial Applications**, **50** (2): 1225-1232.
109. Hamoud, F., Doumbia, L.M.,Cheriti, A., 2015. Power factor improvement in WECS using Cascade PI Control of Passive Damping LCL-Filter. *2015 International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*. Canada: IEEE.
110. Kumar, C.,Mishra, K.M., 2014. An improved hybrid dstatcom topology to compensate reactive and nonlinear loads, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, **61** (12): 6517-6527.
111. Sun, Y.,Li, S., 2015. Comparison of conventional and a novel direct current vector control approaches for a LCL-filter based STATCOM. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Denver, CO: IEEE, 1-5.
112. Fu, X., Li, S.,Jaithwa, I., 2015. Implement optimal vector control for LCL-filter-based grid-connected converters by using recurrent neural networks, **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, **62** (7): 4443-4454.
113. Alhattab, S.A., Alsammak, B.N.A.,Mohammed, A.H., 2023. Adequate compensation of DSTATCOM-based FGS for mitigating the impact of source disturbances in radial power systems, **Journal of Optimization & Decision Making**, **2** (1): 191-198.
114. Shah, W.S., 2019. Application of STATCOM for the Mitigation of Disturbance and Stability of Wind Farm Connected to Weak Grid, Capital University, Pakistan, 73 s.

115. Nafeh, A.A., Heikal, A., El-Sehiemy, A.R.,Salem, A.A.W., 2022. Intelligent fuzzy-based controllers for voltage stability enhancement of AC-DC micro-grid with D-STATCOM, **Alexandria Engineering Journal**, **61**: 2260-2293.

116. Sethy, K.S.,Moharana, K.J., 2012. Design, analysis and simulation of linear model of a statcom for reactive power compensation with variation of DC-link voltage, **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)**, **2** (5): 183-189.

117. Coteli, R., Deniz, E., Tuncer, S.,Dandil, B., 2014. Three-level cascaded inverter based d-statcom using decoupled indirect current control, **IETE Journal of Research**, **57** (3): 207-214.

118. Zhichao, H., Shengzhen, Y., Hongyan, Y.,Xingming, F., 25-27 October. A control method for SVPWM-based STATCOM using active-reactive current decouple under dq coordinate system. *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012).* Romania: IEEE.

119. Kumar, P., Kumar, N.,Akella, A.K., 2014. A simulation based case study for control of DSTATCOM, **ISA Transactions**, **53** (3): 767-775.

120. Negi, P., Pal, Y.,Leena, G., 2017. A review of various topologies control schemes, **Majlesi Journal of Electrical Engineering**, **11** (1): 25-35.

121. Bajaj, M., Pushkarna, M., Rana, S.A., Khan, T. M., 2015. An improved SRF based control algorithm for D-STATCOM under abnormal source voltage. *2015 ANNual IEEE India Conference (INDICON)*. New Delhi, India, 1-6.

122. Somsai, K., Kulworawanichpong, T., 2010. Instantaneous power control of D-STATCOM with consideration of power factor correction *The 2010 ECTI International Confernce on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology.* Chiang Mai, Thailand: IEEE.

123. Kamaladevi, K.,Krishna, M.M.N., 2015. Instantaneous power control of D-STATCOM for enhancement of the steady-state performance. **International Journal of Technical Research and Applications**, **3** (4): 224-230.

124. Sarvghadi, P., Ghazi, R.,Heydari-doostabad, H., 2017. A new approach for predictive control system design to improve power factor and reduce harmonic current injection using D-STATCOM, *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference.* Mashhad, Iran: IEEE, 401-406.

125. Saidu, A., Kadandani, B.N.,Bukata B. B., 2024. A technical review of the basic topologies and control strategies for DSTATCOM in mitigating power quality problems. **Journal of Sustainable Engineering and Technology 1**(2): 161-179.

126. Nafeh, A.A., Heikal, A., El-Sehiemy, R.A.,Salem, W.A.A., 2022. Intelligent fuzzy-based controllers for voltage stability enhancement of AC-DC micro-grid with D-STATCOM, **Alexandria Engineering Journal**, **61** (3): 2260-2293.

127. Amoozegar, D., 2016. DSTATCOM modelling for voltage stability with fuzzy logic PI current controller, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, **76**: 129-135.

128. Acharya, P. D., Nayak, N.,Choudhury, S., 2021. Active power management in an AC microgrid using artificial neural network and DSTATCOM. *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT)*. Bhubaneswar, India, 1-6.

129. Dev, P., Jain, S., Arora, K.P.,Kumar, H., 2021. Machine learning and its impact on control systems: A review. **Materials Today: Proceedings**, **47**: 3744-3749.

130. Özdoğan, N.,Bahçeci, S., 2025. Control of distribution static synchronous compensator using intelligent methods to improve power quality. **Computers and Electrical Engineering**, **126**.

131. Abdolrasol, M.G.M., HANNan, M.A., Hussain, S.M.S.,Ustun, T.S., 2022. Optimal PI controller based PSO optimization for PV inverter using SPWM techniques. **Energy Reports**, **8**: 1003-1011.

132. Reddy, K.,Saha, A.K., 2022. A review of swarm-based metaheuristic optimization techniques and their application to doubly fed induction generator. **Heliyon**, **8** (10): e10956.

133. Benteşen Yakut, Y., 2024. A new control algorithm for increasing efficiency of PEM fuel cells – Based boost converter using PI controller with PSO method. **International Journal of Hydrogen Energy**, **75**: 1-11.

134. Reddy, M.M., Varma, P.S.,Lenine, D., 2023. Improving gain of real time PI controller using particle swarm optimization in active power filter. **Microprocessors and Microsystems**, **97**.

135. Sreenu, C., Mallesham, G., Shekar, T.C.,Salkuti, S.R., 2024. Pairing voltage-source converters with PI tuning controller based on PSO for grid-connected wind-solar cogeneration. **Franklin Open**, **8**.

136. Alkuhayli, A.,Hasanien, H.M., 2024. Optimized hybrid osprey with PSO control for improved VSC-HVDC-wind power integration. **Results in Engineering**, **24**.

137. Imtiaz, S., Yang, L., Azib Khan, H.M., Mudassir Munir, H., Alharbi, M.,Jamil, M., 2024. Wind-assisted microgrid grid code compliance employing a hybrid Particle swarm optimization-Artificial hummingbird algorithm optimizer-tuned STATCOM. **Wind Energy**, **27** (7): 711-732.

138. Tarczewski, T., Stojic, D., Szczepanski, R., Niewiara, L., Grzesiak, L.M.,Hu, X., 2023. Online auto-tuning of multiresonant current controller with nature-inspired optimization algorithms and disturbance in the loop approach. **Applied Soft Computing**, **144**.

139. Sharafi, M.,Elmekkawy, T.Y., 2014. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. **Renewable Energy**, **68**: 67-79.

140. Civicioglu, P., Besdok, E., Gunen, M.A.,Atasever, U.H., 2018. Weighted differential evolution algorithm for numerical function optimization: a comparative study with cuckoo search, artificial bee colony, adaptive differential evolution, and backtracking search optimization algorithms, **Neural Computing and Applications**, **32** (8): 3923-3937.

141. Civicioglu, P.,Besdok, E., 2022. Contrast stretching based pansharpening by using weighted differential evolution algorithm. **Expert Systems with Applications**, **208**.

142. Naz, S., Zameer, A., Raja, M.A.Z., Muhammad, K., 2021. Weighted differential evolution heuristics for improved multilayer piezoelectric transducer design. **Applied Soft Computing**, **113**.

143. Kumar, S.,Dahiya, A.K., 2024. Enhancing multi-machine power system stability with STATCOM-SMES: a soft computing approach. **Computers and Electrical Engineering**, **120**.

144. Jayachandran, J.,Sachithanandam, M.R., 2016. ANN based controller for three phase four leg shuntnactive filter for power quality improvement. **Ain Shams Engineering Journal**, **7**: 275-292.

145. Majout, B., Bossoufi, B., Karim, M., Skruch, P., Mobayen, S., El Mourabit, Y.,El Zair Laggoun, Z., 2024. Artificial neural network-based direct power control to enhance the performance of a PMSG-wind energy conversion system under real

wind speed and parameter uncertainties: An experimental validation. **Energy Reports**, **11**: 4356-4378.

146. Zhang, Y., Shi, X., Zhang, H., Cao, Y.,Terzija, V., 2022. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, **136**: 1-18.
147. Hou, C., Han, H., Liu, Z.,Su, M., 2019. A Wind Direction Forecasting Method Based on Z_Score Normalization and Long Short_Term Memory, *2019 IEEE 3rd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA).* Taiyuan, China, 172-176.
148. Patil, D., Wadhvani, R., Shukla, S.,Gupta, M., 2022. Adaptive wind data normalization to improve the performance of forecasting models, **Wind Engineering**, **46** (5): 1606-1617.
149. Altan, A., Karasu, S.,Zio, E., 2021. A new hybrid model for wind speed forecasting combining long short-term memory neural network, decomposition methods and grey wolf optimizer. **Applied Soft Computing**, **100**: 1-20.
150. Qin, S., Tao, J.,Zhao, Z., 2023. Fault diagnosis of wind turbine pitch system based on LSTM with multi-chANNel attention mechanism. **Energy Reports**, **10**: 4087-4096.
151. Wang, Q., Liang, X.,Qin, S., 2022. Research on power quality disturbance analysis and identification based on LSTM, *2022 International Conference on Energy Storage Technology and Power Systems (ESPS 2022).* Guilin, China: Energy Report, 709-718.
152. Williams, S., Malar, M., S.,,Ahilan, T., 2023. Wind connected distribution system with intelligent controller based compensators for power quality issues mitigation. **Electric Power Systems Research**, **217**: 1-20.
153. Chen, X., Yu, R., Ullah, S., Wu, D., Li, Z., Li, Q., Qi, H., Liu, J., Liu, M.,Zhang, Y., 2022. A novel loss function of deep learning in wind speed forecasting. **Energy**, **238**.
154. Al-Selwi, S.M., Hassan, M.F., Abdulkadir, S.J., Muneer, A., Sumiea, E.H., Alqushaibi, A.,Ragab, M.G., 2024. RNN-LSTM: from applications to modeling techniques and beyond—Systematic review. **Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences**, **36** (5).

155. Petrozziello, A., Troiano, L., Serra, A., Jordanov, I., Storti, G., Tagliaferri, R.,La Rocca, M., 2022. Deep learning for volatility forecasting in asset management. **Soft Computing**, **26** (17): 8553-8574.

156. Mirza, A.H., Kerpicci, M.,Kozat, S.S., 2020. Efficient online learning with improved LSTM neural networks, **Digital Signal Processing**, **102**.

157. Ijaz, K., Hussain, Z., Ahmad, J., Ali, S.F., Adnan, M.,Khosa, I., 2022. A Novel Temporal Feature Selection Based LSTM Model for Electrical Short-Term Load Forecasting. **IEEE Access**, **10**: 82596-82613.

158. Yang, M., Guo, Y., Huang, T.,Zhang, W., 2025. Power prediction considering NWP wind speed error tolerability: A strategy to improve the accuracy of short-term wind power prediction under wind speed offset scenarios. **Applied Energy**, **377**.

159. Zhang, X.,Dimitrov, N., 2024. Variable importance analysis of wind turbine extreme responses with Shapley value explanation. **Renewable Energy**, **232**.

160. Omer, Z.M.,Shareef, H., 2023. An adjustable machine learning gradient boosting-based controller for PV applications. **Intelligent Systems with Applications**, **19**.

161. Hamoud, F., Doumbia, L.M.,Cheriti, A., 2017. Voltage sag and swell mitigation using DSTATCOM in renewable energy based distributed generation systems, *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* Monte Carlo, Monaco: IEEE.

162. Sun, Y.,Li, S., 2015. Comparison of conventional and a novel direct current vector control approaches for a LCL-filter based STATCOM, *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Denver, CO: IEEE, 1-5.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Nazlıhan ÖZDOĞAN

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	2021
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	2019
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi, Kayseri	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2019-2020	Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Özdoğan, N.,Bahçeci, S., 2023. Şebekeye bağlı rüzgar enerji sisteminin PSCAD ile modellenmesi ve incelenmesi. **Politeknik Dergisi**, **26** (1):49-59
2. Özdoğan, N.,Bahçeci, S., 2025. Control of distribution static synchronous compensator using intelligent methods to improve power quality. **Computers and Electrical Engineering**, **126**:1-19
3. Özdoğan, N.,Bahçeci, S., 2025. Fault detection and classification in transmission lines with SAE models, pp.380-386. *7th International Congress on Engineering and Sciences*, 27 - 28 Eylül, İstanbul, Türkiye.
4. Özdoğan, N.,Bahçeci, S., 2025. Artificial intelligence-based DSTATCOM control for power system stability, *ARCENG 5. International Scientific Research Congress, ,* 5 - 7 Aralık, Ankara, Türkiye.