T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İZOLE MİKROŞEBEKELERDE FREKANS REGÜLASYONU İÇİN GERÇEK ZAMANLI UYARLAMALI KONTROL STRATEJİLERİ

Süleyman YILDIZ

Doktora Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

İZOLE MİKROŞEBEKELERDE FREKANS REGÜLASYONU İÇİN GERÇEK ZAMANLI UYARLAMALI KONTROL STRATEJİLERİ

Tez Yazarı
Süleyman YILDIZ

Danışman
Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR

İkinci Danışman
Doç. Dr. Burak YILDIRIM

TEMMUZ 2025
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	İzole Mikroşebekelerde Frekans Regülasyonu için Gerçek Zamanlı Uyarlamalı Kontrol Stratejileri
Yazarı:	Süleyman YILDIZ
İlk Teslim Tarihi:	04.06.2025
Savunma Tarihi:	04.07.2025

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

		İmza
Danışman:	Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mehmet CEBECİ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Heybet KILIÇ Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Cem HAYDAROĞLU Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım "İzole Mikroşebekelerde Frekans Regülasyonu için Gerçek Zamanlı Uyarlamalı Kontrol Stratejileri" Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

04.07.2025

Süleyman YILDIZ

ÖNSÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu, frekans kararlılığı sağlama sürecini daha dinamik ve zorlu bir hale getirmiştir. Bu doğrultuda, geleneksel kontrol yapılarının ötesinde, belirsizlikleri yönetebilen ve değişken koşullara uyum sağlayabilen yeni nesil stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, izole mikroşebekelerde frekans regülasyonunu sağlamak amacıyla yenilikçi kontrol yaklaşımları geliştirilmiş ve önerilen yöntemlerin etkinliği farklı senaryolar altında değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel motivasyonu, daha kararlı, esnek ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktır.

Tez sürecim boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik rehberlikleriyle çalışmamı yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR'e ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Burak YILDIRIM'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komitemde yer alan ve değerlendirmeleriyle çalışmanın gelişimine önemli katkılar sunan Prof. Dr. Mehmet CEBECİ ve Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK'e şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmaları, bilimsel yayın üretilmesi süreci boyunca değerli vakitlerini paylaşarak, yardım ve bilgi paylaşımında bulunan Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÜNDÜZ ile geliştirilen model ve yapılan benzetimlerin uygulamalarının hazırlanmasında ve sonuçlarının alınmasında vermiş olduğu kıymetli destek için Doç. Dr. Heybet KILIÇ'a teşekkür ederim.

Tez Çalışmasında, 1059B142201585 numaralı araştırma burusu kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile Belçika'daki Liège Üniversitesi'nde araştırma faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Yurt dışı araştırma sürecinde bilimsel katkılarıyla araştırmaya yön veren araştırma danışmanım Prof. Damien ERNST'e ve maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm süreç boyunca yanımda olan, sabrı ve desteğiyle beni her zaman motive eden sevgili aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

Süleyman YILDIZ
ELAZIĞ, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ iv
İÇİNDEKİLER v
ÖZET vii
ABSTRACT viii
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xii
SİMGELER xiii
KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. YÜK FREKANS KONTROLÜ 10
2.1. Primer Kontrol 12
2.2. Sekonder Kontrol 13
2.3. Tersiyer Kontrol 15
2.4. Talep Tarafı Yönetimi 15

3. MİKROŞEBEKELER 17
3.1. Mikroşebekelerin Modellenmesi ve Modellerin Bileşenleri 19
3.1.1. Biyogaz Türbin generatör Sistemi 20
3.1.2. Biyodizel Motor Generatör Sistemi 21
3.1.3. Fotovoltaik Sistem 21
3.1.4. Rüzgar Türbin Generatör Sistemi 22
3.1.5. Mikro-Hidro Türbin Generatör Sistemi 22
3.1.6. Su-Elektrolizör Sistemi 23
3.1.7. Yakıt Hücresi Sistemi 23
3.1.8. Sistem Dinamik Modeli 24
3.1.9. Bağlantı Hattı Modeli 25
3.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon Analizi 26

4. KONTROL YÖNTEMLERİ 34
4.1. Oransal-İntegral Kontrolör 35
4.2. Oransal-Türev Kontrolör 36
4.3. Eğimli-İntegral-Türev Kontrolör 37
4.4. Kesir Dereceli PI ve Kesir Dereceli PD Kontrolör 37
4.5. Bulanık Mantık Denetleyiciler 39
4.5.1. Tip II Bulanık Mantık Denetleyici 40
4.6. Kontrol Parametrelerinin Belirlenmesi 42
4.6.1. Geliştirilmiş Salp Sürüsü Algoritması 43
4.6.2. Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması 46

5. GELİŞTİRİLEN KONTROL STRATEJİLERİ VE UYGULAMALARI 51
5.1. Hidrojen-Yakıt Pili Entegreli Yenilikçi Bir Frekans Kontrol Cihazına Sahip İzole Mikroşebeke Sistemi 52
5.1.1. Yakıt Hücreli Mikroşebekenin Modellemesi 53
5.1.2. Kontrolör Dizaynı 55

5.1.3. Benzetim Bulguları 59
5.1.4. Çalışmanın Sonuçları 64
5.2. Hidrojen Bazlı Talep Yanıt Mekanizması ile Desteklenen Çok Bölgeli Mikroşebekelerde Yenilikçi Frekans Kontrolü 65
5.2.1. İki Bölgeli Mikroşebekenin Tasarımı 66
5.2.2. Mikroşebekenin Talep Tarafı Katılım Mekanizmaları ile Desteklenen Yük Frekans Kontrol Yapısı 68
5.2.3. Benzetim Bulguları 74
5.2.4. Genel Değerlendirme, Kısıtlar ve Gelecek Çalışmalar 81
5.3. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Mikroşebekelerde Yük-Frekans Kontrolü ve Siber Güvenliğin Artırılması: Yakıt Hücreli ve Kesir Dereceli Denetleyici Yaklaşımı 82
5.3.1. Mikroşebekenin Modellenmesi 84
5.3.2. Kontrolörün Tasarımı 85
5.3.3. Benzetim Bulguları 89
5.3.4. Genel Değerlendirme ve Gelecek Çalışmalar 96
5.4. Çok Bölgeli Mikroşebekelerin Tip-2 Bulanık Mantık Destekli Kesir Dereceli Kontrolü ve Gerçek Zamanlı Doğrulanması 97
5.4.1. Mikroşebeke Yapısı ve Modeli 98
5.4.2. Kontrolörün Tasarımı 100
5.4.3. Benzetim Bulguları 102
5.4.4. Ayrık Zaman Kararlılık Analizi 114
5.4.5. Kontrolör Tasarımının Donanım Tabanlı Doğrulaması 119
5.4.6. Çalışmanın Sonuçları 120
6. SONUÇLAR 122
ÖNERİLER 124
KAYNAKLAR 125
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

İzole Mikroşebekelerde Frekans Regülasyonu için Gerçek Zamanlı Uyarlamalı Kontrol Stratejileri

Süleyman YILDIZ

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2025, Sayfa: xv + 138

YEK'in dağıtık yapıda ve değişken karakterde güç sistemlerine entegrasyonu, klasik enerji altyapılarında kararlılık ve güvenilirlik sorunlarını beraberinde getirmiştir. Bu doğrultuda, izole modda çalışabilen mikroşebekeler; hem enerji arz güvenliğini sağlama hem de sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma bakımından stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu sistemlerdeki üretim belirsizlikleri ve hızlı dinamikler, YFK gibi temel denetim süreçlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu durum, kontrol stratejilerinin daha esnek, uyarlanabilir ve dayanıklı biçimde geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu tez kapsamında, izole mikroşebeke sistemleri için aralık Tip-2 bulanık mantık ile klasik ve kesir dereceli kontrol tekniklerini birleştiren, kaskat yapılara sahip dört özgün kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Kontrolör parametrelerinin optimizasyonunda, güçlü meta-sezgisel algoritmalar olan CIOA ve ISSA kullanılmıştır. Geliştirilen yapılar; yenilenebilir enerji kaynakları, mikro generatörler ile birlikte, yakıt hücresi ve elektrolizör gibi hidrojen temelli enerji depolama bileşenlerini de içeren çeşitli mikroşebeke konfigürasyonları altında test edilmiştir. Bu testlerde, üretim belirsizlikleri ve yük değişkenliği gibi dinamik koşullar dikkate alınarak, geliştirilen kontrol stratejilerinin performansı kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, belirli senaryolarda talep tarafı esnekliğinin kontrol stratejilerine entegrasyonu ile YFK performansındaki iyileşmeler değerlendirilmiştir. Bununla birlikte FDI ve DoS siber saldırı tehditleri altında kontrolörlerin dayanıklılığı analiz edilmiştir.

Çalışmanın bir diğer yönü, kontrolörlerin saysal ortamlarda güvenilir şekilde uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen ayrık zamanlı kararlılık analizidir. Sürekli zamanlı modellenen sistemlerin sayısal benzetimlerde ayrık zamanlı çalıştırılmasıyla oluşabilecek kararsızlık riski incelenmiştir. Ayrıca, yazılım tabanlı benzetimlerin fiziksel sistemleri ne ölçüde yansıttığını ve gerçek zamanlı simülatörlerin gerekliliği değerlendirilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında test edilen kontrol yapıları, seçili senaryolarda OPAL-RT üzerinde doğrulanmış ve sonuçlar karşılaştırılarak tutarlılık analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yük frekans kontrolü, Kesir dereceli kontrol, Tip 2 bulanık mantık, Geliştirilmiş Salp Sürü Algoritması, Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması, Hidrojen enerjisi

ABSTRACT

Real-Time Adaptive Control Strategies for Frequency Regulation in Isolated Microgrids

Süleyman YILDIZ

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

July 2025, Pages: xv + 138

The integration of renewable energy sources into power systems with distributed and variable characteristics has introduced challenges in maintaining stability and reliability within conventional energy infrastructures. In this context, islanded microgrids have emerged as a strategic solution, providing both energy security and support for sustainability targets. However, uncertainties in generation and rapid system dynamics in such configurations limit the effectiveness of fundamental control processes such as load frequency control. This necessitates the development of control strategies that are more flexible, adaptive, and resilient.

Within the scope of this dissertation, four original control strategies with cascade structures have been developed for islanded microgrid systems by combining interval Type-2 fuzzy logic with classical and fractional order control techniques. For the optimization of controller parameters, powerful metaheuristic algorithms namely, the CIOA and the ISSA have been employed. The proposed structures have been tested under various microgrid configurations, including renewable energy sources, micro-generators, and hydrogen-based energy storage components such as fuel cells and electrolyzers. These tests were conducted under dynamic conditions involving generation uncertainties and load fluctuations, enabling a comprehensive performance assessment of the proposed control strategies. Additionally, improvements in load frequency control performance were evaluated by integrating demand-side flexibility into the control schemes for selected scenarios. The robustness of the proposed controllers was also analyzed under cybersecurity threats, specifically FDI and DoS attacks.

Another critical aspect of this study is the discrete-time stability analysis conducted to assess the reliable digital implementation of the controllers. The instability risks that may arise from operating continuously modeled systems in discretized simulations were investigated. Furthermore, the representational accuracy of software-based simulations in reflecting physical systems and the necessity of real-time simulators were examined. The developed control schemes were tested in the MATLAB/Simulink environment and validated in real-time using the OPAL-RT platform for selected scenarios, with consistency between platforms analyzed through comparative evaluation.

Keywords: Load frequency control, Fractional-order control, Type-2 fuzzy logic, Improved Salp Swarm Algorithm, Circle-Inspired Optimization Algorithm, Hydrogen energy

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yük frekans kontrol çevrimleri 11

Şekil 2.2. Temel frekans eşikleri ve işletme sınırları 12

Şekil 2.3. **(a)** Sistem frekans düşümünde çıkış gücü değişimi **(b)** Sistem frekans artmasında çıkış gücü değişimi **(c)** Primer kontrol sonucunda sistem frekansında meydana gelen sürekli hata 13

Şekil 3.1. Çok bölgeli mikroşebeke sisteminin doğrusal modeli 20

Şekil 3.2. Çok bölgeli mikroşebeke sisteminin doğrusal modeli 27

Şekil 4.1. PI kontrolör blok diyagramı 35

Şekil 4.2. PD kontrolör blok diyagramı 36

Şekil 4.3. TID kontrolör blok diyagramı 37

Şekil 4.4. α ve μ eksenlerinde tam sayı dereceli denetleyici ve kesir dereceli denetleyici 39

Şekil 4.5. Tipik bir bulanık kontrol sistemi blok diyagramı 40

Şekil 4.6. Tipik II bulanık kontrol sisteminin genel yapısı 41

Şekil 4.7. Tip II bulanık denetleyicinin üçgen üyelik fonksiyonları 41

Şekil 4.8. ISSA'nın akış diyagramı 46

Şekil 4.9. CIOA'nın akış yapısı 50

Şekil 5.1. Otonom mikroşebeke enerji sistemi 52

Şekil 5.2. Mikroşebeke YFK modeli 54

Şekil 5.3. C-DIT2-FLC'nin Şematik Diyagramı 55

Şekil 5.4. **(a)** DIT2FLC'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** DIT2FLC'nin tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları 57

Şekil 5.5. PV ve Yükün güç değişimleri 60

Şekil 5.6. Farklı CS için ayarlanmış denetleyicinin frekans tepkileri 60

Şekil 5.7. Seneryo-1'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı 61

Şekil 5.8. Seneryo-2'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı 62

Şekil 5.9. Seneryo-3'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı 63

Şekil 5.10. Seneryo-4'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı 63

Şekil 5.11. YFK'sı araştırılan iki alanlı mikroşebekenin genel yapısı 66

Şekil 5.12. Birbirine bağlı iki bölgeli mikroşebekenin YFK şeması 67

Şekil 5.13. DIT2-FOPI+TID Kontrolör Tasarımı 69

Şekil 5.14. **(a)** $\sigma 1$'in üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** $\sigma 2$'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(c)** $\varphi 0$'ın tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları 71

Şekil 5.15. Farklı $\delta 1IT2$ve $\delta 2IT2$ değerleri için kontrol yüzeylerinin grafiği 72

Şekil 5.16. DRM katkısıyla mikroşebekenin frekans tepki modeli 73
Şekil 5.17. DRM'nin akış şeması 74
Şekil 5.18. Rüzgar, güneş ve yükün güç değişimi 75
Şekil 5.19. Senaryo 1 için kontrolör performanslarının karşılaştırılması 76
Şekil 5.20. DRM1 ile ve DRM1 olmadan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması 77
Şekil 5.21. DRM2 ile ve DRM2 olmadan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması 79
Şekil 5.22. İki bölgede DRM katkılı ve DRM katkısı olmayan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması 80
Şekil 5.23. Çiftlik konseptine uygun mikroşebekenin genel yapısı 82
Şekil 5.24. İzole mikroşebekenin YFK modeli 84
Şekil 5.25. DIT2FLC-FOTID kontrolörün şematik gösterimi 85
Şekil 5.26. **(a)** $\sigma 1$'in üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** $\sigma 2$'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(c)** $y0$'ın tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları 87
Şekil 5.27. PV ve Yükün güç değişimleri 90
Şekil 5.28. Farklı durumlara göre ayarlanmış FOU ile denetleyicinin frekans yanıtları 91
Şekil 5.29. Senaryo 1 için kontrolörlerin frekans yanıtları 92
Şekil 5.30. Senaryo 2 için kontrolörlerin frekans yanıtları 93
Şekil 5.31. Senaryo 3 için kontrolörlerin frekans yanıtları 94
Şekil 5.32. Senaryo 4 için kontrolörlerin frekans yanıtları 95
Şekil 5.33. İki bölgeli mikroşebekenin yapısı 97
Şekil 5.34. İki bölgeli mikroşebekenin YFK modeli 99
Şekil 5.35 DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrolörün şematik gösterimi 101
Şekil 5.36. Kaynak ve yük değişimleri **(a):** Rüzgar gücü **(b):** Solar güç **(c):** Ticari yükler **(d):** Konut yükleri 103
Şekil 5.37. Farklı CS değerlerine göre ayarlanmış kontrolörün frekans yanıtı 104
Şekil 5.38. Senaryo 1 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı 105
Şekil 5.39. Senaryo 2 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı 107
Şekil 5.40. Senaryo 3 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı 109
Şekil 5.41. Senaryo 4 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı 111

Şekil 5.42. Senaryo 5 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı 113

Şekil 5.43. OPAL-RT OP4512 donanımının laboratuvar kurulumu 119

Şekil 5.44. Senaryo 1 için önerilen kontrolörün farklı platformlardaki sistem yanıtları:(a): 1. bölgede frekans yanıtı (b): 2. bölgede frekans yanıtı (c): FC'in güç değişimi (d): AE'nin güç değişimi 120

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Mikroşebekenin parametreleri 54

Tablo 5.2. $\delta IT2$ değerine göre CC sınıflandırılması 57

Tablo 5.3. DIT2FLC'nin kural tablosu 58

Tablo 5.4. ISSA ile belirlenen kontrolör kazançları 58

Tablo 5.5. DIT2FLC'lerin FOU'sunu belirleyen katsayı ayarları 59

Tablo 5.6. Mikroşebekenin YFK model parametreleri 68

Tablo 5.7. ISSA ile belirlenen kontrolör parametreleri 70

Tablo 5.8. DIT2FLC'nin kural tablosu 72

Tablo 5.9. Kontrolör performanslarının ITAE performans indeksine göre kıyaslanması 76

Tablo 5.10. Senaryo 2'de kontrolör stratejilerinin ITEA performans indeksine göre kıyaslanması 78

Tablo 5.11. Senaryo 3'de kontrolör stratejilerinin ITAE performans indeksine göre kıyaslanması 79

Tablo 5.12. Senaryo 4'de kontrolör stratejilerinin ITAE performans indeksine göre kıyaslanması 80

Tablo 5.13. Mikroşebeke model parametreleri 85

Tablo 5.14. CIOA ile belirlenen kontrolör parametreleri 86

Tablo 5.15. DIT2FLC'nin kural tablosu 88

Tablo 5.16. DIT2FLC'nin farklı FOU ayarları 90

Tablo 5.17. Senaryo 1'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması 92

Tablo 5.18. Senaryo 2'ye göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması 93

Tablo 5.19. Senaryo 3'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması 94

Tablo 5.20. Senaryo 4'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması 96

Tablo 5.21. Mikroşebeke modelinin parametreleri 100

Tablo 5.22. $\delta iIT2$ değerine göre CC sınıflandırılması 101

Tablo 5.23. CIOA algoritması ile elde edilen kontrolör parametreleri 102

Tablo 5.24. DIT2FLC'lerin FOU'sunu belirleyen katsayı ayarları 104

Tablo 5.25. Senaryo 1 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları 106

Tablo 5.26. Senaryo 2 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları 108

Tablo 5.27. Senaryo 3 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları 109

Tablo 5.28. Senaryo 4 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları 111

Tablo 5.29. Mikroşebeke parametre değişim oranları 112

Tablo 5.30. Senaryo 5 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları 113

SİMGELER

K_{AE} : AE sisteminin kazancı

K_{BE} : BDEG'nin kazancı

K_{FC} : FC sisteminin kazancı

K_{MG} : MHTG ünitesi hız regülatör kazancı

K_{PV} : PV sisteminin kazancı

K_{VA} : BDEG'nin valf kazancı

K_{WTG} : WTG sisteminin kazancı

T_{AE} : AE sisteminin zaman sabiti

T_{BE} : BDEG'nin zaman sabiti

T_{BT} : BGTG ünitesinin deşarj zaman sabiti

T_{FC} : FC sisteminin zaman sabiti

T_{HT} : MHTG ünitesi hidro türbinin zaman sabiti

T_{MG} : MHTG ünitesi hız regülatörünün zaman sabiti

T_{PV} : PV sisteminin zaman sabit

T_{RH} : MHTG ünitesi regülatör geçici düşüş zaman sabiti

T_{RH} : MHTG ünitesi regülatör geçici düşüş zaman sabiti

T_{Rs} : MHTG ünitesi regülatör sıfırlama zaman sabiti

T_{VA} : BDEG'nin aktüatör gecikmesi

T_{WTG} : WTG sisteminin zaman sabiti

T_{ij} : Bağlantı hattı senkronizasyon moment katsayısı

X_c, : BGTG İlerleme sabiti

Y_c, : BGTG gecikme zamanı

b_B, : BGTG valf aktüatörü dinamiği

k_{e1}, k_{e2} : DIT2FLC için giriş ölçekleme katsayıları

k_u : DIT2FLC'nin çıkış ölçekleme katsayısı

B : Frekans duyarlılık katsayısı

D : Sönümleme katsayısı

M : Atalet sabiti

R : Hız regülasyon katsayısı

$e(t)$: Hata sinyali

$u(t)$: Kontrol sinyali

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ACE	: Alan Kontrol Hatası
AE	: Su Elektrolizörü
AGC	: Otomatik Üretim Kontrolü
BDEG	: Biyodizel Motor Generatör
BGTG	: Biyogaz Türbin Generatör
C-DIT2-FLC	: Kaskat Çift-Giriş Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörü
CIOA	: Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması
CC	: Kontrol Eğrisi
CS	: Katsayı Ayarları
DC	: Doğru Akım
DIT2FLC	: Çift-Giriş Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör
DoS	: Hizmet Reddi
DR	: Talep Tarafı Katılımı
DRM	: Talep Tarafı Yönetim Mekanizması
FC	: Yakıt Hücresi
FDI	: Sahte Veri Enjeksiyonu
FOPD	: Kesir Dereceli Oransal-Türev Kontrol
FOPI	: Kesir Dereceli Oransal-Integral Kontrol
FOPID	: Kesir Dereceli Oransal-Integral-Türev Kontrol
FOTD	: Kesir Dereceli Eğimli-Türev Kontrol
FOTID	: Kesir Dereceli Eğimli-Integral-Türev Kontrol
GA	: Genetik Algoritma
IAE	: Mutlak Hata İntegrali
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
ISE	: Karesel Hata İntegrali
ISSA	: Geliştirilmiş Salp Sürüsü Algoritması
IT2FLC	: Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörü
IT2-FS	: Aralık Tip-2 Bulanık Küme
ITAE	: Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali

ITSE	: Zaman Ağırlıklı Karesel Hata İntegrali
LMF	: Alt Üyelik Fonksiyonu
MPC	: Model Öngörülü Kontrol
MCFC	: Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi
NESCOR	: ABD Ulusal Elektrik Sektörü Siber Güvenlik Kaynağı
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEMFC	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PID	: Oransal-Integral-Türev Kontrol
PI	: Oransal-Integral Kontrol
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
SF	: Ölçekleme Faktörü
SMC	: Kayan Kip Kontrol
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücresi
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
UMF	: Üst Üyelik Fonksiyonu
YFK	: Yük-Frekans Kontrolü
WTG	: Rüzgar Türbin Generatör

1. GİRİŞ

Günümüzde sanayileşmenin hız kazanması, teknolojik ilerlemelerin ivmelenmesi ve kentleşme süreçlerinin yaygınlaşması, küresel enerji talebindeki artışı beraberinde getirmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan World Energy Outlook 2023 raporuna göre, küresel enerji talebi artış eğilimini sürdürmekte ve bu artışın büyük kısmı gelişmekte olan ülkelerden kaynaklanmaktadır [1]. Artan enerji ihtiyacı, enerji arz güvenliğini sağlama çabalarını ve sürdürülebilir enerji yönetimi politikalarını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bununla birlikte, bu talebin büyük ölçüde fosil yakıt temelli kaynaklardan karşılanması; atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu artırmakta, küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi ciddi çevresel sorunların daha da derinleşmesine neden olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Altıncı Değerlendirme Raporu'na göre, net sera gazı emisyonları 2010 yılından bu yana tüm büyük sektörlerde artış göstermiştir. Bu artış özellikle enerji arzı, sanayi, ulaşım ve tarım gibi temel sektörlerde yoğunlaşmaktadır. 2019 yılı itibarıyla, net küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %34'ü doğrudan enerji arz sektöründen kaynaklanmakta olup, bu oran sektörler arasında en yüksek paya sahip emisyon kaynağını temsil etmektedir [2]. Her ne kadar geleneksel fosil yakıtlı enerji santralleri belirli bir verimlilik seviyesi sunabilse de, oluşturdukları karbon emisyonları ve çevresel tahribat, uzun vadede ekosistem dengesi üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu durum, karbon nötr enerji sistemlerine olan ilgiyi artırmış ve düşük karbon ekonomisi hedeflerine ulaşmak için fosil yakıt bağımlılığını azaltmaya yönelik sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır [3,4].

Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretim alternatifleri olarak öne çıkmakta; hem ekolojik dengeyi koruma hem de ekonomik sürdürülebilirliği destekleme açısından stratejik bir rol üstlenmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yayımlanan Renewable Capacity Highlights 2025 raporuna göre, 2024 yılı sonunda küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 4.448 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin en büyük bölümünü 1.865 GW ile güneş enerjisi oluştururken; 1.283 GW ile hidroelektrik enerji ve 1.133 GW ile rüzgar enerjisi onu takip etmektedir. Diğer yenilenebilir enerji türleri arasında ise 151 GW biyoenerji, 15 GW jeotermal enerji ve 0,5 GW deniz enerjisi yer almaktadır. Rapora göre, özellikle güneş ve rüzgar enerjisi, kapasite artışındaki başlıca itici güçler olmuş; 2024 yılı içinde küresel enerji dönüşüm sürecine en yüksek katkıyı sağlayan teknolojiler olarak öne çıkmıştır [5]. YEK'in değişken yapısı, enerji sürekliliği ve esnekliği açısından bazı zorluklar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yeşil hidrojen önemli bir tamamlayıcı unsur olarak öne çıkmaktadır. IRENA'nın 2024 tarihli raporuna göre, sürdürülebilir hidrojen değer zincirleri, enerji geçişinde kritik bir rol üstlenmekte; 2050 yılı itibarıyla küresel nihai enerji tüketiminin %14'üne kadar karşılanabileceği öngörülmektedir [6]. Rüzgar, güneş, hidroelektrik, biyoenerji ve hidrojen

gibi YEK; düşük karbon salımı, geniş doğal kaynak potansiyeli ve uzun vadede maliyet avantajı gibi nitelikleriyle, geleneksel enerji sistemlerine kıyasla önemli üstünlükler sunmaktadır. Bu bağlamda, küresel enerji dönüşüm sürecinde YEK teknolojilerine yapılan yatırımlar hızla artmakta; temiz enerji üretimini destekleyici politikalar geliştirilmektedir [7].

YEK arasında özellikle rüzgar, güneş, hidroelektrik, biyoenerji ve hidrojen gibi alternatifler; sürdürülebilir ve düşük karbonlu üretim süreçlerinin öncüsü olarak enerji sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kaynaklar içinde rüzgar ve güneş enerjisi, yüksek erişilebilirlikleri, düşük işletme maliyetleri ve minimum karbon salımı özellikleri sayesinde enerji dönüşümünün merkezinde yer almaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, rüzgar türbinleri ile güneş panellerinin üretim maliyetlerinde belirgin bir azalma sağlamış; bu durum söz konusu teknolojilerin büyük ölçekli entegrasyonunu hızlandırmıştır [8].

Bu dönüşüm, geleneksel merkeziyetçi enerji üretim modellerinden uzaklaşılarak, daha esnek, dağıtık ve yerinde üretime dayalı enerji yönetim sistemlerinin ön plana çıkmasına neden olmuştur. Enerji üretim ve tüketim yapılarında yaşanan bu paradigma değişimi, dağıtık enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasını teşvik etmekte; böylece yerel ve bölgesel ölçekte enerji arz güvenliği artmakta, sistem esnekliği geliştirilmektedir. Dağıtık üretim yapılarının yaygınlaşması yalnızca enerji verimliliğini yükseltmekle kalmamakta, aynı zamanda iletim kayıplarını azaltarak ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği de desteklemektedir.

Saxena ve arkadaşları [9], Dağıtık enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu üzerine yaptıkları kapsamlı çalışmada, bu kaynakların enerji arz güvenliğini artırmada ve iletim kayıplarını azaltmada önemli avantajlar sunduğunu vurgulamışlardır. Geleneksel merkezi üretim yapılarının uzun mesafeli enerji iletimi nedeniyle yüksek iletim kayıplarına yol açtığı; buna karşın dağıtık üretimin, enerjinin yerel olarak üretilip tüketilmesi sayesinde bu kayıpları önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Bu yaklaşımın sistem verimliliğini artırdığı ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sunduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, söz konusu çalışmada dağıtık sistemlerin entegrasyonunda karşılaşılan teknik ve yönetimsel zorluklara da dikkat çekilmiş; bu zorlukların aşılması için gelişmiş enerji yönetim sistemlerinin, akıllı şebeke teknolojilerinin ve hibrit enerji yapılandırmalarının entegrasyonunun gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Bu noktada, mikroşebekeler, farklı ölçeklerde ve coğrafi konumlarda kurulan yenilenebilir enerji santrallerini, enerji depolama sistemlerini ve tüketici yüklerini entegre eden akıllı enerji yönetim platformları olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel merkezi şebeke sistemlerinden farklı olarak, mikroşebekeler üretim noktalarının tüketim merkezlerine yakınlığı sayesinde şebekeye olan bağımlılığı azaltmakta ve enerji güvenliğini artırmaktadır. Bu sistemler, hem izole modda bağımsız çalışabilme hem de merkezi şebekeye entegre olabilme kabiliyetleriyle kritik yükler için kesintisiz enerji arzı sunmakta; aynı zamanda YEK'in daha verimli bir şekilde sisteme dahil edilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu çerçevede, Mojumder ve arkadaşları [10], Yenilenebilir enerji tabanlı mikroşebeke sistemlerinin potansiyelini ve karşılaştığı zorlukları kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, mikroşebekelerin özellikle kırsal ve uzak bölgelerde sürdürülebilir enerji sağlama kapasitesi vurgulanmış; ancak, bu sistemlerin uygulanmasında karşılaşılan teknik, ekonomik ve düzenleyici engeller detaylandırılmıştır. Yazarlar, enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, uygun politika çerçevelerinin oluşturulması ve yerel toplulukların bilinçlendirilmesinin mikroşebekelerin başarısı için kritik olduğunu belirtmişlerdir.

Benzer şekilde, Álvarez-Arroyo ve arkadaşları [11], esnek enerji depolama sistemlerinin ve YEK'in tam entegrasyonunun mikroşebekelerin enerji yönetimini optimize etmedeki rolünü araştırmışlardır. Çalışma, enerji depolama sistemlerinin mikroşebeke performansını artırmada ve YEK'in süreksizliğini dengelemede önemli katkılar sağladığını ortaya koymuştur.

Ayrıca, Shahzad ve arkadaşları [12], mikroşebekelerin mevcut durumunu, karşılaştığı zorlukları ve gelecekteki fırsatları değerlendirdikleri derleme çalışmalarında, mikroşebekelerin enerji sistemlerine entegrasyonunda karşılaşılan teknik ve operasyonel zorlukları ele almış; bu zorlukların aşılması için gelişmiş kontrol stratejileri ve enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamışlardır.

Enerji sektöründeki dönüşümle birlikte, mikroşebekeler esnek yapıları, gelişmiş kontrol stratejileri ve enerji depolama çözümleriyle desteklenerek, gelecekte sürdürülebilir enerji altyapılarının temel bileşenlerinden biri olmaya adaydır. Bu yapılar, sadece dağıtık üretim sistemleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda enerji yönetiminde yüksek esneklik sunmaları ve yenilenebilir kaynaklarla uyumlu çalışabilmeleri açısından da avantaj sağlamaktadır. Mikroşebekelerin en önemli yetkinliklerinden biri, şebekeden izole modda çalışabilme esnekliklerdir. Bu durum, özellikle doğal afet, şebeke arızaları veya aşırı yüklenme gibi olağanüstü hallerde, enerji arz güvenliğinin korunmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.

Mikroşebekelerin bu avantajlarına rağmen, YEK'e dayalı esnek yapıları, üretim sürekliliği ve güç kalitesi açısından bazı teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Doğası gereği değişken ve tahmin edilebilirliği sınırlı kaynaklardan sağlanan enerji, üretiminde ani dalgalanmalara neden olabilir. Bu tür dalgalanmalar; özellikle izole modda çalışan mikroşebekelerde, sistem kararlılığının korunması ve yük taleplerinin karşılanması açısından önemli sorunlar yaratmaktadır. Frekans sapmaları, sadece enerji yönetim sistemlerinin performansını zayıflatmakla kalmaz; aynı zamanda hassas elektronik ekipmanlar için risk oluşturur ve sistemin bütünsel güvenilirliğini tehlikeye atabilir. Dolayısıyla, mikroşebekelerde güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji arzının sağlanabilmesi için yük-frekans kontrolü (YFK) mekanizmalarının doğru biçimde tasarlanması ve uygulanması büyük önem taşımaktadır [13,14].

YFK probleminin çözümüne yönelik olarak literatürde farklı denetim stratejileri geliştirilmiştir. Oransal-integral (PI), oransal-integral-türev (PID), model öngörülü kontrol (MPC),

kayan kip kontrol (SMC) gibi birçok yöntem, mikroşebekelerin izole modda frekans kararlılığını sağlamaya yönelik olarak yaygın biçimde uygulanmıştır [15-17]. Bu yöntemler, belirli işletme koşulları altında başarılı sonuçlar sunabilmekle birlikte; YEK'in belirsiz doğası, sistem parametrelerindeki değişkenlikler ve yük tarafındaki ani dalgalanmalar karşısında her zaman yeterli performansı garanti edememektedir. Özellikle doğrusal varsayımlara dayalı klasik kontrol yapıları, sistemdeki karmaşık ve doğrusal olmayan dinamiklere karşı sınırlı bir esneklik sunmaktadır. Bu da, sistem performansında kararsızlığa ve kontrol doğruluğunda zayıflamalara yol açabilmektedir.

Almihat ve Munda [18], mikroşebekelerde kullanılan geleneksel ve ileri düzey kontrol stratejilerini derledikleri çalışmalarında, PI, PID, MPC ve SMC gibi yöntemlerin avantajlarını ve sınırlılıklarını analiz etmişlerdir. Çalışma, özellikle doğrusal varsayımlara dayalı klasik kontrol yapıların, mikroşebekelerdeki karmaşık ve doğrusal olmayan dinamiklere karşı sınırlı esneklik sunduğunu ve bu nedenle daha adaptif ve akıllı kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamıştır.

Zhao ve arkadaşları [19], mikroşebekelerde klasik MPC ve bulanık mantık destekli MPC yapılarını karşılaştırdıkları çalışmalarında, özellikle doğrusal varsayımlara dayalı kontrol yaklaşımlarının sistemdeki belirsizlik ve değişkenlik karşısında yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. YEK'in kesintili yapısı ve yük tarafındaki ani değişimlerin sistem dinamiklerini öngörülemez hale getirdiği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, doğrusal olmayan yapılarla başa çıkabilen adaptif ve akıllı kontrol stratejilerinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Yüksek belirsizlik içeren sistemlerde klasik tek döngülü kontrol stratejileri genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, kaskat kontrol yapıları, dış döngüde sistemin genel davranışını düzenleyen bir kontrolör ile iç döngüde daha hızlı yanıt gerektiren alt sistemleri yöneten bir kontrolörün ardışık olarak yapılandırılmasıyla daha esnek ve katmanlı bir kontrol imkânı sunmaktadır. Bu yapı sayesinde, sistemin hem kısa vadeli dinamik yanıtları hem de uzun vadeli kararlılığı eş zamanlı olarak iyileştirilebilmektedir. Özellikle mikroşebekelerde, üretim kaynaklarının ve yüklerin farklı tepki sürelerine sahip olması, kaskat mimariyi oldukça uygun bir kontrol yaklaşımı haline getirmektedir.

Bu çerçevede, Daraz [20], denizcilik mikroşebekelerinde frekans kararlılığını artırmak amacıyla optimize edilmiş bir kaskat kontrol yapısı geliştirmişlerdir. Çalışmada, PI ve PD kontrolörlerin ardışık olarak yapılandırıldığı bir kaskat kontrol stratejisi önerilmiş ve bu yapının, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla daha iyi dinamik performans ve kararlılık sağladığı belirtilmiştir.

Oshnoei ve arkadaşları [21], izole mikroşebekelerde yüksek YEK penetrasyonu altında frekans regülasyonunu iyileştirmek amacıyla kesirli dereceli kaskat bir kontrolör önermişlerdir. Bu kontrol yapısı, kesir dereceli (fractional-order) oransal-integral kontrolör (FOPI) ile kesirli dereceli eğimli-türev kontrolörün (FOTD) ardışık olarak yapılandırılmasından oluşmaktadır. Böylece,

sistemin hem kısa vadeli dinamik yanıtları hem de uzun vadeli kararlılığı eş zamanlı olarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, kontrolör parametreleri böbrek ilhamlı sezgisel bir algoritma ile optimize edilmiş ve önerilen yapının, geleneksel kontrolörlere kıyasla daha üstün frekans yanıtı sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen kontrol yapısının sistem parametrelerindeki değişkenlikler ve yük tarafındaki ani dalgalanmalar karşısında daha esnek ve katmanlı bir kontrol imkânı sunduğu vurgulanmıştır.

Benzer şekilde, Nayak ve arkadaşları [22], çoklu mikroşebeke sistemlerinde YFK için PD ve 1+PI kontrolörlerin kaskat yapıda birleştirildiği bir kontrol stratejisi önermişlerdir. Çalışmada, önerilen kontrol yapısının, geleneksel PI ve PID kontrolörlerine göre daha iyi frekans kararlılığı ve daha hızlı yanıt süresi sağladığı ifade edilmiştir.

Ayrıca, Gupta ve arkadaşları [23], birbirine bağlı mikroşebekelerde frekans regülasyonu için öğrenci psikolojisi tabanlı optimizasyon yöntemiyle ayarlanmış bir kaskat kontrol yapısı geliştirmişlerdir. Çalışmada, önerilen kontrol stratejisinin, sistemin genel davranışını düzenleyen bir dış döngü kontrolörü ile alt sistemleri yöneten bir iç döngü kontrolöründen oluştuğu ve bu yapının, yük değişimleri ve YEK'in belirsizlikleri karşısında sistem kararlılığını artırdığı belirtilmiştir.

Mikroşebekelerin YFK sınırlamaların aşılmasına yönelik olarak, son yıllarda kesir dereceli kontrol stratejileri önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kesir dereceli PI (FOPI) ve kesir dereceli PD (FOPD) gibi denetleyiciler, kontrolör kazançlarının yalnızca genlik değil aynı zamanda faz düzeyinde de esneklik sunması sayesinde, özellikle doğrusal olmayan ve belirsizlik içeren sistemlerde daha kararlı ve hassas frekans tepkileri sağlamaktadır [21,24].

Bu çerçevede, Murugesan ve arkadaşları [25], tek ve çift bölgeli AC mikroşebeke sistemlerinde YFK için kesir dereceli PIλDμ (FOPID) kontrolörü önermişlerdir. Çalışmada, FOPID kontrolörünün geleneksel PID kontrolörlerine kıyasla daha düşük frekans sapması ve daha hızlı dengeleme süresi sağladığı belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Sahoo ve arkadaşları [26], izole modda çalışan mikroşebekelerde frekans kararlılığını artırmak amacıyla, tip-2 bulanık kesir dereceli PD-PI (T2FFOPDPI) kontrolörünü önererek, bu yapının geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla daha iyi performans ve kararlılık sağladığını belirtmişlerdir.

Ayrıca, Mishra ve arkadaşları [27], gemi mikroşebekelerinde frekans kararlılığını artırmak amacıyla, zamanla değişen türevli kesir dereceli PID (TVD-FOPID) kontrolörünü geliştirmişlerdir. Çalışmada, önerilen kontrol yapısının, geleneksel PID ve FOPID kontrolörlerine kıyasla daha düşük frekans sapması ve daha hızlı dengeleme süresi sağladığı belirtilmiştir.

Sistem belirsizlikleri ve büyük yük değişimleri gibi dinamik koşullar altında kontrolörün sabit kazançlarla çalışması, performansın her durumda yeterli olmasını engelleyebilmektedir. Bu nedenle, kontrolör kazançlarının adaptif olarak ayarlanması veya giriş sinyallerinin gerçek zamanlı

olarak yeniden ölçeklendirilmesi ve sistem durumuna göre uyarlanması gerekmektedir. Bu ihtiyaca cevap verebilmek amacıyla, klasik kontrol yapılarına bulanık mantık tabanlı uyarlayıcı kontrol mekanizmaları entegre edilmektedir.

Liang ve arkadaşları [28], mikroşebekelerdeki frekans dalgalanmalarını azaltmak amacıyla geliştirdikleri geliştirilmiş bulanık uyarlayıcı sönümleme tabanlı sanal senkron generatör (VSG) kontrol stratejisinde, tip-1 bulanık mantık sistemini kullanmışlardır. Bu yaklaşım, sistemin dinamik yanıtını ve frekans kararlılığını eş zamanlı olarak iyileştirmeyi hedeflemiştir. Benzetim sonuçları, önerilen kontrol yapısının geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergilediğini göstermektedir.

Begum ve arkadaşları [29], üç bölgeli güç sisteminde frekans kararlılığını sağlamak amacıyla tip-1 bulanık mantık destekli kayma kipli bir kontrol yapısı (FSMC) geliştirmişlerdir. Bu kontrol yapısı, güneş ve rüzgar gibi dağıtık üretim kaynaklarının neden olduğu parametre belirsizlikleri ve ani yük değişimleri gibi durumlara karşı sistemin dinamik yanıtını güçlendirmeyi hedeflemiştir. Gannet Optimizasyon Algoritması (GOA) ile ayarlanan kontrolör kazançları sayesinde FSMC yapısı, SMC ve FPID kontrolörlerine kıyasla daha üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca OPAL-RT platformunda yapılan gerçek zamanlı doğrulama sonuçlarıyla FSMC kontrolörün, mikroşebekeler gibi yüksek belirsizlik içeren sistemlerde kullanılmaya uygun ve etkili bir kontrolör olduğu ortaya konmuştu.

Khadanga ve arkadaşları [30], mikroşebekelerdeki siber güvenlik saldırılarının frekans kararlılığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, tip-1 bulanık mantık tabanlı uyarlayıcı bir PID kontrolörü (AFPID) geliştirmişlerdir. Bu kontrol yapısı, sanal atalet kontrolü aracılığıyla sistemin kararlılığını artırmayı ve siber saldırıların neden olduğu istenmeyen frekans ölçüm etkilerini azaltmayı hedeflemiştir. Çalışmada, kontrolör parametrelerinin optimize edilmesi için modifiye edilmiş yapay ekosistem tabanlı bir optimizasyon tekniği (mAEO) kullanılmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen AFPID kontrolörünün, geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergilediğini göstermektedir.

Bu tür yaklaşımlar, sistem davranışını daha geniş çalışma aralıklarında modellemeye imkân tanırken, kontrolör kazançlarını doğrudan değiştirmeden daha esnek bir yanıt üretimine olanak tanımaktadır. Özellikle aralık Tip-2 bulanık mantık (Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller - IT2FLC) yapıları; belirsizlik seviyesi yüksek olan sistemlerde, tip-1 bulanık mantık yapılarından daha başarılı sonuçlar vermektedir [31-34]. Bu yapıların çift girişli olarak tasarlanması ve çeşitli kontrol yapılarıyla kaskat biçimde entegre edilmesi, mikroşebekelerin frekans kararlılığı açısından oldukça güçlü bir kontrol mimarisi ortaya koyabilir.

Rawat ve arkadaşları [35], YEK'in entegrasyonu ile oluşan belirsizliklerin etkisini azaltmak amacıyla, IT2FL tabanlı çift modlu kazanç ayarlamalı (Dual-Mode Gain Scheduling - DMGS) bir PI kontrolörü önermişlerdir. Çalışmada, önerilen kontrol yapısının, geleneksel PI ve

Tip-1 bulanık PI kontrolörlerine kıyasla daha düşük frekans sapması, daha hızlı sönümleme süresi ile kararlılığı arttırdığı belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Aljohani [36], elektrikli araçların entegrasyonu ile artan sistem belirsizliklerini yönetmek amacıyla, akıllı bir IT2FLC önermiştir. Çalışmada, IT2FLC'nin, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla daha iyi enerji yönetimi, daha düşük işletme maliyetleri ve daha yüksek sistem kararlılığı sağladığı ifade edilmiştir.

Ayrıca, Khooban ve Gheisarnejad [37], mikroşebekelerde frekans kararlılığını artırmak amacıyla, derin pekiştirmeli öğrenme (Deep Reinforcement Learning) tabanlı bir Tip-2 bulanık mantık kontrolörü geliştirmişlerdir. Çalışmada, önerilen kontrol yapısının, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla daha düşük frekans sapmalarını daha iyi sönümlediği belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, mikroşebeke sistemlerinde frekans salınımlarının bastırılması ve sistem kararlılığının artırılmasına yönelik olarak yüksek uyarlanabilirliğe sahip dört farklı kaskat kontrolör tasarlanmıştır. Geliştirilen tüm yapılar, çift giriş aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörü (DIT2FLC) ile desteklenmiş olup, kontrolör giriş sinyallerinin belirsizlik altında daha esnek şekilde ölçeklendirilmesini ve yüksek doğrulukta kontrol çıktısı elde edilmesini amaçlamaktadır. Tasarlanan kontrolör yapıları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

- C-DIT2-FLC: Klasik PI ve PD kontrolörlerinin DIT2FLC yapısıyla desteklenerek kaskat bağlandığı temel yapı.
- DIT2-FOPI+TID: Kesir dereceli PI kontrolörünün eğimli intgral türev (TID) kontrolörü ile ardışık yapılandırıldığı, DIT2FLC ile giriş sinyallerinin yeniden ölçeklendirildiği yapı.
- DIT2FLC-FOTID: DIT2FLC destekli, kesir dereceli eğimli-integral-türev (FOTID) kontrol yapısı.
- DIT2FLC-FOPI+FOPD: Hem PI hem de PD kontrolörlerinin kesirli dereceli biçimde modellenerek DIT2FLC ile birlikte kaskat yapılandırıldığı gelişmiş kontrol stratejisi.

Güç sistemi kalitesi ve güvenilirliğine yönelik artan beklentiler ile enerji piyasasındaki kısıtların ve kontrol sistemlerinin yüksek işletme maliyetlerinin oluşturduğu baskı, araştırmacıları olağan dışı koşullar altında sistem frekansını korumaya yönelik alternatif stratejiler geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu bağlamda, talep tarafı katılımı (Demand Response – DR), özellikle otomatik üretim kontrolü (AGC) süreçleriyle entegre edildiğinde, mikroşebeke sistemlerinin frekans kararlılığını destekleyen etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Tüketici yüklerinin geçici olarak azaltılması veya ertelenmesi yoluyla uygulanan DR mekanizmaları, sistemde oluşan frekans sapmalarının hızlı ve etkili biçimde bastırılmasına katkı sunmaktadır. Bu yapıların AGC döngüsüne entegre edilmesiyle birlikte, esnek yükler frekans kontrol sürecine aktif olarak dahil edilmekte ve sistemin kararlılığı güçlendirilmektedir [38-40]. Bu doğrultuda, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen DIT2-FOPI+TID kontrolör ile otomatik üretim süreci yönetilen iki bölgeli bir

mikroşebekenin optimum frekans tepkisini elde etmeye yardımcı olan yenilikçi bir talep tarafı yönetim mekanizması (DRM) önerilmektedir.

Ayrıca mikroşebekelerin giderek daha karmaşık ve sayısal tabanlı hale gelmesi, bu sistemleri çeşitli siber saldırı türlerine karşı savunmasız bırakmaktadır. Özellikle YFK gibi zaman duyarlı ve kararlılık açısından kritik öneme sahip kontrol katmanları, sahte veri enjeksiyonu (False Data Injection – FDI) ve hizmet reddi (Denial-of-Service – DoS) gibi saldırılar altında ciddi performans kayıplarına uğrayabilmektedir. Bu tür saldırılar, kontrol sinyallerinin bozulmasına, sensör verilerinin yanlış iletilmesine veya veri iletişiminin kesintiye uğramasına neden olarak sistem kararlılığını doğrudan tehdit etmektedir. Bu doğrultuda, yalnızca normal işletme koşulları altında değil, aynı zamanda siber saldırı senaryoları altında da etkinliğini sürdürebilecek YFK stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır [41, 44]. Bu tez çalışması kapsamında, tek bölgeli mikroşebeke yapısı için önerilen DIT2FLC-FOTID kontrolörün, FDI ve DoS gibi siber saldırılar karşısındaki dayanıklılığı ele alınmaktadır.

Diğer yandan, kontrolör tasarımı ve test süreçlerinde yaygın olarak kullanılan MATLAB/Simulink gibi sayısal platformlar, sürekli zamanlı sistemleri ayrık zamanlı olarak benzetmekte ve bu durum, teorik kararlılıkla sayısal kararlılık arasında farklılıklara neden olabilmektedir. Özellikle düşük atalet momentine sahip mikroşebeke sistemlerinde, örnekleme zamanı gibi parametrelerin kararlılık üzerindeki etkileri dikkate alındığında, geliştirilen kontrol yapılarının ayrık zamanlı temsilleri üzerinden de değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda tezde, sistemin ayrık zamanlı modellenmesiyle birlikte örnekleme süresinin kararlılığa etkisi incelenmiş ve bu analizler, sayısal uygulamaların güvenilirliğini artırmaya yönelik bir temel olarak kullanılmıştır. Ayrıca, yalnızca sayısal benzetim ortamlarıyla sınırlı kalmadan, önerilen kontrol yapılarından biri donanım tabanlı bir gerçek zamanlı simülasyon platformuna entegre edilerek, kontrol stratejilerinin fiziksel sistem koşullarına daha yakın senaryolarda da test edilebilmesine imkân tanınmıştır. Bu doğrultuda, sürekli zamanlı sistemlerin sayısal ortamlarda doğru biçimde temsil edilmesi ve örnekleme süresi gibi etkenlerin sistem davranışı üzerindeki etkileri çerçevesinde, gerçek zamanlı benzetim sistemlerinin kullanım gerekliliği tez kapsamında ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, izole modda çalışan mikroşebeke sistemlerinde frekans kararlılığını artırmak ve frekans salınımlarını bastırmak amacıyla, çok katmanlı ve yüksek uyarlanabilirliğe sahip yenilikçi kontrol stratejileri geliştirmektir. Geliştirilen kontrol yapılarının her biri, literatürde yakın zamanda önerilen kontrol stratejileriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilip; YFK performansları farklı mikroşebeke konfigürasyonları ve çalışma senaryoları kapsamında test edilmektedir. Bu kapsamda tasarlanmış her bir yapı, senaryo bazlı yük değişimleri ile gerçek yenilenebilir enerji verileri dikkate alınarak performans açısından değerlendirilmiştir. Kontrolör kazançlarının optimizasyonu için Geliştirilmiş Salp Sürüsü Algoritması (Improved Salp

Swarm Algorithm – ISSA) [45] ve Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması (Circle-Inspired Optimization Algorithm – CIOA) [46] gibi güçlü meta-sezgisel yöntemler tercih edilmiştir. Ayrıca, tasarlanan yapılardan biri olan DIT2FLC-FOPI+TID kontrolörü, FDI ve DoS gibi siber saldırı senaryoları altında test edilerek, önerilen yöntemin dayanıklılığı analiz edilmiştir. Bu tez çalışması ile mikroşebeke sistemlerinde sürdürülebilir, güvenilir ve esnek bir YFK performansı elde edilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışması; giriş, sonuçlar ve kaynakça dışında toplam dört ana bölümden oluşmaktadır. 2. YFK kavramına odaklanmaktadır. Bu kapsamda; frekans sapmalarının sistem güvenliği ve kararlılığı üzerindeki etkileri açıklanmakta, YFK yapısı birincil, ikincil, tersiyer kontrol ve talep yönetimi gibi kontrol katmanlarıyla birlikte ele alınmaktadır. 3. Bölüm, mikroşebeke sistemleri hakkında genel bilgilendirmesini ve modellemesini kapsamaktadır. Mikroşebekeyi oluşturan birimlerin doğrusal modelleri tanıtılmıştır. 4. Bölüm, YFK kapsamında güç sistemlerinde frekans kararlılığının sağlanmasına yönelik kontrolör yapılarını içermektedir. Bu bölümde, kontrolör stratejilerinin oluşturulması sürecinde kullanılan, klasik PI/PID gibi yapılarının yanı sıra, kesir dereceli kontrolörler, bulanık mantık tabanlı kontrol yapıları tanıtılmaktadır. 5. Bölüm, bu tez kapsamında önerilen kontrolör stratejilerinin geliştirildiği, analiz edildiği ve karşılaştırıldığı uygulama bölümüdür. Dört farklı kontrol stratejisi farklı mikroşebeke yapıları için analiz edilmiştir. Bu kontrolörlerin kazanç parametreleri, ISSA ve CIOA ile optimize edilmiştir. Bölüm kapsamında ayrıca, önerilen yapılardan biri olan DIT2FLC-FOPI+TID kontrolörünün FDI ve DoS saldırıları altındaki performansı analiz edilmiştir. Farklı senaryolar altında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile, hem kontrolör performansları hem de önerilen yenilikçi DRM'nin sistem frekans kararlılığına etkisi kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Ayrıca DIT2FLC-FOPI+FOPD kontrolörün performansı gerçek zamanlı simülatör ile doğrulanmıştır. 6. Bölüm, çalışmadan elde edilen temel sonuçların değerlendirildiği ve gelecek çalışmalara yönelik önerilerin sunulduğu bölümdür. Bu kapsamda, geliştirilen kontrol yapılarının mikroşebekelerdeki uygulanabilirliği, etkinliği ve sunduğu katkılar bütüncül bir bakış açısıyla tartışılmıştır.

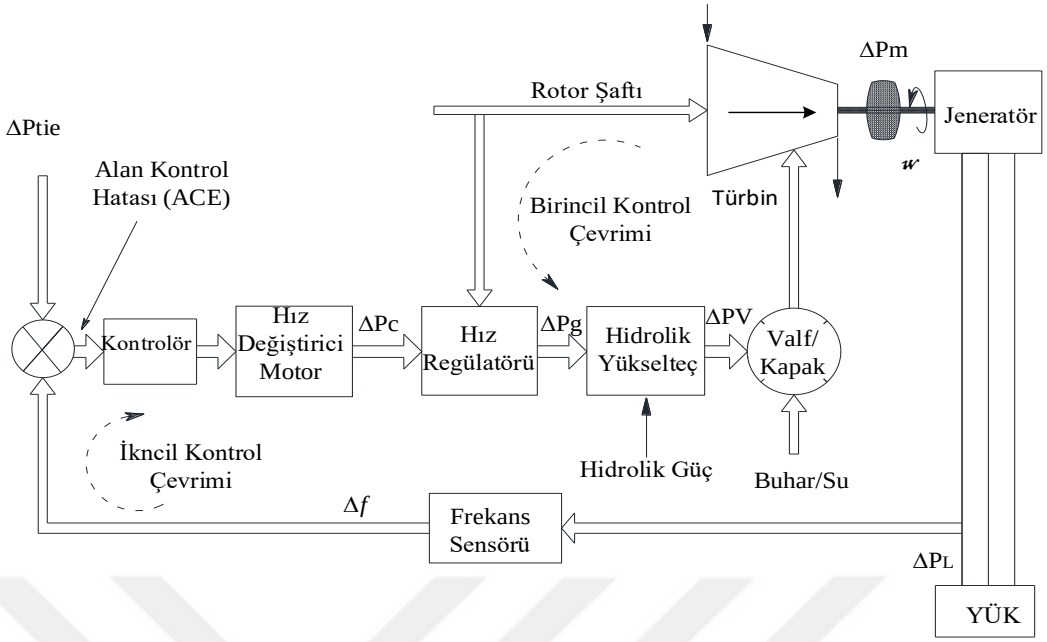
2. YÜK FREKANS KONTROLÜ

Elektrik enerjisinin üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sürekli olarak sağlanması, güç sistemlerinin güvenli, kararlı ve kaliteli işletilmesinin temelini oluşturmaktadır. Bu dengenin korunmasında sistem frekansının nominal değer (örneğin 50 Hz) çevresinde sabit tutulması büyük önem arz etmektedir. Frekans, elektriksel sistemlerin anlık güç dengesini yansıtan temel bir parametre olup, üretim ile tüketim arasında meydana gelen herhangi bir dengesizlik doğrudan frekans sapmaları olarak ortaya çıkar. Tüketimin üretimi aşması durumunda sistem frekansı düşerken, üretimin fazla olması halinde ise frekans yükselmektedir. Bu sapmaların mümkün olan en kısa sürede bastırılması ve sistemin nominal frekans değerine geri döndürülmesi, güç sistemlerinin kararlılığı açısından kritik bir kontrol problemidir.

Bu doğrultuda geliştirilen YFK mekanizması, sistemin aktif güç dengesini otomatik olarak sağlayan temel bir kontrol süreci olarak tanımlanmaktadır. YFK'nın temel amacı; sistem frekansını belirli tolerans aralığında sabit tutmak, alanlar arası güç alışverişini nominal düzeyde dengelemek ve üretim kaynaklarının koordineli şekilde çalışmasını temin etmektir. Özellikle ataletin düşük, yenilenebilir üretimin yüksek olduğu mikroşebeke sistemlerinde YFK, sistem kararlılığı ve sürekliliğinin sağlanması açısından daha da kritik bir hal almaktadır.

YFK yalnızca frekans düzenlemesiyle sınırlı olmayıp, bölgeler arası senkronizasyon, yük paylaşımı, DR ve YEK'in entegrasyonu gibi çok sayıda sistemsel işlevin eş zamanlı olarak yürütülmesini de kapsamaktadır. Bu bağlamda, mikroşebekelere yönelik geliştirilecek kontrol yapılarının çok bölgeli işletim koşullarını desteklemesi, hızlı frekans geri kazanımı sağlaması ve sistemsel belirsizlikler altında kararlı bir performans sergilemesi gerekmektedir.

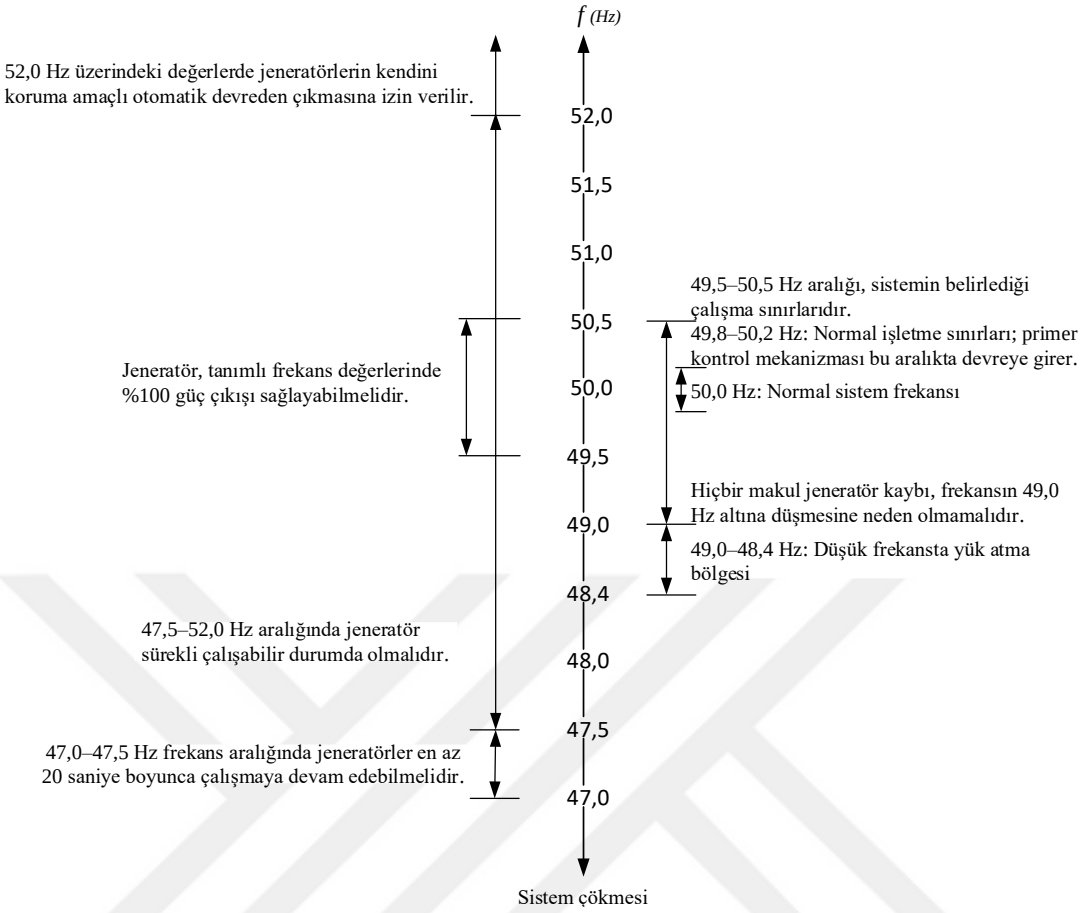
Güç sistemleri genel olarak, farklı üretici ve tüketici gruplarını temsil eden, bağlantı hatlarıyla birbirine entegre edilmiş birden fazla alandan oluşmaktadır. Bu alanlar arasında yük dengelemesi, aktif güç transferi ile sağlanmakta olup, alanlar arası koordinasyonun etkin bir şekilde yürütülebilmesi için frekans ve güç akışının senkronize biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. YFK yapısına ilişkin temel bir blok diyagram Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. YFK çevrimleri

Elektrik güç sistemlerinde yük YFK, genel olarak üç temel kontrol çevrimi ile yürütülmektedir: primer, sekonder ve tersiyer kontrol. Bu kontrol çevrimleri, frekans değişimlerine karşı farklı zaman ölçeklerinde yanıt vererek sistemin kararlı çalışma koşullarına geri döndürülmesini hedeflemektedir [47–49].

Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri Birliği (ENTSO-E) tarafından tanımlanan frekans tolerans kriterleri, iletim sistemlerinin güvenilir ve kararlı biçimde işletilebilmesini sağlamak amacıyla minimum ve maksimum izin verilen frekans sınırlarını teknik olarak ortaya koymaktadır. Şekil 2.2'de, ENTSO-E referanslarına dayalı olarak Avrupa iletim sistemine ait temel frekans işletme sınırları sunulmaktadır [50]. Bu sınırlar; normal işletme, senkronizasyon, yük atma bölgeleri ve koruyucu önlemlerin devreye girdiği kritik frekans eşiklerini içermektedir.

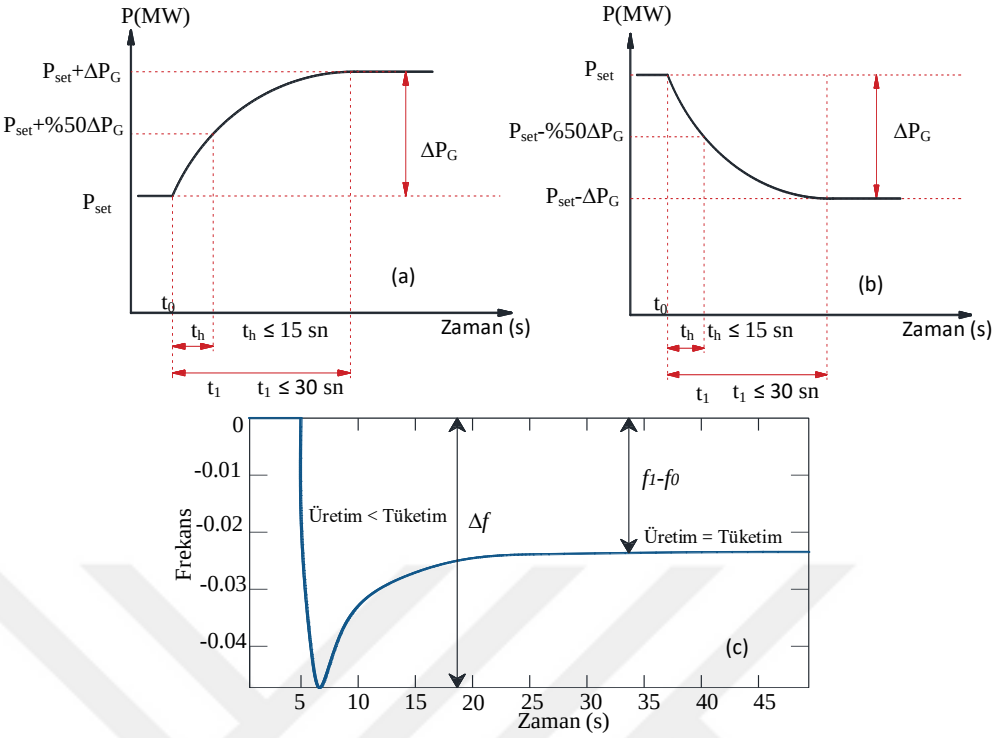


Şekil 2.2. Temel frekans eşikleri ve işletme sınırları

2.1. Primer Kontrol

Elektrik güç sistemlerinde ani yük değişimlerine karşı en hızlı tepki veren kontrol düzeyi olan Primer kontrol, sistem frekansının nominal değerden sapmasını sınırlamak amacıyla devreye giren ilk kontrol çevrimidir. Frekans, üretim ve tüketim dengesini yansıtan kritik bir parametre olduğundan, bu dengenin bozulması sistem kararlılığını doğrudan etkiler. Primer kontrol mekanizması, generatörlerin hız regülatörleri (governor) aracılığıyla çalışmakta; yük artışı gibi durumlarda üretimi artırarak, yük azalması halinde ise üretimi azaltarak frekansın aşırı sapmasını engellemektedir [51].

Bu kontrol düzeyi, milisaniyeler ile birkaç saniye arasında tepki süresi göstererek frekansın aşırı düşüş veya yükselişini sınırlamakta; böylece sistemin kararsız hale gelmesini önlemektedir. Ancak, frekansın tekrar nominal değere getirilmesi primer kontrolün görev alanı dışında kalmakta ve bu işlev sekonder kontrol tarafından yürütülmektedir. Şekil 2.3-a'da, frekans düşüşüne karşı primer kontrol tepkisiyle generatör çıkış gücünde meydana gelen artış, Şekil 2.3-b'de ise frekans artışı durumunda üretimdeki düşüş gösterilmektedir. Süreç sonunda ulaşılan kararlı ancak hatalı frekans seviyesi ise Şekil 2.3-c'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Sistem frekans düşümünde çıkış gücü değişimi (b) Sistem frekans artmasında çıkış gücü değişimi (c) Primer kontrol sonucunda sistem frekansında meydana gelen sürekli hata

Primer kontrolün temel özellikleri ve sınırları aşağıda özetlenmiştir:

- Tepki Süresi: Primer kontrol, frekans değişimlerine en hızlı yanıt veren kontrol katmanıdır ve tipik olarak birkaç saniyelik sürede devreye girer.
- Müdahale Eşiği: Frekans sapmasının normal işletme sınırları içerisinde tutmak için otomatik olarak devreye girer. ENTSO-E gibi kuruluşların belirlediği standartlarla uyumlu çalışır.
- Yerel İşletim: Primer kontrol, generatör bazında çalışır ve merkezi bir koordinasyon mekanizması içermez. Bu nedenle, tüm sistemin frekansını nominal değere geri getirebilme kapasitesine sahip değildir.
- Yenilenebilir Kaynaklarla Uyum: Konvansiyonel santrallerde etkin şekilde çalışan hız regülatörleri, YEK'in düşük ataletli ve değişken karakteri nedeniyle bu kaynaklarla entegrasyonda sınırlamalar gösterebilir. Bu durumda, daha gelişmiş kontrol yapıları gereklidir.

2.2. Sekonder Kontrol

Sekonder kontrol, primer kontrolün ardından devreye girerek, frekans sapmalarını uzun vadede gideren ve sistemin nominal frekansa dönmesini sağlayan merkezi bir kontrol çevrimidir. Primer kontrol, frekans dalgalanmalarına hızlı ancak geçici bir yanıt verirken; sekonder kontrol

kalıcı hataları düzeltir ve sistemin sürdürülebilir kararlılığını temin eder. Bu mekanizma, genellikle AGC ve SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri ile entegre çalışır. Geniş ölçekli sistemlerde generatörler ve üretim santralleri arasında koordinasyon sağlayarak bölgesel güç akışlarını dengeler [47].

Enterkonnekte sistemlerde, sekonder kontrol yalnızca yerel frekans istikrarını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda komşu sistemlere frekans sapmalarının yayılmasını engelleyerek genel şebeke senkronizasyonunu da destekler. Bu süreç, Alan Kontrol Hatası (Area Control Error – ACE) üzerinden yürütülür. ACE, kontrol bölgesinde oluşan frekans sapması ile bağlantı hatlarındaki güç değişimlerini esas alarak merkezi denetleyiciye geri bildirim sağlar. AGC yapısı, bu hata sinyaline göre üretim birimlerinin çıkış gücünü düzenleyerek sistem frekansını nominal değere geri döndürür. Sekonder kontrol; generatör çıkış güçlerini senkron biçimde ayarlayarak hem yük paylaşımını optimize eder hem de sistemin genel verimliliğini artırır. Ayrıca, üretim maliyetlerini minimize edecek şekilde yük dağılımı sağlar ve enerji santrallerinin optimum seviyede çalışmasına katkıda bulunur [52].

Sekonder kontrol düzeyinde uygulanan dengeleme mekanizması, sistemin zamana bağlı dinamik davranışını göz önünde bulundurarak üretim birimlerinin aktif güç referanslarını sürekli olarak güncellemeye dayanır. Bu süreçte, kontrol bölgelerinin taşıdığı yükler, senkron jeneratörlerin ayarlanabilir parametreleri üzerinden yeniden dağıtılır. Özellikle, kontrol algoritmaları zamanla değişen ACE sinyalini kullanarak her bir bölge için hedeflenen net değişim değerini hesaplar ve generatörlere iletilen komut sinyallerini buna göre şekillendirir. Bu süreçte kullanılan kontrol stratejileri, sistemin kararlılığı, tepki süresi ve yük paylaşım doğruluğu üzerinde doğrudan belirleyici olup; klasik PID yapılarından, adaptif yaklaşımlara kadar çeşitli biçimlerde tasarlanabilmektedir. Sekonder kontrolün, sistem kararlılığına katkısı büyük olmakla birlikte bazı sınırlamaları da bulunmaktadır:

- Tepki süresinin uzun olması nedeniyle ani yük değişikliklerine karşı yeterince hızlı müdahale edemez.
- Bölgesel dengeyi sağlama konusunda, büyük ölçekli güç kayıpları yaşandığında sekonder kontrol yetersiz kalabilir; bu durumda tersiyer kontrol mekanizması devreye alınarak üretim planlamasına ek olarak talep tarafı yönetim stratejileri uygulanmalıdır.
- Güneş ve rüzgar gibi kesintili YEK'in doğrudan kontrol çevrimlerine entegre edilmesi zordur. Bu kaynaklar, üretimlerinin tahmin edilebilirliğinin sınırlı olması nedeniyle sekonder kontrol döngüsünde doğrudan yük-frekans regülasyonuna katkı sağlayamaz; bu durum, kontrol stratejilerinin etkinliğini azaltmakta ve daha esnek kontrol yapılarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- YEK'in değişken doğası, frekans regülasyonunu daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir tabanlı sistemlerde sekonder kontrolün, belirsizlikleri yönetebilen

bulanık mantık tabanlı ve kesir dereceli kontrolörler gibi esnek ve uyarlanabilir yapılarla desteklenmesi gerekmektedir.

2.3. Tersiyer Kontrol

Tersiyer kontrol, enerji üretim sistemlerinde uzun vadeli arz-talep dengesinin sağlanması ve ekonomik yük paylaşımının optimize edilmesi amacıyla yürütülen üst seviye bir kontrol sürecidir. Birincil ve sekonder kontrol mekanizmaları, ani frekans sapmalarına karşı hızlı ve geçici çözümler sunarken; tersiyer kontrol, enerji üretiminin planlamasına ve ekonomik verimliliğin artırılmasına odaklanır. Bu kapsamda, generatörler arası yük dağılımı düzenlenir, üretim planları güncellenir ve sistemin en uygun işletme koşullarında çalışması sağlanır. Elektrik güç sistemlerinde tersiyer kontrol, genellikle saatlik veya günlük üretim planlamaları üzerinden yürütülür. Enerji arz ve talebine ilişkin öngörüler doğrultusunda üretim kaynaklarının devreye alınma sıralaması belirlenir ve iletim sistem operatörleri tarafından merkezi olarak koordine edilir [53].

YEK'in şebekeye artan oranlarda entegre edilmesiyle birlikte, enerji üretim profili daha değişken ve öngörülemez hale gelmiştir. Bu nedenle, tersiyer kontrol mekanizmalarının daha esnek ve tahmine dayalı yapılarla desteklenmesi bir gereklilik halini almıştır. Fotovoltaik (PV)ve rüzgar gibi hava koşullarına bağlı kaynaklardan sağlanan üretimin neden olduğu belirsizliklerin yönetilmesinde, gelişmiş sezgisel algoritmalara dayalı kontrol stratejileri önemli avantajlar sunmaktadır [54].

Tersiyer kontrol, yalnızca arz tarafını dengelemekle kalmayıp, aynı zamanda talep tarafı yönetimi stratejileri ile birlikte çalışarak, arz yetersizliklerine karşı sistem dengesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle izole mikroşebeke uygulamalarında, üretim kısıtlarının olduğu durumlarda esnek yüklerin devre dışı bırakılması veya enerji talebinin geçici olarak azaltılması, sistem frekansının kararlı düzeyde tutulmasını kolaylaştırmaktadır. Bu yönüyle, tersiyer kontrol mekanizması, enerji yönetiminde sadece üretim odaklı değil, bütüncül bir dengeleme yaklaşımının da temel bileşeni haline gelmiştir [55].

2.4. Talep Tarafı Yönetimi

YFK yalnızca üretim tarafına yönelik düzenlemelerle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda tüketim tarafında sağlanabilecek esnekliklerin aktif biçimde değerlendirilmesini de içermektedir. Bu kapsamda ele alınan talep yönetimi yaklaşımları, sistemin arz-talep dengesini koruma kabiliyetini güçlendirerek, frekans regülasyon süreçlerinde tamamlayıcı bir rol üstlenebilir. Elektrik talebinin zamansal ve büyüklük olarak esnek hale getirilmesi, hem sistem frekansının daha etkin kontrolünü mümkün kılar hem de kontrol stratejilerinin daha düşük maliyetli ve çevre dostu yöntemlerle uygulanmasına katkı sunar. Talep yönetimi, tüketicilerin enerji kullanım

alışkanlıklarını sistem ihtiyaçlarına uyumlu şekilde yeniden yapılandırmalarını esas alır. Bu doğrultuda, belirli zaman aralıklarında esnek yüklerin kısa süreli olarak devre dışı bırakılması, azaltılması ya da ertelenmesi gibi uygulamalar aracılığıyla sistem üzerindeki yük geçici olarak hafifletilmekte ve böylece frekans sapmalarının önlenmesine yönelik dengeleyici bir etki sağlanmaktadır.

Elektrik sistemlerinde talep yönetimi uygulamaları, genellikle fiyat sinyallerine dayalı tüketici davranışları ya da doğrudan kontrol mekanizmaları üzerinden yürütülmektedir. Fiyat temelli yaklaşımlarda, kullanıcılar anlık veya tarifeli fiyat değişimlerine göre gönüllü olarak tüketimlerini ayarlamakta; teşvik temelli uygulamalarda ise tüketicilere yük azaltımı karşılığında ekonomik avantajlar sunulmaktadır. Her iki yöntemde de amaç, sistemin anlık enerji ihtiyaçlarını karşılayacak biçimde tüketici davranışlarını yönlendirerek arz-talep dengesini korumaktır.

İzole modda işletilen mikroşebeke sistemleri bağlamında değerlendirildiğinde, talep tarafı yönetimi uygulamaları; üretim tarafındaki esnekliklerin sınırlı olduğu koşullarda frekans regülasyon performansını artırabilecek etkili bir tamamlayıcı kontrol stratejisi olarak öne çıkmaktadır [56]. Esnek yüklerin devreye girme süresinin geleneksel generatörlere kıyasla oldukça kısa olması, ani yük değişimlerine karşı sistemin kararlılığını desteklemekte ve frekans sapmalarını bastırma sürecini hızlandırmaktadır. Bu durum, düşük ataletli ve yenilenebilir enerji yoğunluklu mikroşebeke yapılarında talep yönetimini daha da önemli kılmaktadır.

Özellikle güneş ve rüzgar gibi hava koşullarına bağlı üretim kaynaklarının dalgalı yapısı, sistemin üretim tarafında yeterli esnekliğin her zaman sağlanamamasına neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda talep tarafındaki esnekliklerin devreye alınması, sistem frekansının istenilen sınırlar içinde tutulmasını sağlayarak, mikroşebekelerdeki kontrolör performansını desteklemektedir. Bu nedenle, talep yönetimi yalnızca tüketimi şekillendiren bir araç değil, aynı zamanda YFK'üne entegre edilmiş tamamlayıcı bir dengeleme mekanizması olarak değerlendirilmektedir [57-59].

3. MİKROŞEBEKELER

Mikroşebekeler hem ekonomik hem teknik hem de çevresel ve sosyal açıdan büyük avantajlar sunmaktadır. YEK'in entegrasyonu, akıllı enerji yönetimi ve gelişmiş depolama çözümleri ile desteklenen mikroşebekeler, enerji sektörünün geleceğini şekillendiren en önemli teknolojilerden biridir. Mikroşebekeler, kendi içinde bağımsız olarak çalışabilen küçük ölçekli enerji ağlarıdır ve merkezi şebekeye bağlı ya da bağımsız olarak faaliyet gösterebilirler. Geleneksel merkezi şebekelere bağımlılığı azaltarak, yerel enerji üretimini teşvik eden mikroşebekeler, özellikle YEK'in entegrasyonu sayesinde daha sürdürülebilir, güvenilir ve esnek enerji sistemleri oluşturulmasını sağlamaktadır. Merkezi şebekeye bağlı mikroşebekeler, enerji ihtiyacı fazla olduğunda ana şebekeden güç çekerken, fazla enerji üretildiğinde ise şebekeye enerji aktarabilir. Tamamen bağımsız çalışan mikroşebekeler ise izole bölgelerde, enerji altyapısının zayıf olduğu alanlarda, kritik yüklerin beslenmesinde veya afet sonrası enerji güvenliği sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Özellikle akıllı şebeke teknolojileri, nesnelerin interneti ve yapay zeka gibi yeni teknolojilerin mikroşebekelerle entegrasyonu sayesinde enerji yönetimi daha verimli hale getirilecek ve gelecekte daha temiz, daha ucuz ve daha güvenilir bir enerji altyapısı oluşturulacaktır.

Mikroşebekeler, enerji üretimi için çeşitli kaynakları bir arada kullanarak çoklu enerji kaynağı yönetimi sağlar. YEK arasında güneş panelleri, rüzgar türbinleri, biyokütle sistemleri ve küçük ölçekli hidroelektrik santralleri yer alırken, geleneksel enerji kaynakları olarak mikro türbinler, dizel generatörler veya biyogaz/biyodizel generatörleri kullanılabilir. Enerji depolama sistemleri de mikroşebekelerin en kritik bileşenlerinden biridir. Lityum-iyon bataryalar, süperkapasitörler ve hidrojen elektrolizörleri, üretilen enerjinin depolanmasını ve sistemin dengelenmesini sağlar. Mikroşebekelerde kontrol sistemleri kullanılarak talep yönetimi, arz optimizasyonu ve dolayısıyla şebeke kararlılığı sağlanmaktadır. Mikroşebekeler, özellikle nesnelerin interneti (IoT) ve yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri ile birleştiğinde, enerji arzını daha verimli hale getirebilir, enerji tüketimini ve şebeke frekansını optimize edebilir. Ancak, mikroşebekelerin etkin bir şekilde kontrol edilebilmesi için gelişmiş iletişim ağlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, sistemin siber güvenlik tehditlerine karşı açık hale gelmesine neden olmakta ve güvenli veri iletimi, erişim denetimi ve siber saldırılara karşı dayanıklılık gibi unsurların dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Mikroşebekelerin ekonomik faydaları da oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Öncelikli olarak yerel enerji üretimi sayesinde elektrik iletim kayıpları azaltılır ve uzun mesafeli enerji taşınmasına gerek kalmadan enerji tüketimi sağlanır. Bu durum, özellikle kırsal bölgeler, adalar ve büyük ölçekli endüstriyel tesisler için ciddi maliyet tasarrufları sağlar. YEK'in kullanımının artması ile birlikte mikroşebekeler, fosil yakıt maliyetlerinden bağımsız hale gelerek, enerji fiyat dalgalanmalarından etkilenmeden ekonomik istikrar sağlar. Ayrıca, fazla üretilen enerji

merkezi şebekeye satılarak gelir kaynağı oluşturulabilir ve sistemlerin hızlı amortisman süreleri sayesinde yatırım geri dönüş süreleri kısalabilir. Büyük ölçekli tesislerde mikroşebekeler sayesinde enerji tüketimi optimize edilerek elektrik faturalarında önemli ölçüde düşüş sağlanabilir. Ayrıca, mikroşebekeler enerji bağımsızlığını artırarak enerji güvenliğini sağlamakta ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Elektrik üretiminin yerel olarak yapılması, enerji arzının güvenilirliğini artırır ve dış kaynaklardan gelen riskleri minimize eder.

Teknik açıdan bakıldığında, mikroşebekeler geleneksel enerji şebekelerine kıyasla çok daha esnek ve güvenilir bir yapı sunar. Akıllı şebeke teknolojileri sayesinde enerji üretimi ve tüketimi sürekli olarak izlenebilir, sistem otomatik olarak talep değişimlerine yanıt verebilir ve optimum enerji yönetimi sağlanabilir. Bu da şebeke kararlılığını artırarak voltaj ve frekans dalgalanmalarını en aza indirir. Ayrıca, merkezi şebekede yaşanan kesintilere karşı mikroşebekeler ada modunda çalışarak kritik altyapıların sürekli enerji almasını garanti eder. Örneğin, hastaneler, veri merkezleri veya askeri tesisler gibi kesintisiz enerji ihtiyacı olan yerlerde mikroşebekeler büyük avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, talep yönetimi uygulamaları sayesinde mikroşebekeler enerji kullanımını dengeleyerek pik yüklerin azalmasına yardımcı olur ve böylece enerji tüketim maliyetlerini düşürür.

Mikroşebekelerin çevresel faydaları ise en az ekonomik ve teknik faydalar kadar önemlidir. Günümüz enerji sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması kritik bir konu haline gelmişken, mikroşebekeler YEK'in entegrasyonu ile fosil yakıtlara olan bağımlılığı büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu da karbon salınımının düşmesine ve hava kirliliğinin önlenmesine katkı sağlar. Geleneksel enerji üretim sistemlerinde ortaya çıkan sera gazı emisyonları, mikroşebekelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla ciddi oranda azalabilir. Örneğin, güneş ve rüzgar enerjisi gibi YEK'in mikroşebekelerde kullanılması, elektrik üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarını yıllık bazda %50-%70 oranında düşürebilir. Bunun yanı sıra, mikroşebekeler enerji depolama sistemleri ile desteklendiğinde, üretim ve tüketim arasındaki dengesizlikler minimize edilerek enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve kararlı bir sistemin oluşturulmasına olanak tanır. Özellikle lityum-iyon bataryalar ve hidrojen elektrolizörleri ile fazla üretilen enerji depolanarak, gece saatlerinde veya düşük üretim zamanlarında kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu da enerji sürekliliğini sağlarken, YEK'in daha etkin kullanılmasına yardımcı olur.

Mikroşebekelerin sosyal faydaları da oldukça geniştir ve enerjiye erişimin olmadığı veya kısıtlı olduğu bölgelerde yaşam kalitesinin artırılmasına büyük katkı sağlar. Dünya genelinde milyonlarca insan halen elektrik şebekesine erişimden yoksun durumdadır ve mikroşebekeler, özellikle kırsal ve uzak bölgelerde güvenilir enerji sağlamak için ideal bir çözümdür. Elektriğin olmadığı bölgelerde mikroşebekeler sayesinde eğitim, sağlık, tarım ve sanayi gibi sektörler gelişebilir ve ekonomik kalkınma hızlanabilir. Ayrıca, mikroşebekeler doğal afetler sırasında kritik altyapıların enerji ihtiyacını karşılamak için oldukça etkilidir. Kasırgalar, depremler veya büyük

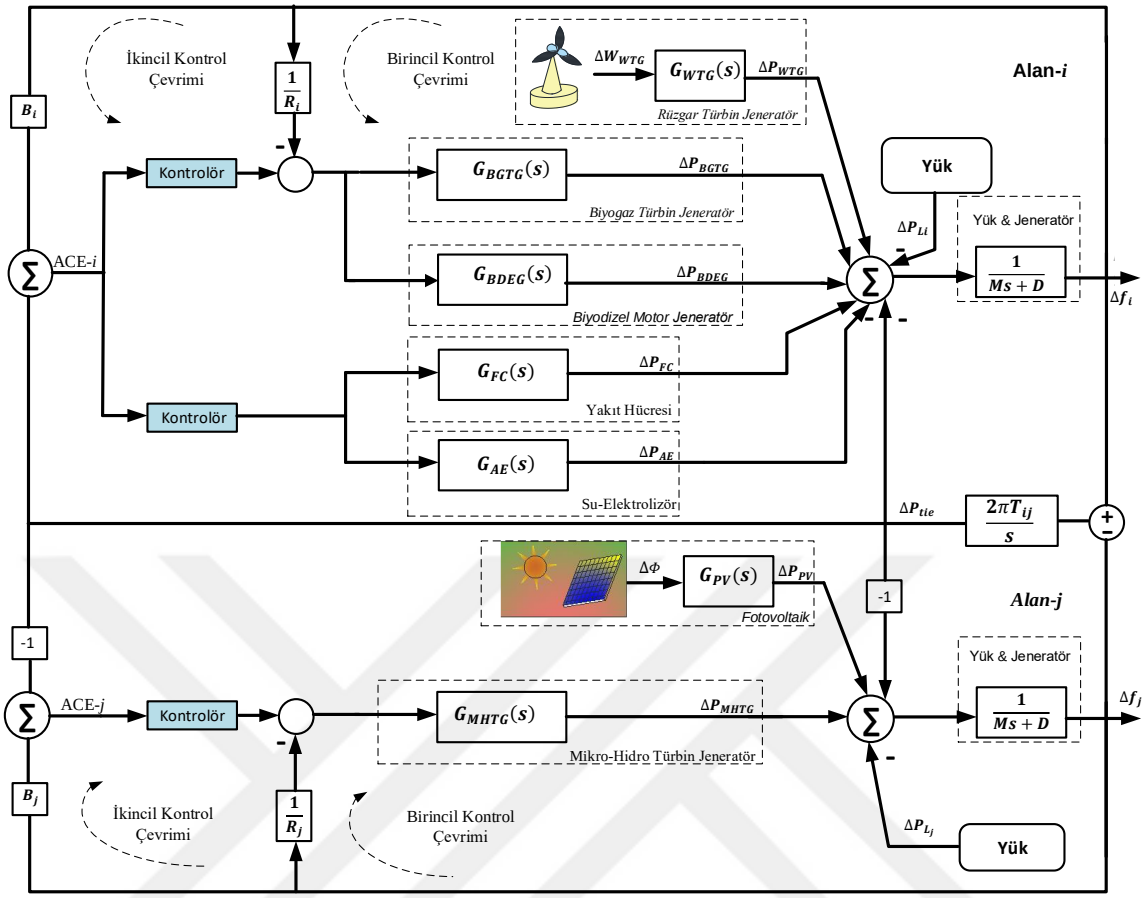
ölçekli elektrik kesintileri gibi durumlarda mikroşebekeler devreye girerek hastaneler, acil durum merkezleri ve iletişim sistemleri gibi hayati öneme sahip tesislerin kesintisiz çalışmasını sağlar. Bu durum, afet sonrası toparlanma sürecini hızlandırarak insan hayatını koruma açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra, mikroşebekeler yeni iş fırsatları da yaratmaktadır. Yenilenebilir enerji ve enerji yönetimi alanlarında uzmanlaşmış mühendisler, teknisyenler ve enerji danışmanları için geniş bir istihdam alanı sunar. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde mikroşebeke teknolojileri, enerji sektöründe yeni yatırımları teşvik ederek ekonomik büyümeye katkı sağlayabilir.

3.1. Mikroşebekelerin Modellenmesi ve Modellerin Bileşenleri

Elektrik güç sistemleri, doğası gereği doğrusal olmayan ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Generatörlerin elektromekanik dinamikleri, türbin regülatörlerinin kontrol süreçleri ve yüklerin değişken doğası, sistemin yüksek dereceli ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerle modellenmesini gerektirmektedir. Ancak, bu tür sistemlerin analizinin gerçekleştirilebilmesi ve kontrol tasarımının uygulanabilir hale getirilebilmesi için doğrusal hale getirilmiş modellerin kullanımı yaygın bir yaklaşımdır.

Özellikle frekans yanıtı analizlerinde, sistemin temel dinamiklerini yakalayabilmek amacıyla doğrusal modeller tercih edilmektedir. Doğrusal olmayan sistemlerin belirli çalışma noktalarında doğrusal hale getirilmiş modellerle temsil edilmesi, kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ve analiz edilmesi açısından büyük kolaylık sağlamaktadır [60]. Mikroşebekeler gibi düşük atalete sahip sistemlerde, doğrusal modellerin frekans tepkisini başarılı bir şekilde temsil edebildiği, literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur [61,62]. Çok bölgeli bir mikroşebekenin doğrusal modeli, sistemin temel dinamik bileşenlerini yansıtmak amacıyla Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, mikroşebekeleri oluşturan temel bileşenler ele alınmakta ve sistemin dinamik özellikleri doğrusal hale getirilmiş modeller çerçevesinde incelenmektedir. Aşağıdaki bölümlerde, bu bileşenlerin modellenmesi ve mikroşebeke dinamiklerine etkileri detaylandırılmıştır.



Şekil 3.1. Çok bölgeli mikroşebeke sisteminin doğrusal modeli

Doğrusal olmayan modellerin kullanımı, güç sistemlerinin tüm çalışma aralıklarındaki davranışını daha detaylı olarak analiz etmeye olanak tanır. Ancak YFK sistemlerinin analizinde doğrusal modeller, sistemin dinamik davranışını yeterli doğrulukla temsil edebilmekte ve bu nedenle yaygın olarak tercih edilmektedir. Passos Filho ve arkadaşları [63], doğrusal (DC güç akışı) ve doğrusal olmayan (Newton-Raphson) modelleri karşılaştırarak, doğrusal modellerin kararlı durum frekans sapmalarını etkili bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Azelhak ve arkadaşları [64], mikroşebeke sistemleri için doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin karşılaştırıldığı çalışmasında, doğrusal modellerin belirli çalışma koşulları altında benzer sonuçlar sağladığını ve sistem analizlerinde uygulanabilirliğini koruduğunu ortaya koymuştur

3.1.1. Biyogaz Türbin generatör Sistemi

Biyogaz Türbin generatör (BGTG) sistemi; gaz valf aktüatörü, hız düzenleyici, gaz türbini, yakıt sistemi ve yanma odasından oluşmaktadır [65]. BGTG sistemi ile biyobozunur atıklar ve

hayvan dışkılarından biyogaz üretilmekte olup, üretilen biyogaz elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. BGTG sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (3.1) ile ifade edilebilir [65].

$$G_{BGTG}(s) = \left(\frac{1+X_c s}{(1+Y_c s)(1+b_B s)}\right)\left(\frac{1+T_{CR}s}{1+T_{BG}s)}\right)\left(\frac{1}{1+T_{BT}s}\right) \quad (3.1)$$

Bu denklemde $X_c, Y_c, b_B, T_{CR}, T_{BG}$, ve T_{BT} sırasıyla ilerleme sabiti, gecikme zamanı, valf aktüatörü dinamiği, yanma reaksiyon gecikmesi, biyogaz gecikmesi ve BGTG ünitesinin deşarj zaman sabitlerini temsil etmektedir.

3.1.2. Biyodizel Motor Generatör Sistemi

Biyodizel, enerji bitkilerinin kimyasal yöntemlerle işlenmesiyle üretilir. Biyodizelin enerjisini önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştüren biyodizel motor generatör (BDEG) sisteminin doğrusal hale getirilmiş transfer fonksiyonu, Denklem (3.2)'de verilmiştir [66].

$$G_{BDEG}(s) = \left(\frac{K_{VA}}{1+T_{VA}s}\right)\left(\frac{K_{BE}}{1+T_{BE}s}\right) \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de, K_{VA}, T_{VA}, K_{BE}, ve T_{BE} sırasıyla vana kazancı, vana aktüatör gecikmesi, motor kazancı ve BDEG'nin zaman sabitini ifade etmektedir.

3.1.3. Fotovoltaik Sistem

PV sistemleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu dönüşüm, yarı iletken malzemelerden oluşan PV panelleri sayesinde gerçekleşir. PV sistemleri temel olarak üç ana bileşenden oluşur: PV panelleri, DC/AC dönüştürücü ve bağlantı elemanları. PV panelleri, güneş ışığını emerek doğru akım üretir. Bu elektrik enerjisi, inverter aracılığıyla alternatif akıma dönüştürülür ve bağlantı elemanları sistemi şebekeye entegre eder.

PV sisteminin ürettiği elektrik gücü, çevresel koşullara bağlıdır. Güneş ışınımı (Φ), PV hücresinin yüzey sıcaklığı (T_a), dönüşüm verimliliği (η) ve panel yüzey alanı (S) gibi faktörler bu gücü belirler. Matematiksel olarak PV ünitesinin elektriksel çıkış gücü Denklem (3.3) ile ifade edilir [67].

$$P_{PV} = \eta S\{1 - 0{,}005(25 + T_a)\}\Phi \quad (3.3)$$

PV sistemleri, güneş ışınımındaki değişikliklere anında tepki vermez. Işınım değiştikçe, sistem belirli bir gecikme ile yeni denge noktasına ulaşır. Bu dinamik tepki bir transfer fonksiyonu ile Denklem (3.4)'te verilmiştir [68].

$$G_{PV}(s) = \frac{K_{PV}}{1+T_{PV}s} \quad (3.4)$$

Birçok YFK çalışması, PV sisteminin modellenmesinde Denklem (3.4)'te verilen transfer fonksiyonunu temel almaktadır [69,70]. PV panel, invertör ve bağlantı elemanlarının dinamikleri göz önünde bulundurulduğunda, PV sistemleri Denklem (3.5)'te verilen transfer fonksiyonu ile temsil edilmektedir [71].

$$G_{PV}(s) = (\frac{K_{PV}}{1+T_{PV}s})(\frac{1}{1+T_{inv}s})(\frac{1}{1+T_{I/C}s}) \quad (3.5)$$

Burada K_{PV} PV sistemin kazancını temsil ederken, T_{PV}, T_{inv} ve $T_{I/C}$ sırasıyla PV panelin, inverterin ve bağlantı cihazının zaman sabitlerini ifade etmektedir.

3.1.4. Rüzgar Türbin Generatör Sistemi

Rüzgar Türbin Generatör (WTG) sistemi, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. İndüksiyon bazlı bir WTG'nin güç çıkışı, temel aerodinamik ve fiziksel parametreler dikkate alınarak belirlenebilir. Bu bağlamda, rüzgar hızı (V_w), hava yoğunluğu (ρ), rotor tarafından süpürülen alan (A_r) ve güç katsayısı (C_p), sistemin enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen değişkenlerdir. Matematiksel olarak, WTG'nin çıkış gücü Denklem (3.6) ile ifade edilir [72].

$$P_W = 0{,}5x\rho xA_r xC_p xV_w^3 \quad (3.6)$$

Bu denklem, rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak güç üretiminin değiştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, rüzgar hızındaki küçük artışlar, üretilen güç üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. WTG sisteminin dinamik davranışı ise birinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile modellenebilir. Aşağıda verilen Denklem (3.7)'de K_{WTG} sistem kazancını, T_{WTG} ise sistemin zaman sabitini temsil etmektedir [73].

$$G_{WTG}(s) = \left(\frac{K_{WTG}}{1+T_{WTG}s}\right) \quad (3.7)$$

3.1.5. Mikro-Hidro Türbin Generatör Sistemi

Mikro-Hidro Türbin Generatör (MHTG) sistemi, suyun potansiyel enerjisini mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. Bu sistem, temel olarak bir hız regülatörü, cebri boru ve generatörden oluşur. MHTG'nin matematiksel modeli, sistemin dinamik tepkisini ifade eden bir transfer fonksiyonu olarak Denklem (3.8)'de tanımlanır [67].

$$G_{MHTG}(s) = \left(\frac{K_{MG}}{1+T_{MG}s}\right)\left(\frac{1+T_{Rs}s}{1+T_{RH}s}\right)\left(\frac{1-T_{HT}s}{1+0.5*T_{HT}s}\right) \quad (3.8)$$

Bu ifadede, K_{MG} ve T_{MG}, sırası ile hız regülatörünün kazancını ve zaman sabitini, T_{Rs} ve T_{RH}, MHTG ünitesinin regülatör sıfırlama ve geçici düşüş zaman sabitlerini, T_{HT} ise hidro türbinin zaman sabitini ifade etmektedir.

3.1.6. Su-Elektrolizör Sistemi

Su elektrolizörü (AE), suyu elektrik enerjisi kullanarak hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) bileşenlerine ayıran bir sistemdir. Bu süreç, elektroliz olarak adlandırılır ve özellikle YEK ile entegre edildiğinde, temiz ve sürdürülebilir hidrojen üretimi için önemli bir teknolojidir. Elektroliz işlemi, genellikle bir elektroliz hücresi içinde gerçekleşir. Bu hücre, bir anot, bir katot ve bunları ayıran bir elektrolit içerir. Uygulanan elektrik enerjisi, su moleküllerini oksijen ve hidrojene ayrıştırarak aşağıdaki temel kimyasal reaksiyonu gerçekleştirir:

$$H_2O + Elektrik \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (3.9)$$

Burada, katotta hidrojen gazı oluşurken, anotta oksijen gazı açığa çıkar. AE'nin dinamik tepkisi, giriş değişkenlerine bağlı olarak değişir ve bu tepki transfer fonksiyonu ile modellenebilir. AE'nin matematiksel modeli Denklem (3.10) ile ifade edilir [73].

$$G_{AE}(s) = \left(\frac{K_{AE}}{1+T_{AE}s}\right) \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da K_{AE} ve T_{AE} sırasıyla AE sisteminin kazancı ve zaman sabitidir.

3.1.7. Yakıt Hücresi Sistemi

Yakıt Hücresi (FC), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir elektro-kimyasal cihazdır. Çalışma prensibi, hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) gazlarının elektrokimyasal reaksiyona girmesiyle elektrik üretimine dayanır. Bu süreç sırasında su ve ısı yan ürün olarak açığa çıkar. FC'ler, proton değişim membranlı (PEMFC), katı oksit (SOFC), fosforik asit (PAFC) ve erimiş karbonat (MCFC) gibi farklı türlerde olabilir. Bunlar, kullanılan elektrolit malzemesine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak sınıflandırılır. PEM yakıt hücreleri, düşük sıcaklıkta çalıştıkları ve hızlı tepki verdikleri için özellikle taşınabilir ve küçük ölçekli enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.

FC'nin matematiksel modeli, sistemin giriş değişkenlerine verdiği tepkiyi ifade eden bir transfer fonksiyonu ile temsil edilir. FC'in transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir [67]:

$$G_{AE}(s) = \left(\frac{K_{FC}}{1+T_{FC}s}\right) \tag{3.11}$$

Birçok akademik çalışmada FC sistemi Denklem (3.11) kullanılarak modellenmiştir [74,75]. Ancak yakıt hücreleri, sistem mimarisine bağlı olarak farklı bileşenlerden oluşur. Tipik bir FC sistemi üç ana bileşene sahiptir: FC, inverter ve şebeke bağlantı cihazı. FC, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirirken, inverter bu enerjiyi doğru akımdan alternatif akıma dönüştürerek şebekeye veya yüke uyumlu hale getirir. Bağlantı cihazı ise FC sisteminin güç yönetimi ve şebekeye entegrasyonunu sağlar. Böyle bir yapıda FC sistemi Denklem (3.12)' de verilen transfer fonksiyonu ile modellenir [71].

$$G_{FC}(s) = \left(\frac{K_{FC}}{1+T_{FC}s}\right)\left(\frac{1}{1+T_{inv}s}\right)\left(\frac{1}{1+T_{I/C}s}\right) \tag{3.12}$$

Burada K_{FC} FC sistemin kazancını temsil ederken, T_{FC}, T_{inv} ve $T_{I/C}$ sırasıyla FC, inverter ve bağlantı cihazının zaman sabitlerini ifade etmektedir.

3.1.8. Sistem Dinamik Modeli

Elektrik güç sistemlerinde tüketicilerin modellenmesi için yük modeli kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi üretim santrallerinde, türbinler tarafından üretilen mekanik enerji, generatörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Sistemin dinamik davranışını belirleyen mekanik moment (T_m) ile yük momenti (T_e) arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T_m - T_e = j\frac{d\omega}{dt} \tag{3.13}$$

Burada J , atalet momenti ve ω ise açısal hızı ifade etmektedir. Elektrik sistemlerinde frekans generatörlerin açısal hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki, sistemde frekans dalgalanmalarını analiz etmede temel bir unsurdur. Generatörün hızındaki değişim doğrudan sistemin frekansına yansır. Elektrik güç sistemlerinde atalet sabiti (H), generatörlerin ve sistemdeki döner makinelerin kinetik enerji depolama kapasitesini temsil eder. Bu sabit, sistemin frekans değişimlerine karşı tepkisini belirler. Generatör-yük dinamik ilişkisi, mekanik güç değişimi, yük değişimi ve frekans sapması gibi etkenlere bağlı olarak Denklem (3.14) ile ifade edilir.

$$\Delta P_t(t) - \Delta P_d(t) = 2H\frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) \tag{3.14}$$

Burada Δf frekans sapmasını, ΔP_t üretilen toplam güçteki değişimi, ΔP_d yük değişimini ve D ise sönümleme katsayısını temsil eder. Denklem (3.14), sistemin dinamik frekans cevabını

belirler. Denklem Laplace dönüşümüne tabi tutulduğunda, sistemin transfer fonksiyonu şu şekilde elde edilir:

$$\Delta P_t(s) - \Delta P_d(s) = (2Hs + D)\Delta f(s) \tag{3.15}$$

Burada, sistemin eşdeğer ataleti $M = 2H$ olarak tanımlanırsa, frekans sapmasının güç değişimlerine oranı olan transfer fonksiyonu şu formda yazılır:

$$G(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_t(s) - \Delta P_d(s)_t} = \frac{1}{Ms + D} \tag{3.16}$$

Bu model, elektrik güç sistemlerinin ve mikroşebekelerin frekans dinamiklerini analiz etmek için temel bir araçtır.

3.1.9. Bağlantı Hattı Modeli

Elektrik güç sistemlerinde bağlantı hatları, farklı bölgeleri birbirine entegre ederek enerji iletimini sağlayan temel bileşenlerdir. Her bir bölge, hem kendi yüklerine enerji temin eder hem de bağlantı hatları aracılığıyla diğer bölgelerle güç alışverişinde bulunur. Ani bir yük değişimi meydana geldiğinde, sadece ilgili bölgenin frekansında sapmalar oluşmaz, aynı zamanda bağlantı hatlarındaki güç iletim oranları da değişir. Bu değişimler, sistem kararlılığını doğrudan etkileyerek güç akışının dinamik dengesini belirler. İki güç bölgesi arasındaki alternatif akım (AC) iletim hattında iletim kayıpları ihmal edildiğinde, hattaki güç akışı matematiksel olarak Denklem (3.17) ile tanımlanabilir.

$$P_{line} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \tag{3.17}$$

Burada i ve j bölgeleri için sırasıyla bölge gerilimlerinin genliği V_i ve V_j, faz açıları δ_i ve δ_j ile iletim hattı empedansı ise X_{ij} ile ifade edilir. Her bir bölge için faz açısındaki değişim ise şu şekilde gösterilir:

$$\Delta\delta = 2\pi \int \Delta f dt \tag{3.18}$$

Her bölgenin faz açısındaki değişimler göz önünde bulundurulduğunda, bölgeler arasındaki güç değişimi Denklem (3.19) ile ifade edilebilir.

$$\Delta P_{line} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j)\left(\Delta\delta_i - \Delta\delta_j\right) \tag{3.19}$$

Bağlantı hattı senkronizasyon katsayısı T_{ij} le sembolize edilir ve Denklem (3.20) ile ifade edilebilir.

$$T_{ij} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j) \tag{3.20}$$

Bu katsayı kullanılarak bölgeler arasındaki güç değişimi Denklem (3.21) ile yeniden düzenlenebilir.

$$\Delta P_{line} = T_{ij} \left(\Delta\delta_i - \Delta\delta_j\right) \tag{3.21}$$

Denklem (3.17)'deki faz açısı değişimi ve frekans arasındaki ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda bağlantı hattının güç değişimi Denklem (3.22) ile tanımlanır.

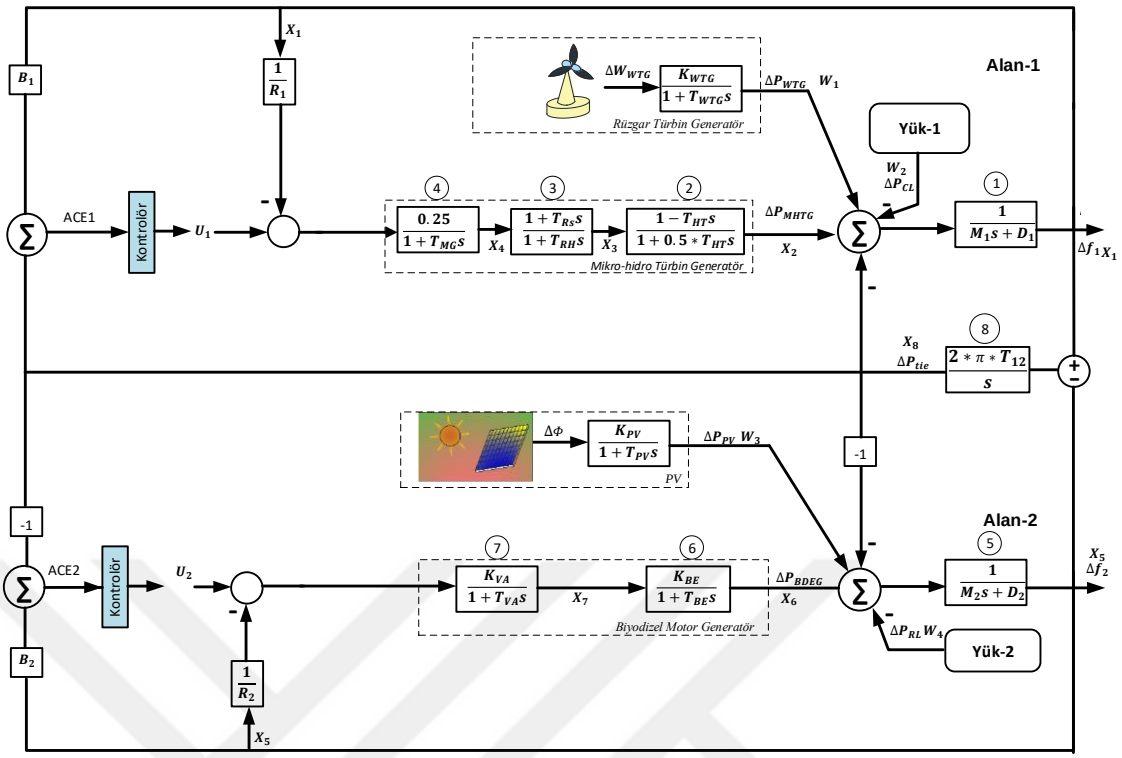
$$\Delta P_{line} = T_{ij} 2\pi \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt\right) \tag{3.22}$$

Δf_i ve Δf_j sırasıyla *i.* ve *j.* alanlardaki frekans sapmalarıdır. Denklem (3.22)'nin Laplace dönüşümü alınarak bağlantı hattındaki güç değişiminin dinamik modeli elde edilir ve bu model Denklem (3.23) ile ifade edilir.

$$\Delta P_{tie}(s) = \frac{T_{ij} 2\pi}{s} \left(\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)\right) \tag{3.23}$$

3.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon Analizi

Güç sistemlerinde frekans kontrolü çalışmaları, çoğunlukla sistemin dinamik tepkisini sadeleştirilmiş biçimde incelemeye olanak tanıyan lineerleştirilmiş modeller üzerinden yürütülmektedir. Gerek büyük ölçekli enterkonnekte sistemlerde gerekse izole çalışan mikroşebekelerde, yük-talep dengesindeki küçük dalgalanmalar sistem frekansında geçici ya da sürekli sapmalara neden olabilmektedir. Bu gibi durumların analizinde, sistem davranışını temsil eden doğrusal modeller kullanılarak, MATLAB/Simulink gibi sayısal benzetim araçları aracılığıyla zaman domeninde dinamik performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.2'de örnek bir mikroşebekeye ait YFK modelinin blok diyagram temsili sunulmuştur. Mikroşebekeler, geleneksel güç sistemlerine kıyasla düşük atalet momentine sahip olmaları ve çoğunlukla evirici tabanlı YEK'e dayalı olarak işletilmeleri nedeniyle yük değişimlerine karşı daha hassas bir dinamik karakter sergilemektedir. Bu bağlamda, mikroşebekelerde frekans kararlılığının değerlendirilmesi ve kontrol stratejilerinin bu dinamik yapıya uygun şekilde tasarlanması kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.2. Çok bölgeli mikroşebeke sisteminin doğrusal modeli

MATLAB/Simulink ortamı, güç sistemi modellerinin hem sürekli zamanlı hem de ayrık zamanlı benzetimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar kontrol algoritmaları sürekli zamanlı sistem dinamiklerine göre tasarlansa da, bu algoritmalar Simulink ortamındaki benzetimlerde dijital işlemciler üzerinde çalıştıkları varsayımıyla ayrık zamanlı biçimde uygulanmaktadır. Dolayısıyla, bir kontrol yapısının Simulink ortamında kararlı bir performans sergilemesi, gerçek zamanlı uygulamalarda da aynı düzeyde kararlılık sağlayacağını garanti etmemektedir. Bu nedenle, kontrolörün ayrık zamanlı kararlılığının değerlendirilmesi gerekli hale gelebilir [76]. Bu bölümde, örnek bir mikroşebeke YFK modeli üzerinden ayrık zaman kararlılığı kavramı açıklanmakta, bir sistemin ayrık zamanlı olarak kararlı olup olmadığının nasıl belirleneceği detaylandırılmakta ve hangi durumda gerçek zamanlı simülatörlerin kullanımının zorunlu hale geldiği tartışılmaktadır.

3.2.1. Durum-Uzay Gösterimi

Şekil 3.2'de verilen iki bölgeli örnek mikroşebeke YFK modeli için 1. ve 2. bölgelerdeki frekans sapmaları (Δf_1, Δf_2) için geçerli olan temel denklemler aşağıda verilmiştir:

$$\Delta f_1 = \frac{1}{M_1 s + D_1}(\Delta P_{WTG} + \Delta P_{MHTG} - \Delta P_{CL} - \Delta P_{tie}) \tag{3.24}$$

$$\Delta f_2 = \frac{1}{M_2 s + D_2}(\Delta P_{PV} + \Delta P_{BGTG} - \Delta P_{RL} + \Delta P_{tie}) \quad (3.25)$$

Mikroşebeke modelleri, YFK amacıyla analiz edildiğinde, sistemin dinamik davranışı durum uzay formunda ifade edilerek kontrol ve kararlılık analizlerine olanak tanır. Bu yaklaşım, mikroşebekenin çok girişli–çok çıkışlı yapısını ve bozucu etkileri dikkate alarak, sistemin hem öngörülebilir kontrol girişleri hem de rastlantısal dış etkilere karşı dinamik tepkisinin analizine olanak tanır. Şekil 3.2'de verilen iki bölgeli mikroşebeke modeli, her iki alandaki generatörler, kontrol edilmeyen YEK (rüzgar türbini, PV panel), yük etkileri ile birlikte modellenmiştir. Doğrudan transfer fonksiyonlarıyla tanımlanan bu yapı Denklem (3.26)'da gösterildiği gibi durum uzay biçiminde ifade edilebilir [77].

$$\dot{x(t)} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t), \qquad y(t) = Cx(t) \quad (3.26)$$

Burada $x(t)$, sistemin durum değişkenlerini; $u(t)$, kontrol girişlerini; $w(t)$, dış bozucu girişleri; $y(t)$, sistemin çıkışlarını göstermektedir. Matrisler ise sırasıyla A: sistem matrisi, B: kontrol sinyali olarak giriş matrisi, E: bozucu giriş matrisi ve C: çıkış matrisidir.

Kontrol tasarımı ve benzetim çalışmalarına geçmeden önce, dijital ortamlarda benzetimi gerçekleştirilen sistemlerinin kararlılığını değerlendirebilmek adına, modelinin durum uzay formunda tanımlanması önemlidir. Bu kapsamda, Şekil 3.2'de sunulan sistem yapısındaki her bir bloğun dinamik davranışı, ilgili durum değişkenleri cinsinden diferansiyel denklemler ile ifade edilmiştir. Bu işlem sırasında, blokların transfer fonksiyonları zaman domenine dönüştürülerek, Laplace değişkeni s yerine türev operatörü $\frac{d}{dt}$ kullanılmış ve sistemin sürekli zamanlı durum denklemleri elde edilmiştir.

1. Blok için:

$$\dot{x_1}M_1 + x_1 D_1 = x_2 + w_1 - w_2 - x_{10} \rightarrow \dot{x_1} = -\frac{D_1}{M_1}x_1 + \frac{1}{M_1}x_2 - \frac{1}{M_1}x_8 + \frac{1}{M_1}w_1 - \frac{1}{M_1}w_2 \quad (3.27)$$

2. Blok için:

$$\dot{x_2} = -\frac{1}{0{,}5T_{HT}}x_2 + \left(\frac{1}{0{,}5T_{HT}} + \frac{1}{0{,}5T_{RH}}\right)x_3 + \left(\frac{T_{RS}}{0{,}5T_{MG}T_{RH}} - \frac{1}{0{,}5T_{RH}}\right)x_4 \quad (3.28)$$

3. Blok için:

$$\dot{x_3} = -\frac{0{,}25T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}R_1}x_1 - \frac{1}{T_{RH}}x_3 + \left(\frac{1}{T_{RH}} - \frac{T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}}\right)x_4 + \frac{0{,}25T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}}u_1 \quad (3.29)$$

4. Blok için:

$$\dot{x_4} = -\frac{0,25}{T_{MG}R_1}x_1 - \frac{1}{T_{MG}}x_4 + \frac{0,25}{T_{MG}}u_1 \tag{3.30}$$

5. Blok için:

$$\dot{x_5} = -\frac{\dot{D_2}}{M_2}x_5 + \frac{1}{M_2}x_6 + \frac{1}{M_2}x_8 + \frac{1}{M_2}w_3 - \frac{1}{M_2}w_4 \tag{3.31}$$

6. Blok için:

$$\dot{x_6} = -\frac{1}{T_{BE}}x_6 + \frac{K_{BE}}{T_{BE}}x_7 \tag{3.32}$$

7. Blok için:

$$\dot{x_7} = -\frac{1}{T_{VA}R_2}x_5 - \frac{1}{T_{VA}}x_7 + \frac{1}{T_{VA}}u_2 \tag{3.33}$$

8. Blok için:

$$\dot{x_8} = 2\pi T_{12}x_1 - 2\pi T_{12}x_5 \tag{3.34}$$

Elde edilen diferansiyel denklemler, sistemin durum-uzay modeline dönüştürülerek matris formunda ifade edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} \\ 0 & -\frac{2}{T_{HT}} & \left(\frac{2}{T_{HT}} + \frac{2}{T_{RH}}\right) & \left(\frac{2T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}} - \frac{2}{T_{RH}}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{0,25T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}R_1} & 0 & -\frac{1}{T_{RH}} & \left(\frac{1}{T_{RH}} - \frac{T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{0,25}{T_{MG}R_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{MG}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_2}{M_2} & \frac{1}{M_2} & 0 & \frac{1}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{BE}} & \frac{K_{BE}}{T_{BE}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{VA}R_2} & 0 & -\frac{1}{T_{VA}} & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{0{,}25T_{RS}}{T_{MG}T_{RH}} & 0 \\ \frac{0{,}25}{T_{MG}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{VA}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1} & -\frac{1}{M_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{M_2} & -\frac{1}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.2. Ayrık Zaman Kararlılık Analizinin Gerekçesi ve Uygulama Adımları

Mikroşebeke sisteminin doğrusal dinamik modeli elde edildikten sonra, bu model üzerinde gerçekleştirilecek kontrolör tasarımı ve benzetim çalışmalarının çoğu, MATLAB/Simulink gibi sayısal ortamlarda yürütülmektedir. Ancak bu tür sayısal platformlarda yapılan benzetimler, sistemin sürekli zamanlı doğasına rağmen ayrık zamanlı olarak işlenmektedir. Bunun nedeni, bilgisayarların işlemleri sonlu örnekleme periyotlarıyla ve ayrık zaman adımları üzerinden gerçekleştirmesidir. Bu durum, kontrolör tasarımında teorik olarak kararlı olduğu varsayılan sistemin, sayısal ortamda kararsız sonuçlar üretebilmesine neden olabilir [78].

Bu nedenle, kontrolörün sayısal ortamda uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla sistemin ayrık zamanlı hali üzerinden kararlılık analizi yapılması gerekmektedir. Sürekli zaman alanında kararlı olan bir sistemin, ayrık zaman alanında da kararlı olacağı garanti edilmediğinden, bu adım özellikle sayısal uygulamalar için kritik bir değerlendirme süreci niteliği taşımaktadır.

Sayısal ortamda çalışan kontrol sistemleri için yukarıdaki sürekli zamanlı model, örnekleme aralığı Δt ile ayrık zamana çevrilmelidir. Bu dönüşüm sonucu aşağıdaki ayrık zamanlı durum uzay modeli elde edilir [79]:

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] + \Gamma_d w\,[k] \tag{3.35}$$

Burada Φ durum geçiş matrisi, Γ ve Γ_d ise sırasıyla giriş etkisi ve bozucu etkisi matrisleridir. Φ, matris üstel fonksiyonu $e^{A\Delta t}$ ile tanımlanır ve Taylor serisi açılımı ile hesaplanabilir [80]:

$$\Phi = e^{A\Delta t} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (A\Delta t)^n \tag{3.36}$$

Matris üstel fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılan Taylor serisi açılımı, teorik olarak sonsuz terim içerir. Ancak pratikte, matris kuvvetlerinin etkisi faktöriyel artış nedeniyle hızla azaldığından, genellikle ilk 5 ila 10 terim hesaplanarak yüksek hassasiyetle yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir [81]. Örnekleme aralığı Δt'nin küçük olması bu yaklaşımı daha da geçerli kılar. Giriş matrisinin etkisi ise aşağıdaki integral ile hesaplanır [82]:

$$\Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} B d\tau \tag{3.37}$$

Bu ifade, sistem matrisi A'nın tersinin alınabildiği durumlarda aşağıdaki şekilde kapalı formda da ifade edilebilir:

$$\Gamma = A^{-1}(\Phi - I)B \tag{3.38}$$

Karalılık Kriteri

Ayrık zamanlı sistemlerin kararlılığı, doğrudan geçiş matrisi Φ'nin özdeğerlerine bağlıdır. Sürekli zamanlı sistemin ayrık zamana dönüştürülmesiyle elde edilen bu matrisin özdeğerleri, sistemin zamanla nasıl bir dinamik tepki vereceğini belirlemektedir. Bu bağlamda, ayrık zamanlı sistemin kararlı olabilmesi için aşağıdaki koşulun sağlanması gereklidir [83]:

$$|\lambda_i| < 1 \quad \forall i \tag{3.39}$$

Burada λ_i Φ matrisine ait i-inci özdeğeri; $|\lambda_i|$ ise bu özdeğerin karmaşık düzlemdeki mutlak değerini ifade etmektedir. Tüm özdeğerlerin birim çemberin içerisinde (yani mutlak değerleri birden küçük olacak şekilde) yer alması, sistemin kararlılığını garanti altına alır. Aksi durumda, sistem cevabı zamanla büyüme eğilimi gösterir ve kararsızlığa yol açar.

Örnekleme Aralığının Sayısal Kararlılığa Etkisi

Ayrık zamanlı modelleme, sürekli sistemin belli bir örnekleme aralığı Δt ile ayrıklaştırılmasını gerektirir. Bu örnekleme süresi, yalnızca sayısal benzetimlerin doğruluğu açısından değil, aynı zamanda sayısal kararlılık açısından da kritik rol oynamaktadır. Sayısal

kararlılığın sağlanabilmesi adına, örnekleme zamanı Δt genellikle aşağıdaki koşulu sağlamalıdır [84].

$$\Delta t < \frac{2}{max(|\lambda|)} \tag{3.40}$$

Bu ifadede $max(|\lambda|)$, sürekli zamanlı sistemin A matrisine ait en büyük özdeğerin mutlak değeri olarak tanımlanır. Bu koşul, temelde Nyquist kriterine dayanmaktadır ve sistemdeki en yüksek frekanslı bileşenlerin örnekleme sırasında doğru şekilde yakalanabilmesini amaçlamaktadır. Bununla birlikte, örnekleme zamanı seçimi yalnızca teorik kararlılık kriterlerine bağlı değildir. Gerçek zamanlı sistemlerde, işlemci kapasitesi, kontrolörün hesaplama süresi ve donanımsal kısıtlamalar da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle çok küçük Δt değerleri, sistemin yüksek çözünürlükle modellenmesini sağlasa da işlem yükünü ve hesaplama maliyetini artırır. Çok büyük Δt değerleri ise sistemin dinamik özelliklerinin doğru şekilde modellenmesini engelleyerek kararsızlığa yol açabilir. Bu kapsamda, örnekleme süresinin seçiminde dengeleyici bir yaklaşım benimsenmeli; hem kararlılık hem de hesaplama verimliliği göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2.3. Gerçek Zamanlı Simülatörlerin Kullanım Gerekliliği

Sürekli zamanlı sistemlerin dijital ortamlarda modellenebilmesi için belirli bir örnekleme aralığı Δt ile ayrık zamanlı hale getirilmesi gereklidir. Ancak seçilen örnekleme periyodu, yalnızca kararlılığı değil, aynı zamanda modelin fiziksel gerçekçiliğini ve benzetimlerin doğruluğunu da önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, örnekleme süresine bağlı olarak farklı benzetim platformlarının uygunluğu değerlendirilmektedir.

Çok küçük zaman sabitlerine sahip hızlı dinamik sistemlerde, sistem dinamiklerinin doğru şekilde yakalanabilmesi için oldukça küçük Δt değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, MATLAB/Simulink gibi yazılım tabanlı benzetim ortamlarında zaman ilerlemelerinin yetersiz çözünürlükte hesaplanmasına, dolayısıyla sayısal hata birikimine ve fiziksel olmayan sonuçlara neden olabilir. Bu tür sistemlerde gerçek zamanlı simülatörlerin (örneğin OPAL-RT, RTDS gibi) kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu platformlar çok küçük örnekleme adımlarıyla çalışabilmekte ve fiziksel sistemle birebir senkron benzetimleri yapabilmektedir [85,86].

Öte yandan, sistemin zaman sabitleri daha büyük olduğunda, örnekleme aralığı da daha uzun seçilebilir. Bu durumda MATLAB/Simulink gibi geleneksel yazılımlar yeterli çözünürlüğü sağlayabilir ve gerçek zamanlı simülatörlerle elde edilen sonuçlar arasında fark ihmal edilebilir seviyede olur. Dolayısıyla bu tür uygulamalarda gerçek zamanlı benzetim yerine yazılım tabanlı çözüm yeterli olabilir ve maliyet-etkinlik açısından daha avantajlıdır.

Bu bilgiler doğrultusunda sistemin örnekleme aralığı gereksinimi, modelin çözüm doğruluğu ve kontrolörün fiziksel uygulama koşulları göz önünde bulundurularak uygun benzetim platformu seçilmelidir. Gerçek zamanlı simülatörler yalnızca gerçek zaman koşullarının sağlanması açısından değil, aynı zamanda çok küçük adımlarla yüksek çözünürlükte kararlılık ve performans analizi yapılabilmesine olanak sağladıkları için de tercih edilir.

4. KONTROL YÖNTEMLERİ

Güç sistemlerinde otomatik kontrol stratejileri, sistem kararlılığını sağlamak ve dinamik değişkenleri istenen referans değerlerine yönlendirmek amacıyla yaygın olarak uygulanmaktadır. AGC ve YFK, enerji arz-talep dengesini sürdürülebilir bir şekilde yönetmek için kritik öneme sahiptir. Bu kontrol süreçlerinde kullanılan yöntemler, yalnızca sistem performansını iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda şebeke güvenliğini artırarak güç sistemlerinin kesintisiz ve güvenilir çalışmasını sağlamaktadır.

Güç sistemlerinin kontrolünde PID kontrolörler en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. PID kontrolörleri, güç üretim sistemlerinde generatörlerin çıkış gücünü dengeleyerek frekans sapmalarını minimize etme amacı taşımaktadır. Bununla birlikte, güç sistemlerinin farklı dinamik özellikler göstermesi, kontrol stratejilerinde esneklik gerektirmektedir. Bu doğrultuda, PI, PD ve TID kontrolörleri, sistem gereksinimlerine bağlı olarak alternatif çözümler sunmaktadır. Ayrıca, FOPID gibi kontrolörler, geleneksel tam dereceli kontrol yaklaşımlarına kıyasla daha esnek ayarlama parametreleri sunarak sistem performansını artırabilmektedir. Kesir dereceli kontrolörler, dinamik tepki süresini optimize etme ve kararlılığı artırma avantajlarıyla güç sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, farklı zaman ölçeklerinde tepki gerektiren durumlar için kaskat kontrol yapıları, daha etkin bir kontrol sağlayarak güç sistemlerinin dinamik performansını iyileştirebilmektedir [87-89].

Geleneksel kontrol yöntemlerinin parametre ayarlamalarında karşılaşılan zorluklar, özellikle mikroşebekelerdeki YEK'in değişken üretimi ve dinamik yük değişimleri durumunda sezgisel optimizasyon algoritmalarının önemini artırmıştır. Literatürde genetik algoritmalar (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi sezgisel yöntemlerin, kontrol parametrelerini optimize ederek güç sistemlerinde daha kararlı bir frekans kontrolü sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinin frekans yanıt performansını artırmak amacıyla ISSA ve CIOA kullanılarak kontrol parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmektedir. Geleneksel ayarlama yöntemlerine kıyasla, sezgisel optimizasyon teknikleri, değişken yük koşullarına daha hızlı uyum sağlayarak sistemin dinamik yanıt süresini iyileştirmekte ve genel kararlılığını artırmaktadır [45,46,90]

Sezgisel optimizasyon algoritmalarının sunduğu avantajlara ek olarak, mikroşebeke sistemlerinin doğası gereği bazı belirsizlikler içermesi, bulanık mantık tabanlı kontrol yöntemlerinin önemini artırmaktadır. Bulanık mantık kontrolörleri, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda sistemin giriş-çıkış ilişkilerini belirli kurallara dayalı olarak modelleyerek, değişken güç üretimi ve değişken yük koşullarına karşı daha esnek ve adaptif bir kontrol sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle frekans dalgalanmalarının yüksek olduğu izole güç sistemlerinde bulanık mantık kontrolörlerinin avantajını ortaya koymaktadır. Ayrıca, sezgisel

optimizasyon algoritmaları ile birlikte kullanıldığında, bulanık mantık kontrolörlerinin parametre ayarlamaları daha da geliştirilebilmekte ve sistem performansı önemli ölçüde artırılabilmektedir.

YFK stratejilerinin etkinliğini artıran önemli yaklaşımlardan biri, AGC'ye talep tarafı yönetim mekanizmalarının entegrasyonudur. DRM ile yalnızca üretim tarafında kontrol sağlamakla sınırlı kalınmayıp, talep tarafındaki kontrol edilebilir yüklere müdahale edilerek güç sistemlerinde arz-talep dengesinin korunmasına katkıda bulunulmaktadır. Bu mekanizma, yüklerin esnek bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyarak talep dalgalanmalarının dengelenmesini ve frekans sapmalarının minimize edilmesini sağlamaktadır. DRM'nin üretim kontrol sistemleri ile entegre edilmesi sistem kararlılığını ve enerji verimliliğini artırmaktadır.

4.1. Oransal-İntegral Kontrolör

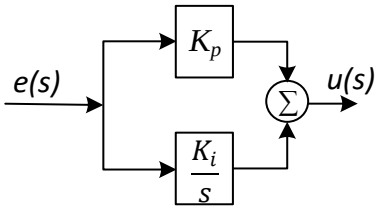
PI kontrolörü, oransal ve integral bileşenlerinden oluşan bir kontrol mekanizmasıdır. Oransal bileşen, hata ile doğru orantılı bir kontrol sinyali üretirken, integral bileşen, zaman içinde hata birikimini değerlendirerek kalıcı hataları ortadan kaldırmaya çalışır. Oransal kontrol tek başına kullanıldığında, sistem belirlenen referans değere yaklaşabilir ancak genellikle tamamen ulaşamaz. İntegral bileşen, geçmiş hataları değerlendirerek sistemin tam anlamıyla referans noktaya ulaşmasını sağlar. Matematiksel olarak PI kontrol sinyali Denklem (4.1) ile ifade edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \tag{4.1}$$

Laplace dönüşümü uygulandığında, PI kontrol fonksiyonu Denklem (4.2)'de verilen formuna dönüşür.

$$u(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) e(s) \tag{4.2}$$

Burada u kontrol sinyalini, e hata sinyalini, K_p oransal kazanç katsayısını ve K_i integral kazanç katsayısını ifade eder. PI kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. PI kontrolör blok diyagramı

PI kontrolörün en büyük avantajı, kalıcı hataları sıfıra indirmesidir. Ancak, çok yüksek bir integral kazanç değeri, sistemin aşırı tepki vermesine ve istenmeyen salınımlara neden olabilir. Bu nedenle, özellikle integral kazancının doğru bir şekilde ayarlanması önemlidir.

4.2. Oransal-Türev Kontrolör

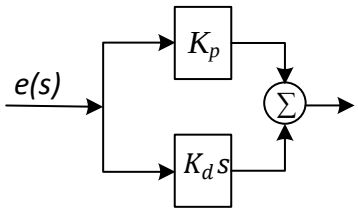
PD kontrolör, oransal ve türev bileşenlerinden oluşur. oransal bileşen, hataya doğrudan tepki verirken, türev bileşeni, hatanın değişim hızına duyarlıdır ve bu sayede sistemin ani değişimlere karşı daha iyi tepki vermesini sağlar. Özellikle ani yük değişimlerinin olduğu sistemlerde, sistemin hızlı ve aşırı tepki vermesini engellemek için türev bileşeni kullanılır. Matematiksel olarak PD kontrolörün kontrol sinyali Denklem (4.3) ile belirlenir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4.3}$$

Denklem (4.3)'e Laplace dönüşümü uygulandığında PD kontrol sinyali Denklem(4.4) ile modellenebilir.

$$u(s) = \left(K_p + K_d s\right) e(s) \tag{4.4}$$

Burada u kontrol sinyalini, e hata sinyalini, K_p oransal kazanç katsayısını ve K_d türev kazanç katsayısını ifade eder. PD kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. PD kontrolör blok diyagramı

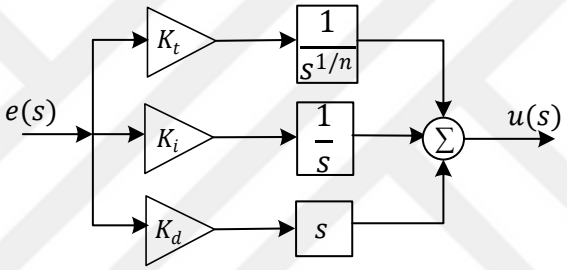
PD kontrolörlerin en büyük avantajlarından biri, sistemin daha hızlı tepki vermesini sağlamasıdır. Ayrıca, türev bileşeni sayesinde sistemin aşırı tepki vermesi önlenerek daha istikrarlı bir yapı oluşturulur. Ancak, PD kontrolör tek başına kalıcı hatayı sıfırlayamaz, bu nedenle integral bileşenin olmadığı sistemlerde hata sıfıra yakın bir değerde sabit kalabilir. Ayrıca, türev kazancı çok yüksek ayarlandığında, sistemdeki gürültüler fazla büyütülebilir ve kontrol sistemi istenmeyen sonuçlar üretebilir.

4.3. Eğimli-İntegral-Türev Kontrolör

TID kontrolör, geleneksel PID kontrol sistemlerine daha hassas ve daha stabil bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Oransal bileşene ihtiyaç duymadan, sistemin hassasiyetini artırır ve geçici rejim performansını iyileştirir. Özellikle gürültüye duyarlılığı azaltarak, hassas sistemlerde daha güvenilir bir kontrol imkânı sunar. TID kontrolörünün yapısı, PID kontrolörüne benzerdir, ancak oransal kazanç yerine kesirli integral içeren özel bir kazanç kullanılır. TID kontrolörün transfer fonksiyonu Denklem (4.5)'te sunulmuştur [91].

$$u(s) = \left(\frac{K_t}{\frac{1}{s^n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) e(s) \tag{4.5}$$

Burada k_t eğim kazancını, $s^{\frac{1}{n}}$ kesirli mertebeyi gösterir ve n genellikle [0-5] aralığında seçilebilen reel bir sayıdır. TID kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.3'de sunulmuştur.



Şekil 4.3. TID kontrolör blok diyagramı

TID kontrolöründe kullanılan kesir dereceli türev işlemleri, klasik PID kontrolörüne kıyasla daha karmaşık hesaplamalar gerektirdiğinden, uygulama süreci daha yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadır. Özellikle, kontrol parametrelerinin hassas şekilde belirlenmesi, geleneksel yöntemlerle doğrudan gerçekleştirilemeyebilir. Bu nedenle, optimal kontrol parametrelerinin belirlenmesinde çoğunlukla sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır.

4.4. Kesir Dereceli PI ve Kesir Dereceli PD Kontrolör

Kesir dereceli kontrol yapıları, klasik tam sayı mertebeli kontrol sistemlerinden farklı olarak kesirli türev ve integral işlemlerini içeren kontrol algoritmalarını ifade eder. Bu tür kontrol yapıları, sistem dinamiklerinin daha esnek bir şekilde modellenmesine olanak tanır ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi performans sağlayabilir. Kesirli kontrol sistemleri, geniş frekans aralığında kararlılık ve hassas ayarlama gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kesirli mertebeden türev ve integral, matematiksel analizde türev ve integral işlemlerinin daha genel bir biçimde tanımlanmasını sağlayan bir yaklaşımdır. Bu kavramın temelleri, L'Hospital

ve Leibniz arasındaki yazışmalarda ilk kez tartışılmış ve ilerleyen yıllarda daha sistematik bir şekilde geliştirilerek matematik ve mühendislik alanlarında geniş bir uygulama alanı bulmuştur [92]. En yaygın kullanılan iki temel kesirli türev ve integral tanımı Riemann-Liouville ve Caputo tanımlarıdır.

Riemann-Liouville kesirli türev tanımı, başlangıç koşullarının doğrudan tanımlanmasını zorlaştırsa da, kesirli sistemlerin teorik analizinde sıklıkla kullanılır ve matematiksel ifadesi Denklem (4.6)'te sunulmuştur.

$$D_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_0^t (t - \tau)^{(n-\alpha-1)} f(\tau) d \tag{4.6}$$

Caputo kesirli türev tanımı ise, sistemlerin başlangıç koşullarının klasik yöntemlerle belirlenmesine olanak tanır. Matematiksel olarak Denklem (4.7) ile ifade edilir.

$$D_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^t (t - \tau)^{(n-\alpha-1)} \frac{d^n f(\tau)}{d\tau^n} d\tau \tag{4.7}$$

Kesirli integral, kesirli türev gibi klasik integralin bir genellemesidir ve Riemann-Liouville integral tanımı en yaygın kullanılan formalizasyondur. Kesirli integral, belirli bir fonksiyonun geçmiş değerlerini ağırlıklı olarak hesaba katmasını sağlayarak sistemin hafıza etkisini artırır. Riemann-Liouville kesirli integral tanımı Denklem (4.8) ile ifade edilir.

$$I^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau, \ \ \alpha > 0 \tag{4.8}$$

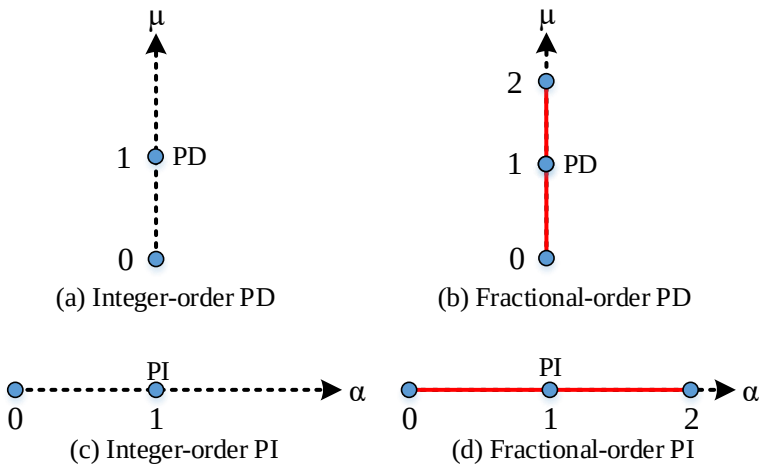
I^{α}, α mertebesindeki kesirli integral operatörünü temsil eder. $\Gamma(\alpha)$, gamma fonksiyonudur ve $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$ eşitliğine sahiptir. α ise kesirli integralin derecesidir.

Denklem (4.9) ve Denklem (4.10) ile tanımlanan transfer fonksiyonları sırasıyla kesir dereceli PI (FOPI) ve PD (FOPD) kontrolörlerin matematiksel modelini temsil etmektedir.

$$G_{FOPI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^{\alpha}}, \ \ \alpha > 0 \tag{4.9}$$

$$G_{FOPI}(s) = K_p + K_d s^{\mu}, \ \ \mu > 0 \tag{4.10}$$

Burada K_p K_i ve K_d sırasıyla kontrolörün oransal, integral ve türev kazançlarını temsil etmektedir. α, integral işleminin kesirli mertebesini, μ ise türev teriminin kesirli mertebesini ifade etmektedir. α ve μ parametreleri genellikle 0 ile 2 arasında bir değere sahiptir.

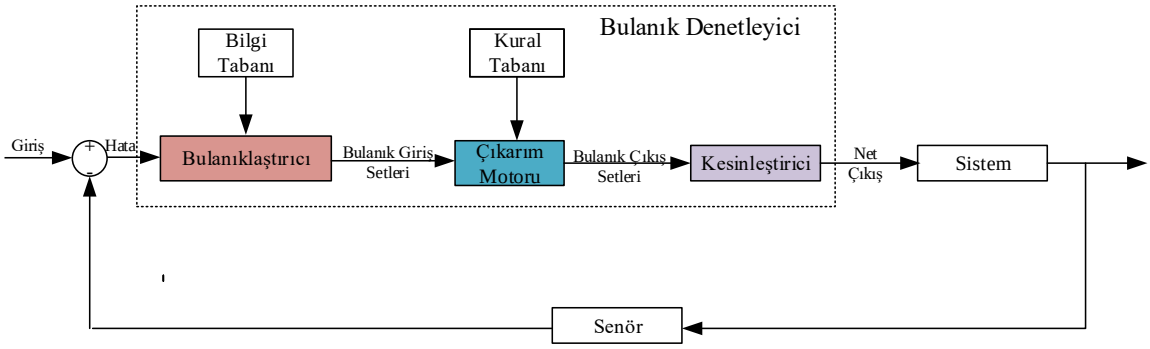


Şekil 4.4. α ve μ eksenlerinde tam sayı dereceli denetleyici ve kesir dereceli denetleyici

Şekil 4.4, FOPI ve FOPD kontrolörlerinin grafiksel tanımını sunmaktadır. Tam sayı dereceli PI kontrolörü, Şekil 4.4(c)'de α-ekseninde mavi ile işaretlenmiş iki nokta ile tanımlanırken, kesirli mertebeden PI kontrolörü, Şekil 4.4 (d)'de α-ekseninde kırmızı çizgi ile gösterildiği gibi sonsuz sayıda noktayla tanımlanabilir. Benzer şekilde, tam sayı dereceli PD kontrolörü, Şekil 4.4 (a)'da μ-ekseninde mavi ile işaretlenmiş iki nokta ile gösterilirken, kesirli mertebeden PD kontrolörü, Şekil 4.4(b)'de μ-ekseninde kırmızı çizgi ile gösterildiği gibi sonsuz sayıda noktayla tanımlanabilir. Şekilde 4.4'de gösterildiği gibi, Kesir dereceli PI ve PD kontrolörleri, tam sayı dereceli PI ve PD kontrolörlerinin noktasal tanımını sürekli bir doğrusal aralığa genişleterek daha esnek bir kontrol yapısı sunmaktadır. Bu genişleme, kesirli integral ($s^{-\alpha}$) ve kesirli türev (s^{μ}) operatörlerinin sağladığı ek serbestlik dereceleri sayesinde, kontrol parametrelerinin daha hassas bir şekilde ayarlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, kesirli mertebeden kontrolörlerin, geleneksel tam sayı mertebeli kontrolörlere kıyasla daha geniş bir çözüm uzayı sunduğunu ve karmaşık dinamik sistemler üzerinde daha hassas ve kararlı bir kontrol sağlayabileceğini göstermektedir.

4.5. Bulanık Mantık Denetleyiciler

Bulanık mantık, uzman bilgisi ve dilsel tanımlar kullanarak kontrol sistemleri tasarlamada başarıyla uygulanmaktadır. Tipik bir bulanık çıkarım sistemi, bulanık mantık ilkelerini kullanan bir geri beslemeli denetleyici biçiminde çalışır. Genel yapısı bulanıklaştırıcı (fuzzifier), kural tabanı ve bilgi tabanı (üyelik fonksiyonlarını da içerir), çıkarım motoru (inference engine) ve kesinleştirici (defuzzifier) olmak üzere dört ana bileşenden oluşur. Şekil 4.5'te bu yapının bir blok diyagramı sunulmuştur.



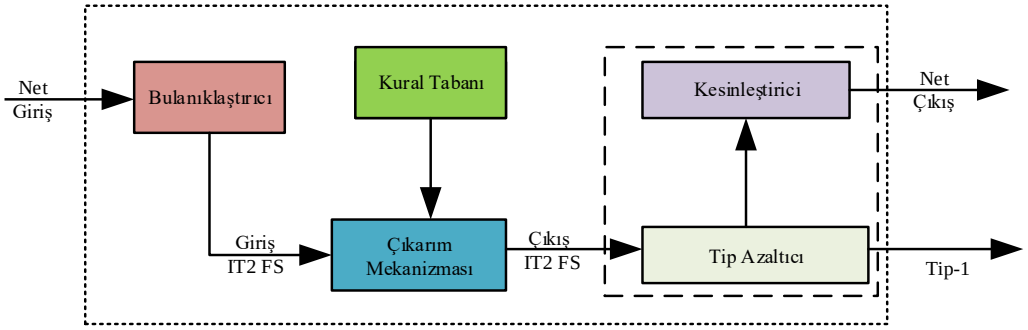
Şekil 4.5. Tipik bir bulanık kontrol sistemi blok diyagramı

Girişte ölçülen değer (örneğin bir sensörden alınan hata sinyali), önce bulanıklaştırma adımında uygun üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık değerlere dönüştürülür. Bu bulanık giriş setleri, denetleyicide tanımlı bulanık kural tabanı ve bilgi tabanı kullanılarak çıkarım motoru tarafından işlenir. Çıkarım motoru, ilgili kurallar ve bilgiler doğrultusunda bir bulanık çıktı kümesi üretir. Son aşamada ise kesinleştirici, elde edilen bulanık değerleri tek bir net sayısal çıktıya dönüştürür. Bu süreç, denetleyicinin insan uzman mantığını taklit ederek girişleri yorumlamasını ve uygun kontrol sinyalini üretmesini sağlar. Bir bulanık kontrol sisteminde, bilgi tabanı probleme özgü uzman bilgilerini ve üyelik fonksiyonlarını içerirken, kural tabanı "Eğer ... ise ..." şeklinde tanımlanmış bulanık mantık kurallarından oluşur.

Klasik Tip I bulanık mantık denetleyicileri, belirsizliği belirli bir ölçüde modelleyerek çeşitli uygulamalarda başarılı sonuçlar elde etse de, yüksek düzeyde belirsizlik içeren veya daha karmaşık dinamiklere sahip sistemlerde yetersiz kalabilmektedir. Özellikle, Tip I sistemlerde üyelik fonksiyonlarının belirli (kesin) olması, değişken belirsizlik seviyelerinin ve gürültünün etkili bir şekilde modellenmesini sınırlandırmaktadır. Bu tür durumlarda, daha geniş bir belirsizlik aralığını yönetebilen ve daha esnek bir yapı sunan Tip II bulanık mantık sistemleri devreye girmektedir.

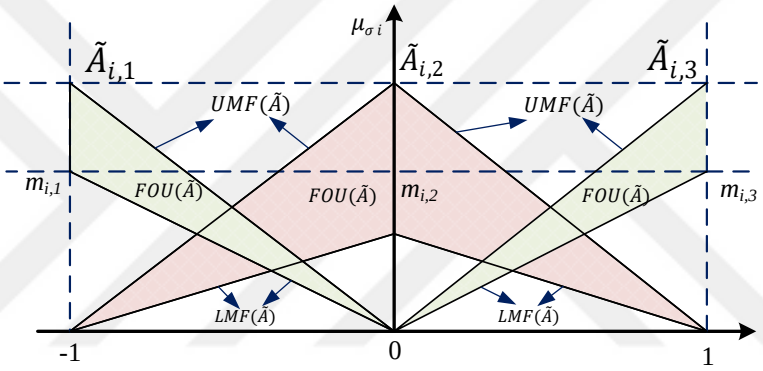
4.5.1. Tip II Bulanık Mantık Denetleyici

Tip II bulanık mantık sistemleri, klasik Tip I bulanık sistemlerin ötesine geçerek belirsizliği daha ayrıntılı bir biçimde modellemeye olanak tanır. Temel fark, Tip II sistemlerde üyelik fonksiyonlarının kendisinin de bulanık olmasıdır. Bu yapı, sistemin belirsizliğe karşı daha esnek yanıt vermesini sağlarken, özellikle yüksek düzeyde gürültü içeren veya dinamik yapısı değişkenlik gösteren süreçlerde daha tutarlı ve güvenilir denetim sağlamaktadır. Tip II bulanık sisteminin genel yapısı, Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Tipik II bulanık kontrol sisteminin genel yapısı

Bu bölümde, kontrol tasarımında kullanılacak Aralık Tip-2 (IT2) bulanık sistemine ait bazı önemli kavramlar ve matematiksel ifadeler sunulmaktadır [93-95]. Tip II bulanık denetleyiciler, Tip I sistemlerin aksine Şekil 4.7'de gösterildiği gibi üyelik fonksiyonlarına sahiptir.



Şekil 4.7. Tip II bulanık denetleyicinin üçgen üyelik fonksiyonları

Şekil 4.7'de, üyelik fonksiyonları, üçgensel Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler (IT2-FS) biçiminde $\tilde{A}$ ile gösterilmektedir. Bu yapı, belirsizliğin daha etkin bir şekilde modellenmesine olanak tanırken, aynı zamanda sistemin değişken koşullara uyum sağlama yeteneğini artıran önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. $\tilde{A}$ ile temsil edilen bir IT2-FS'nin üyelik fonksiyonları $\mu_{\tilde{A}}(\sigma, \mu)$ Denklem (4.11) ile ifade edilmektedir.

$$\tilde{A} = \{(\sigma, u, 1) | \forall \sigma \in \sum, \ \forall u \in U_\sigma \in [0,1]\} \tag{4.11}$$

$\tilde{A}$ bulanık kümesine ait tüm üyelik değerlerinin birleşimiyle oluşan alan (Şekil 4.7'de taralı olarak gösterilen alanlar), Belirsizlik Ayakizi (Footprint of Uncertainty - FOU) olarak adlandırılır ve sisteme ek bir serbestlik derecesi sağlar.

$$\mathrm{FOU}(\tilde{A}) = \cup_{\forall \sigma \in \sum} U_\sigma \tag{4.12}$$

FOU(Ã)'nın üst sınırı, Üst Üyelik Fonksiyonu (Upper Membership Function - UMF) olarak adlandırılır ve $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma)$ ile gösterilir. FOU(Ã)'nın alt sınırı, Alt Üyelik Fonksiyonu (Lower

Membership Function - LMF) olarak adlandırılır ve $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma)$ ile gösterilir. $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma)$ ve $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma)$, aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{cases} \bar{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma) = \overline{\mathrm{FOU}(\tilde{A})} \ \forall \sigma \in \sum \\ \underline{\mu}_{\tilde{A}}(\sigma) = \underline{\mathrm{FOU}(\tilde{A})} \ \forall \sigma \in \sum \end{cases} \tag{4.13}$$

Şekil 4.7'de $m_{i,j}$ değerleri ($j = 1, 2\ ve\ 3$), LMF'lerin yüksekliğini belirleyen parametredir. i, bulanık denetleyicinin giriş sayısını belirler ve DIT2FLC için $i = 1, 2$ olarak tanımlanır. Bu durumda DIT2FLC için kural yapısı Denklem (4.14) ile ifade edilebilir.

$$R_n : \text{if } \sigma_1 \text{ is } \tilde{A}_{1,n} \text{ and } \sigma_2 \text{ is } \tilde{A}_{2,n} \text{ THEN } y_0 \text{ is } B_n \tag{4.14}$$

Burada, n, bulanık kuralların sayısını ifade etmektedir. $\tilde{A}_{1,n}$ ve $\tilde{A}_{2,n}$ giriş değişkenleri olan σ_1 ve σ_2'nin ITFS'lerini temsil eder. B_n , çıkış değişkeni y_0'a ait ITFS olarak tanımlanmaktadır. B_n, $B_1 = -1$, $B_2 = 0$ ve $B_3 = 1$ olarak net değeri ifade eder. Bu durumda DIT2FLC'nin bulanıklaştırılmış net çıkışı Denklem (4.15) ile ifade edilmektedir.

$$y_0 = \frac{y_0^r + y_0^l}{2} \tag{4.15}$$

Denklem (4.15)'de, y_0^r ve y_0^l azaltılmış küme türlerini ifade etmektedir ve Denklemler (4.16) ve (4.17) kullanılarak hesaplanmaktadır [96].

$$y_0^r = \frac{\sum_{n=1}^{R} \underline{f}_n(\sigma).B_n + \sum_{n=R+1}^{N} \overline{f}_n(\sigma).B_n}{\sum_{n=1}^{R} \underline{f}_n(\sigma) + \sum_{n=R+1}^{N} \overline{f}_n(\sigma)} \tag{4.16}$$

$$y_0^l = \frac{\sum_{n=1}^{L} \overline{f}_n(\sigma).B_n + \sum_{n=L+1}^{N} \underline{f}_n(\sigma).B_n}{\sum_{n=1}^{L} \overline{f}_n(\sigma) + \sum_{n=L+1}^{N} \underline{f}_n(\sigma)} \tag{4.17}$$

Yukarıdaki denklemde, R ve L, geçiş noktalarını ifade etmektedir. $F_n(\sigma) = \left[\underline{f}_n(\sigma),\ \ \overline{f}_n(\sigma)\right]$ Denklem (4.18) ile tanımlanır.

$$\begin{cases} \underline{f}_n(\sigma) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_{1,n}}(\sigma_1) * \overline{\mu}_{\tilde{A}_{2,n}}(\sigma_2) \\ \overline{f}_n(\sigma) = \overline{\mu}_{\tilde{A}_{1,n}}(\sigma_1) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_{2,n}}(\sigma_2) \end{cases} \tag{4.18}$$

4.6. Kontrol Parametrelerinin Belirlenmesi

Optimizasyon, bir problemin çözümüne yönelik olarak belirli kısıtlar altında en uygun çözüm kümesinin belirlenmesi süreci olarak tanımlanmakta olup, mühendislik uygulamalarında sistem performansını artırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır [97]. Teknolojik gelişmelerin etkisiyle karmaşıklığı artan sistem yapıları ve çok boyutlu problem alanları, geleneksel

türev-tabanlı optimizasyon yöntemlerinin birçok durumda yetersiz kalmasına yol açmıştır. Bu durum, çözüm uzayında küresel optimuma ulaşmada daha başarılı olan sezgisel optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesini gündeme getirmiştir [98].

Sezgisel algoritmalar, doğa, toplum, fizik, siyaset, kültür gibi çeşitli alanlardan esinlenerek geliştirilen ve genellikle deterministik olmayan yapıdadır. Bu algoritmalar; çözüm uzayının daha geniş bölgelerini tarayabilme kabiliyeti, yerel minimumlara sıkışmadan küresel optimuma yaklaşabilme potansiyeli ve çok sayıda parametreye sahip karmaşık problemlerde uygulanabilirliği sayesinde son yıllarda özellikle kontrol sistemlerinin tasarımında yaygın biçimde kullanılmaktadır [99]. Ant koloni optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritmalar gibi doğa temelli yöntemlerin yanı sıra; tabu arama, lig şampiyonası, yayılımcı rekabet gibi sosyal ve politik yapılarla modellenmiş algoritmalar da literatürde geniş yer bulmuştur [100].

Bu çalışmada, önerilen kontrol yapılarının kazanç parametrelerinin eniyilenmesi amacıyla, fizik temelli sezgisel algoritmalar sınıfında yer alan iki güçlü optimizasyon yöntemi olan CIOA ve ISSA kullanılmıştır. Her iki algoritma da, kontrolör kazançlarının Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali (ITAE) performans kriterine göre optimize edilmesini sağlayarak, mikroşebeke sisteminin frekans yanıt performansını iyileştirmeyi hedeflemiştir. Bu algoritmaların seçilmesinde, hem çözüm kalitesi hem de yakınsama hızları açısından literatürde sundukları başarılı sonuçlar belirleyici olmuştur [45,46].

Aşağıdaki alt başlıklarda, söz konusu algoritmaların temel prensipleri, matematiksel yapıları ve bu tez kapsamında kontrolör tasarımına nasıl entegre edildikleri detaylı olarak açıklanacaktır.

4.6.1. Geliştirilmiş Salp Sürüsü Algoritması

Salplar, Salpidae familyasına ait, fıçı şeklinde deniz omurgasızlarıdır. Bu organizmalar, derin denizlerde besin arayışı sırasında genellikle sürü halinde hareket etmektedir. Salp zincirinde, bir birey öncü lider rolünü üstlenirken, diğer bireyler onu takip etmektedir. Lider, grubun besin arayış sürecini yönlendirirken, diğer salplar da grubun ön kısmında konumlanarak hareketlerini sürdürmektedir. Salp sürülerinin bu kolektif hareketleri temel alınarak, Mirjalili ve arkadaşları tarafından Salp Sürüsü Optimizasyon (SSA) algoritması geliştirilmiş ve salp grubunun davranışları analitik olarak modellenmiştir [101].

n değişkenli bir optimizasyon problemi kapsamında, (i) numaralı salpın (x^i) konumu $x^i = \left[x_1^i,\ x_1^i, \cdots, x_n^i\right]$ şeklinde bir vektör olarak ifade edilmektedir. Bu durumda, salp zincirinin lideri, konumunu aşağıda verilen Denklem (4.19) doğrultusunda güncelleyerek hareket etmektedir.

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)c_2 + lb_j\right), c_3 > 0.5 \\ F_j - c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)c_2 + lb_j\right), c_3 \leq 0.5 \end{cases} \tag{4.19}$$

Yukarıda verilen denklemde, F_j, besin kaynağının (F) j'inci boyuttaki en iyi konumunu temsil etmektedir. ub_j ve lb_j sırasıyla j'inci boyuttaki üst ve alt sınırları ifade etmektedir. c_2 ve c_3 parametreleri [0,1] aralığında rastgele seçilen değerlerdir. c_1 parametresi ise Denklem (4.20) ile belirlenmektedir.

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{T}\right)^2} \tag{4.20}$$

Burada, t geçerli iterasyonu, T ise toplam iterasyon sayısını ifade etmektedir. Liderin konumu güncellendiğinde, takipçilerin konumlarını düzenlemek için Denklem (4.21) kullanılmaktadır.

$$x_j^i = \frac{1}{2}\left(x_j^i + x_j^{i-j}\right) \tag{4.21}$$

Burada, x_j^i, $2 \leq i \leq n$ aralığında olmak üzere, i numaralı salpın j'inci boyuttaki konumunu ifade etmektedir.

Yinelemeli süreç, başlangıçta yüksek c_1 değerleriyle başlamakta olup, bu durum liderin konumunda daha büyük rastgele değişimlere olanak tanımakta ve arama uzayının keşfini öncelemektedir. Zamanla c_1 parametresinin üstel olarak azalmasıyla birlikte, arama aşaması başlamaktadır; böylece lider, besin kaynağı çevresinde daha küçük ölçekli ayarlamalar yapabilmektedir.

Salp Sürüsü Optimizasyon (SSA) algoritmasının ortaya konulmasının ardından, çeşitli araştırmacılar algoritmanın performansını artırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalardan birinde, Tudose ve arkadaşları, özgün SSA algoritmasındaki zayıf bireyleri elemeye ve yeni bireyler üretmeye odaklanan ISSA önermişlerdir [45].

ISSA tarafından orijinal salp sürüsü algoritmasına getirilen iyileştirmeler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Salpların arama uzayında daha dengeli bir dağılımını sağlamak amacıyla, başlangıç popülasyonu için Karşıtlık Tabanlı Öğrenme (OBL) stratejisi kullanılmıştır. OBL, Tizhoosh tarafından 2005 yılında tanıtılan, karşıt bireylerin oluşturulmasından oluşan bir makine öğrenimi konseptidir [102]. Bu yaklaşım, arama uzayındaki çeşitliliği artırarak küresel en iyi çözüme ulaşma olasılığını yükseltmektedir. Söz konusu strateji Denklem (4.22) ile ifade edilmektedir.

$$\tilde{x}_j^i = ub_j + lb_j - x_j^i \tag{4.22}$$

- Önerilen başlangıç yöntemi, toplam popülasyonun (N_{tot}) sayısından daha fazla başlangıç bireyi (N_{init}) seçmeyi içermektedir. Bu yaklaşım, başlangıç popülasyonunun çeşitliliğini

artırarak daha etkili bir arama süreci sağlamayı amaçlamaktadır. Başlangıç bireylerinin %50'si ($N_{init}/2$), standart rastgeleleştirilmiş yöntem kullanılarak üretilirken, geri kalan bireyler, Denklem (4.22) kullanılarak karşıt bireyler olarak oluşturulmaktadır. ISSA algoritmasının ilk iterasyonunda, her başlangıç bireyi için amaç fonksiyonu hesaplanmakta ve en iyi N_{tot} bireyi seçilerek sonraki iterasyonlara taşınmaktadır.

- Keşif yeteneklerini artırmak amacıyla, lider salplarla benzer işlev gören kâşif salplar sürüye entegre edilmiştir. Denklem (4.21) doğrultusunda, her ardışık salp bir önceki salptan etkilenmektedir. Önceki salpların performansa dayalı sıralaması göz önünde bulundurulduğunda, bu yöntemle daha yüksek bir yakınsama oranına ulaşılabilmektedir. Bu bağlamda, en iyi performansı gösteren salp lider olarak belirlenirken, N_{exp} kâşif salp olarak değerlendirilmekte ve N_{fol} takipçi salp olarak atanmaktadır ($N_{fol} = N_{tot} - 1 - N_{exp}$). Son olarak, iterasyonlar ilerledikçe, kâşif salp sayısı dinamik olarak güncellenerek keşif sürecinin etkinliği artırılmaktadır.
- Önerilen üçüncü iyileştirme, sömürü sürecinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla, klasik çaprazlama operatörü kâşif salplar için ek bir konum güncelleme mekanizması olarak entegre edilmiştir. Bu operatör, iteratif süreç boyunca artan bir olasılıkla (p_{CO}) etkinleştirilmektedir ve optimizasyon sürecinin daha verimli bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Çaprazlama operatörü, seçilen kâşif salp ile besin kaynağı arasındaki ağırlıklı ortalama kullanılarak yeni bir birey üretmektedir. Buna ek olarak, Denklem (4.23) kullanılarak çaprazlama operatörüne alternatif bir varyasyon getirilmiştir. Bu ikinci yaklaşım, p_{CO} olasılığı korunarak besin kaynağının yeni birey üzerindeki etkisini artırmayı amaçlamaktadır.

$$x_j^i = \begin{cases} F_j \cdot r_2 + x_j^i(1 - r_2),\ r_1 > 0.5 \\ F_j \cdot \left(1 - \frac{r_2}{2}\right) + x_j^i \cdot \frac{r_2}{2}, r_1 \leq 0.5 \end{cases} \tag{4.23}$$

Burada r_1 ve r_2 [0-1] aralığındaki rastgele rakamlardır.

- Üçüncü iyileştirme kapsamında, yerel optimumda takılma olasılığını azaltmak amacıyla, yalnızca takipçi salplara uygulanan bir mutasyon operatörü (p_{mut}) entegre edilmiştir. Bu operatör, takipçi salpların çeşitliliğini artırarak, arama sürecinin daha etkili bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Mutasyona uğrayan takipçi salp, rastgele seçilen bir salpın konumunu kopyalamakta ve ardından bu konumun yakınında bir kâşif salp gibi hareket etmektedir. Böylece, popülasyon içinde yenilikçi çözümler oluşturulmakta ve algoritmanın yerel optimuma sıkışma riski azaltılmaktadır. İterasyonlar ilerledikçe, mutasyon olasılığı p_{mut} doğrusal olarak azalmaktadır, böylece arama sürecine aşırı müdahale edilmesi

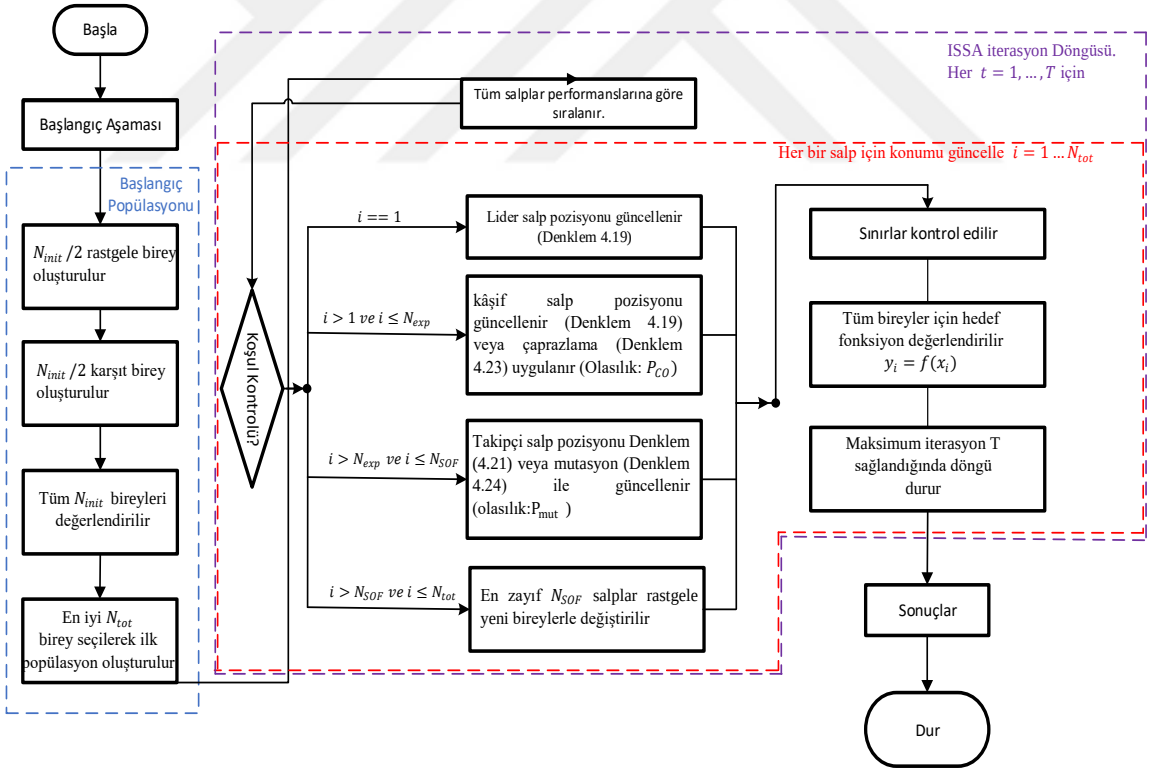
önlenmektedir. Bu dinamik süreç, Denklem (4.24) ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$x_j^1 = \begin{cases} x_j + m_1\left((ub_j - lb_j)m_2 + lb_j\right), m_3 > 0.5 \\ x_j - m_1\left((ub_j - lb_j)m_2 + lb_j\right), m_3 \leq 0.5 \end{cases} \quad (4.24)$$

Burada m_1, m_2 ve m_3 [0-1] aralığında olmak üzere rastgele seçilmektedir.

Evrimsel meta-sezgisel algoritmalar, en güçlü bireylerin hayatta kalması (Survival of the Fittest - SOF) ilkesine dayanmaktadır. Bu doğrultuda, ISSA algoritması, düşük performans gösteren salpların (N_{SOF}) elenmesini sağlayan bir mekanizmayı da entegre etmektedir. Bu eleme mekanizması, popülasyonun daha yüksek kaliteli bireylerden oluşmasını sağlayarak optimizasyon sürecinin etkinliğini artırmaktadır. Böylece, daha güçlü ve uygun çözümler üreten bireylerin korunması, zayıf bireylerin ise süreçten çıkarılması sağlanmaktadır.

Şekil 4.8, yukarıda belirtilen değişiklikleri içeren ISSA algoritmasının akış şemasını göstermektedir.



Şekil 4.8. ISSA'nın akış diyagramı

4.6.2. Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması

CIOA, mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için OAP de Souza ve LFF Miguel tarafından geliştirilmiş bir meta-sezgisel algoritmadır. Algoritma, klasik trigonometri

çemberinden türetilmiş matematiksel ilişkileri kullanarak, arama ajanlarının problem uzayında etkili şekilde gezinmesini sağlar. CIOA, optimizasyon sürecinde global ve lokal arama dengesini sağlamayı hedefler ve çeşitli mühendislik problemlerinde test edilerek yüksek performans göstermiştir. CIOA, arama ajanlarının çember hareketi ilkesi doğrultusunda belirli açılar ve yarıçaplarla konumlarını güncelleyerek, en iyi çözüme adım adım yaklaşmalarını sağlar. En iyi çözümleri üreten ajanlar daha dar yarıçaplarla yerel arama yaparken, düşük performans gösteren ajanlar daha geniş yarıçaplarla küresel arama gerçekleştirerek çözüm uzayında çeşitliliği artırır. Böylece, CIOA algoritması, çözüm hassasiyetini ve yakınsama hızını optimize eden dengeli bir keşif ve sömürü mekanizması sunar.

CIOA'nın başlatılması

CIOA'da her arama ajanı, kullanıcı tarafından belirlenen θ açısı ve algoritma tarafından hesaplanan r yarıçapı doğrultusunda hareket eder. r değeri, ajanın amaç fonksiyonundaki başarısına bağlı olarak dinamik bir şekilde güncellenir ve daha iyi performans gösteren ajanların r değeri bir sonraki iterasyonda azalır. Bu mekanizma daha başarılı arama ajanlarının daha küçük adımlarla hareket etmesini sağlayarak yerel arama sürecini iyileştirmeye katkıda bulunur. CIOA, başlangıçta bir $\vec{r}$ vektörü oluşturarak başlatılır ve her r_j öğesi Denklem (4.25) ile hesaplanır.

$$r_j = \frac{c_r . j^2}{N_{ag}}, 1 \leq j \leq N_{ag} \tag{4.25}$$

Burada N_{ag}, arama ajanlarının sayısını, c_r ise Denklem (4.26) ile belirlenen bir sabiti ifade eder. Yarıçap vektörünün elemanları artan sırayla düzenlenir; ilk eleman $r_1 = c_r / N_{ag}$ olarak, son eleman ise $r_{N_{ag}} = c_r . N_{ag}$ olarak tanımlanır.

$$c_r = \sqrt{\frac{U_b - L_b}{N_{ag}}} \tag{4.26}$$

Burada U_b ve L_b, her değişkenin alabileceği maksimum ve minimum değerleri belirtir.
Her arama ajanı, ilk çözümde tasarım değişkenlerine rastgele değerler atadıktan sonra amaç fonksiyonu değerlendirilir. Ardından, her arama ajanı, elde ettiği çözümün kalitesine göre sıralanarak derecelendirilir.

CIOA'nın Ana Döngüsü

Her iterasyonda, arama ajanlarının yeni konumları, önceki iterasyonda elde ettikleri başarı sırasına göre belirlenir. Daha iyi çözümler bulan ajanlar, daha küçük adımlarla hareket ederken, daha düşük performans gösteren ajanlar daha büyük adımlarla ilerler.

Bir arama ajanı $k.$ iterasyonda $j.$ en iyi sonucu elde ettiyse, $k + 1.$ iterasyondaki yeni konumu Denklem (3,27) ve (3,28) ile güncellenir.

$$x_{2i}(k+1) = x_{2i}(k) - rand_1.rj.\sin(k.\theta) + rand_2.rj.\sin\big((k+1).\theta\big) \quad (4.27)$$

$$x_{2i-1}\,(k+1) = x_{2i-1}(k) - rand_3.rj.\cos(k.\theta) + rand_4.rj.\cos\big((k+1).\theta\big) \quad (4.28)$$

Bu süreçte, $2i$ ve $2i-1$ ifadeleri sırasıyla çift ve tek sayıları temsil eder. Denklem (4.27) çift indeksli koordinatları (x_2, x_4, x_6, ...) güncellerken, Denklem (4.28) tek indeksli koordinatları (x_1, x_3, x_5, ...) günceller. rand değişkenleri, 0 ile 1 arasında eşit dağılımlı rastgele değerlerdir. Kullanıcı tarafından belirlenen θ açısı, hareket yönünü belirlerken, r_j, $\vec{r}$ vektörünün $j.$ en küçük elemanına karşılık gelir.

Bir ajan, belirli bir iterasyonda θ açısı ve r yarıçapı ile bir noktadan diğerine hareket eder. Sonraki iterasyonda, yine aynı açı korunarak hareket edilir, ancak yarıçap değişebilir. Bu süreç üç farklı senaryo oluşturur. Eğer ajan daha iyi bir sıralama elde ederse, hareket yarıçapı küçülür. Eğer ajan aynı sıralamaya sahip olursa, hareket yarıçapı sabit kalır. Buna karşılık, eğer ajan daha kötü bir sıralama elde ederse, hareket yarıçapı büyür.

Eğer bir iterasyonda x_i değişkeni, U_b üst sınır değerinden büyük veya L_b alt sınır değerinden küçük olursa, bu değişken önceki iterasyonda en iyi çözümü bulan arama ajanının x_i değeriyle değiştirilir.

Ayrıca, her k iterasyonda, ajanlar tam bir tur tamamladığında ($k \cdot \theta$ 360°'nin katı olduğunda), yakınsama hızını artırmak amacıyla yarıçap vektörü güncellenir. Bu işlem, aşağıdaki formüle göre gerçekleştirilir:

$$\vec{r}_{new} = \vec{r} * 0{,}9 \quad (4.29)$$

Bu sayede, ajanların hareket mesafeleri giderek küçülerek algoritmanın daha hızlı yakınsama sağlaması amaçlanır.

Yerel Arama Aşaması

Önerilen CIOA algoritmasının temel döngüsü, küresel ve yerel aramaları aynı anda yürütecek şekilde tasarlanmıştır. Bunun sebebi, en iyi çözümleri üreten ajanların daha küçük ölçekli hareketler gerçekleştirerek yerel arama sürecini temsil etmesi, en zayıf çözümleri bulan ajanların ise daha büyük ölçekli hareketlerle küresel arama sürecine katkıda bulunmasıdır. Ancak, algoritmanın belirli bir aşamada yalnızca yerel arama yapmasını sağlamak, çözüm uzayının daha verimli bir şekilde taranması açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, ajanların arama sürecinde yalnızca en umut verici bölgelere odaklanmasını sağlayan bir mekanizma geliştirilmiştir.

Bu aşamanın etkin yönetimi için $Glob_{lt}$ adı verilen bir parametre tanımlanmıştır. Bu parametre, algoritmanın yalnızca yerel arama gerçekleştirdiği iterasyonların toplam iterasyon sayısına oranını ifade eder ve $[0-1]$ aralığında seçilebilir. Ancak, literatürde en iyi performansın $0{,}75 \leq Glob_{lt} \leq 0{,}95$ aralığında elde edildiği belirtilmektedir. Belirlenen eşik değerini aşan bir noktada, yani toplam iterasyon sayısı ile mevcut iterasyon k arasındaki oran $Glob_{lt}$ değerinden büyük olduğunda, algoritma yalnızca yerel aramaya odaklanacak şekilde yapılandırılır. Bu noktada, tüm arama ajanları, o ana kadar elde edilen en iyi çözüm noktasına yeniden konumlandırılır. Ayrıca, çözüm uzayındaki değişkenlerin sınırları güncellenerek, belirlenen değişken aralıkları daraltılır. Böylece, her bir değişkenin üst ve alt sınırları U_{b1_i} ve L_{b1_i} olarak yeniden belirlenir. Bu yeni sınırlar aşağıdaki denklemler aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$U_{b1_i} = x_{i_{best}} + \frac{U_b - L_b}{10000} \tag{4.30}$$

$$L_{b1_i} = x_{i_{best}} - \frac{U_b - L_b}{10000} \tag{4.31}$$

Burada, $x_{i_{best}}$ değeri, ilgili değişkenin en iyi çözümü verdiği noktayı ifade etmektedir.

Yerel arama süreci başlatıldıktan sonra, algoritma, küresel arama aşamasında kullanılan temel kurallara benzer şekilde çalışmaya devam eder. Ancak, bu aşamada arama uzayı daraltılmış olup, U_b ve L_b sınırlarının yerine U_{b1_i} ve L_{b1_i} kullanılır. Bu yöntem, değişkenlerin değerlerinin en iyi çözümü üreten bölgelere daha yakın kalmasını sağlar.

Özellikle, $L_{b1_i} < L_b$ veya $U_{b1_i} > U_b$ olması durumlarında, herhangi bir tasarım değişkeninin değeri bu yeni sınırlar dışında kalırsa, algoritma bu değeri otomatik olarak sınırların içine çekecek şekilde günceller. Yani, değişken değeri $x_i = L_b$ veya $x_i = U_b$ olacak şekilde düzeltilir. Bu yöntem, algoritmanın arama sürecinde en iyi çözüme yakın bölgelerde yoğunlaşmasını sağlayarak optimizasyonun etkinliğini artırmaktadır. CIOA'nın akışı Şekil 4.9'da sunulmuştur.

Çemberden Esinlenen Optimizasyon Algoritması

Başla:

θ ve $Glob_{lt}$ değerlerini tanımla

Denklem 4.25'e göre $\vec{r}$ yarıçap vektörünü başlat

Tasarım değişkenlerine rastgele değerler ata

Her arama ajanı için amaç fonksiyonunu değerlendir

While 1 ($k \leq Glob_{lt} \times Maksimum\ iterasyon\ sayısı$)

Elde edilen çözümün kalitesine göre arama ajanlarını sınıflandır

Denklem 4.27 ve 4.28'i kullanarak ajanların pozisyonlarını güncelle

Bir arama ajanının tasarım değişkeninin belirlenen sınırlarını aşıp aşmadığını doğrula

If ($k \cdot \theta$ 360°'nin katı ise)

$\vec{r}$ yarıçap vektörünü Denklem 4.29 ile güncelle

End If

End While 1

Tüm ajanları, şimdiye kadar en iyi çözümü üreten konuma yerleştir

Denklem 4.30 ve 4.31'e göre değişkenlerin aralığını güncelle

While 2 ($k \leq Maksimum\ iterasyon\ sayısı$)

While 1'de tanımlanan prosedürleri, yeni değişken aralığını kullanarak tekrarla

End While 2

Sonuçların görselleştirilmesi

Bitiş

Şekil 4.9. CIOA'nın akış yapısı

5. GELİŞTİRİLEN KONTROL STRATEJİLERİ VE UYGULAMALARI

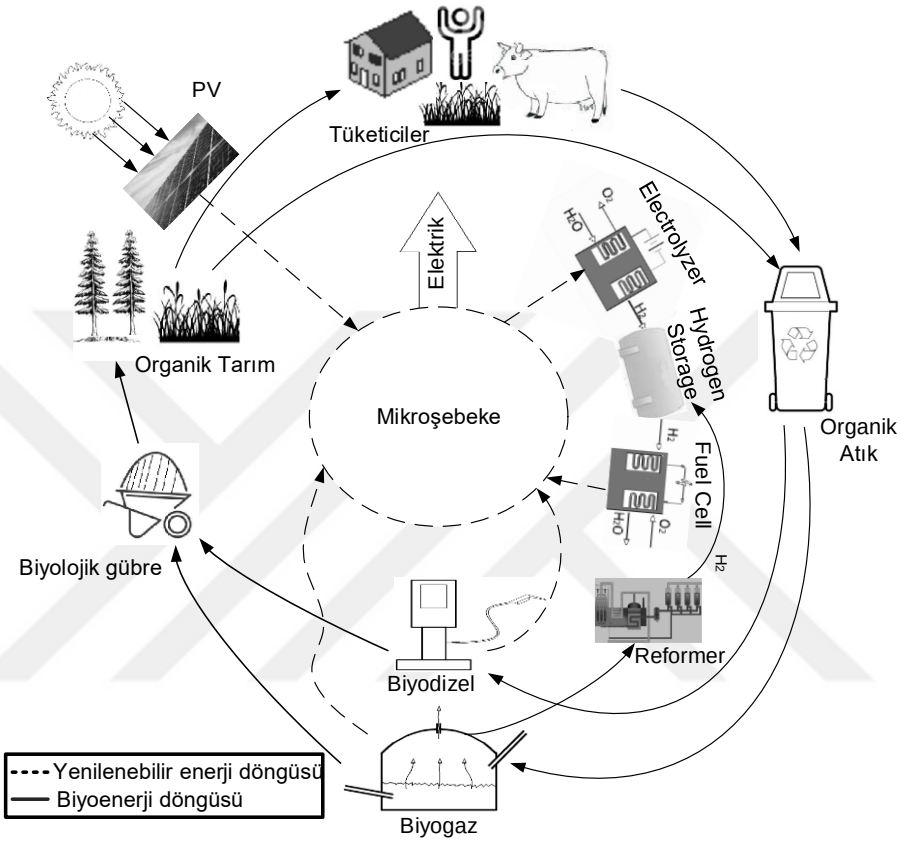
İzole mikroşebeke sistemlerinde frekans kararlılığının sağlanması, özellikle YEK'in dalgalı üretim karakteristiği ve sistem ataletindeki azalma gibi etkenlerle daha karmaşık hale gelmiştir. Bu bağlamda, klasik kontrol yöntemlerinin sınırlı etkinliği, daha esnek ve uyarlanabilir kontrol stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu tez kapsamında, izole çalışma modundaki tek ve çok bölgeli mikroşebekelerde frekans kararlılığını artırmak amacıyla dört farklı yenilikçi kontrol yapısı tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Her bir kontrol stratejisi, farklı yapılar, hedefler ve destekleyici enerji teknolojileri ile yapılandırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan ilk çalışmada, AE ve FC destekli bir izole tek bölgeli mikroşebeke yapısında YFK için C-DIT2-FLC önerilmiştir [103]. İkinci çalışmada, iki bölgeli bir mikroşebeke için hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri ve talep tarafı yönetim stratejileri ile desteklenen yenilikçi bir YFK yapısı sunulmaktadır [104]. Üçüncü çalışmada ise, mikroşebekenin YFK için DIT2FLC-FOTID yapısında yeni bir kaskat kontrol stratejisi geliştirilmiş ve tasarlanan kontrol yapısının siber saldırılar altındaki performansı değerlendirilmiştir [105]. Son olarak, dördüncü çalışmada Tip-II bulanık mantıkla desteklenmiş kesirli dereceli kaskat kontrolör önerilmiş; kontrolör parametreleri CIOA ile optimize edilmiştir. Bu yapının geçerliliği, OPAL-RT donanımı kullanılarak gerçekleştirilen gerçek zamanlı uygulama ile doğrulanmıştır.

Tüm bu çalışmalar kapsamında geliştirilen kontrol stratejileri, öncelikle MATLAB/ Simulink ortamında sürekli zamanlı modellerle test edilmiştir. Ancak sayısal benzetimlerin doğası gereği, sistem dinamikleri ayrık zamanlı olarak çözümlenmekte; bu durum, örnekleme periyodu gibi kritik parametrelerin sistem kararlılığı üzerindeki etkisini önemli hale getirmektedir. Bu nedenle, son çalışma ile önerilen kontrolörlerin sayısal uygulamalardaki geçerliliğini güvence altına almak amacıyla ayrık zamanlı kararlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve sistemin maksimum kararlı örnekleme zamanı belirlenmiştir. Gerçek zamanlı OPAL-RT platformunda yapılan doğrulama, yalnızca performans analizine değil; aynı zamanda ayrık zamanlı benzetimlerin fiziksel sistem davranışına ne ölçüde karşılık geldiğinin test edilmesine de olanak tanımıştır. Böylece, donanım tabanlı testler aracılığıyla yazılım temelli sonuçların tutarlılığı ortaya konmuş ve geliştirilen kontrol stratejisinin gerçek zamanlı uygulamalar için uygunluğu bütüncül biçimde değerlendirilmiştir.

5.1. Hidrojen-Yakıt Pili Entegreli Yenilikçi Bir Frekans Kontrol Cihazına Sahip İzole Mikroşebeke Sistemi

Tez çalışmasının bu bölümünde, geleneksel güç sistemlerinin dezavantajlarını azaltmak amacıyla güneş enerjisi ve biyolojik atıklardan enerji üreten yenilikçi bir mikroşebeke sistemi önerilmiştir. Şekil 5.1'de önerilen mikroşebekenin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Otonom mikroşebeke enerji sistemi

Sistem, enerji sürdürülebilirliğini sağlamak ve genel verimliliği artırmak amacıyla AE ve reformer içermektedir. AE, talep fazlası elektrik enerjisini hidrojene dönüştürmek ve depolamak için kullanılır. Reformer ise fazla biyogazdan hidrojen üretir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen, ihtiyaç halinde yakıt pilleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu süreç, talep fazlası enerjiyi depolayarak arz-talep dengesini sağlamada kritik bir rol oynarken, aynı zamanda mikroşebekelerde frekans kararlılığını destekleyerek ani güç dalgalanmalarının etkisini azaltır. Böylece, yenilenebilir kaynakların değişken doğasına uyum sağlanarak daha sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji yönetimi mümkün hale gelir.

Kesintili ve düzensiz YEK'e sahip mikroşebekelerde YFK, güçlü ve uygun kontrol çözümleri gerektirmektedir. Bu çalışma, mikroşebekelerin frekans kararlılığını sağlamak için yenilikçi bir kontrol mekanizması geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu doğrultuda, Mikroşebekenin

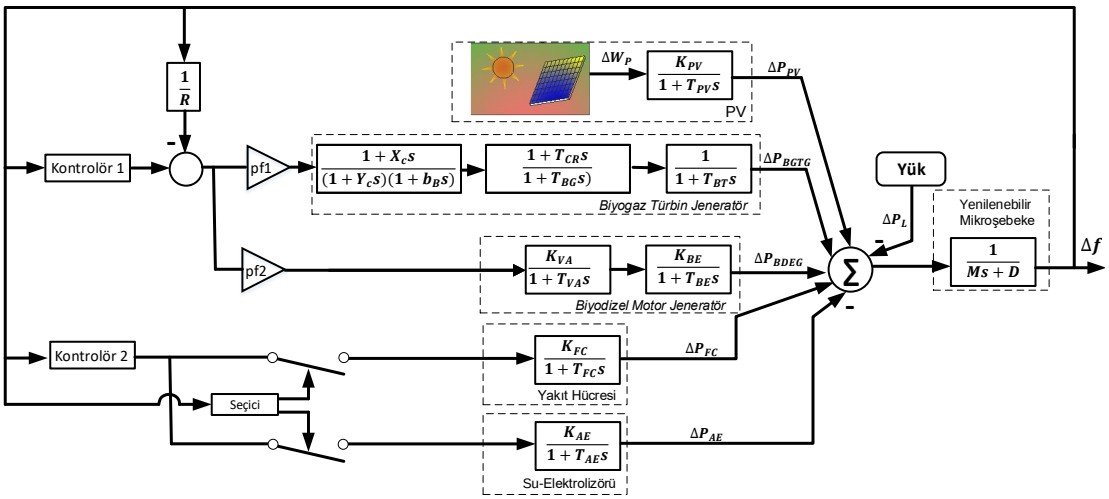
YFK'sı için C-DIT2-FLC önerilmiştir. Önerilen kontrolörün kazançları, yakın zamanda geliştirilen, sezgisel bir optimizasyon tekniği olan ISSA ile belirlenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı üretim kaynaklarına sahip bir mikroşebeke sisteminde, özellikle hidrojen bazlı yakıtlar göz önünde bulundurularak, YFK için daha sağlam ve esnek bir yaklaşım sunmaktır. Araştırma, hidrojen-yakıt pillerini mikroşebekelere entegre ederek YFK mekanizmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışmanın bazı önemli katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çiftlik konseptine uygun, çevre dostu bir mikro şebeke topolojisi geliştirilmiştir. Bu sistem, BGTG, BDEG, PV paneller, FC ve AE ünitelerini içermektedir.
- Geleneksel sabit güç değişimlerine dayalı kontrol senaryolarının aksine [106,107], bu çalışmada gerçek zamanlı kaydedilmiş güneş verileri kullanılarak, gerçeğe daha uygun analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır.
- Literatürdeki birçok YFK araştırmasının aksine [106-111], önerilen tasarım, sistem belirsizliklerini azaltmak için kademeli bir kontrol şeması önermektedir.
- Farklı belirsizlik koşulları altında (PV üretimi ve yük değişimleri), yeni bir C-DIT2-FLC kontrolörü önerilmiş ve bu kontrolörün parametreleri sistem dinamiklerine göre optimize edilmiştir.
- PI-PD kontrolörlerinin kazanç ayarlarını iyileştirmek için, ISSA uygulanmıştır.
- Önerilen C-DIT2-FLC kontrolörünün farklı çalışma koşullarındaki performansı, literatürdeki Bulanık Tip-1 PI-PD [112] ve geleneksel PI-PD kontrolörleriyle [113-115] karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

5.1.1. Yakıt Hücreli Mikroşebekenin Modellemesi

İzole mikro şebekelerde, belirli bir bölgenin enerji kaynakları ekolojik koşullar ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak kullanılmalıdır. YEK'in kesintili ve değişken yapısı nedeniyle, enerji depolama teknikleri ve gelişmiş bir enerji yönetim stratejisi gerekmektedir. Bu bağlamda, FC ve AE, enerji yönetimi ve depolama süreçlerinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, bir çiftlikte YEK'i verimli kullanmayı amaçlayan bir mikro şebeke modeli önerilmiştir. Önerilen mikro şebeke; BGTG, BDEG, PV, FC, AE ve Reformer ünitelerinden oluşmaktadır. Önerilen mikroşebekenin YFK modeli Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Mikroşebeke YFK modeli

Mikroşebeke sistemin modellemesinde kullanılan parametreler Tablo 5.1'de sunulmuştur [66,67,73].

Tablo 5.1. Mikroşebekenin parametreleri

Sembol	Değer	Sembol	Değer
$K_{PV;}\ T_{PV}$	1; 1,8 s	$K_{ES;}\ T_{ES}$	0,002; 0,5s
$X_{c,}\ ;Y_{c,;}\ b_B$	0,6;1s; 0,05	M; D; R	0,2s; 0,012; 2,4
$T_{CR;}\ T_{BG;}\ T_{BT}$	0,01s; 0,23s; 0,2s	$K_{FC;}\ T_{FC}$	0,01; 4,0s
$K_{VA;}\ T_{VA}$	1;0,05s	$K_{BE;}\ T_{BE}$	1; 0,5s

Mikro şebekede YFK, yük talebinin her an karşılanmasıyla sağlanmaktadır. Ancak, güneş ışınım süresi gündüz saatleriyle sınırlı olup iklim koşullarına bağlıdır. Ayrıca, biyogaz ve biyodizel tesislerinde enerjiye dönüştürülen atıklar ve enerji bitkileri çevresel koşullara göre değişkenlik göstermektedir. Bu elektrik üretim sistemlerinin kesintili ve değişken yapısı, enerji yönetimi ve depolama tekniklerinin önemini artırmaktadır. Sistemde fazla enerji üretildiğinde, AE hidrojen üretip depolar. Ayrıca, sistemde fazla biyogaz bulunması durumunda, metan gazı (CH_4) çeşitli işlemlerle hidrojen ve karbon atomlarına ayrıştırılarak hidrojen depolanmaktadır. Elektrik enerjisine gereksinim duyulduğunda, depolanan hidrojen FC'de yakıt olarak kullanılarak sürdürülebilirlik sağlanmaktadır.

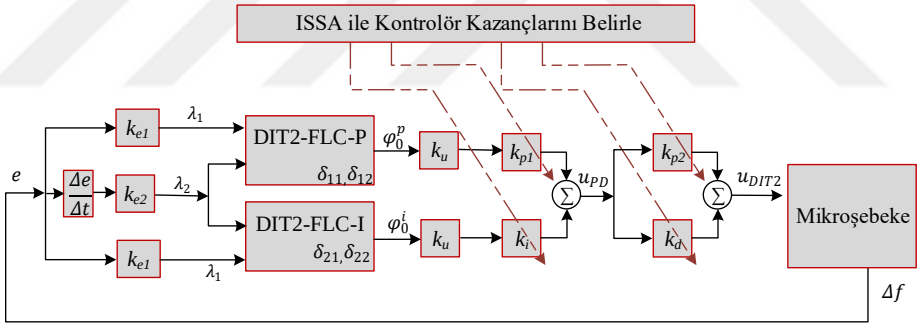
Mikro şebekede üretilen ve tüketilen enerji arasındaki denge bozulduğunda, sistem frekansında sapmalara neden olur. Bu dengenin sağlanması için Kontrolör 1, BGTG ve BDEG'yi yönetir. BGTG ve BDEG ünitelerinin YFK'ya katılım oranları, sırasıyla biyogaz ve biyodizel

kapasitelerine bağlı olarak belirlenen $pf1$ ve $pf2$ katsayıları ile ayarlanmaktadır. Kontrolör 2 fazla enerjiyi hidrojene dönüştüren AE'yi ve üretilen hidrojeni elektrik enerjisine çeviren FC'yi kontrol etmektedir. Bu kontrol yapısı, arz ve talep dengesinin istikrarlı bir şekilde sürdürülmesini sağlamaktadır. Modeli oluşturan her birime ait matematiksel ifadeler Bölüm 3'te açıklanmıştır.

5.1.2. Kontrolör Dizaynı

İzole mikro şebekelerde YEK'in varlığında, frekans kararlılığının sağlanması istikrarlı kontrol stratejilerine bağlıdır. Bu amaçla, mikro şebekenin YFK'sının en iyi yanıtı vermesi için C-DIT2-FLC önerilmiştir. Kademeli kontrol yapısı, önemli ve uzun süreli sapmalar karşısında geleneksel tek çevrimli kontrol yapısına kıyasla daha iyi performans sergilemektedir [115,116].

Önerilen kontrolör yapısı, PI-PD kademeli kontrolör içermektedir. Kontrol stratejisi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, PI-PD kademeli kontrolörün kazançları ISSA ile belirlenmektedir. Mikroşebekenin en iyi frekans yanıtını sağlayabilmek için, ikinci aşamada PI kontrolör kazançları DIT2FLC ile ayarlanmaktadır. Mikro şebekede frekans sapmalarını azaltmak ve kararlı durum koşullarını sağlamak amacıyla tasarlanan C-DIT2-FLC kontrol yapısı Şekil 5.3'te sunulmaktadır.



Şekil 5.3. C-DIT2-FLC'nin Şematik Diyagramı

Şekil 5.3'te, k_{e1} ve k_{e2} sırasıyla DIT2FLC'nin giriş ölçekleme faktörlerini (SF) ifade etmektedir. Bu faktörler $k_{e1} = 1/e_{max}$ ve $k_{e2} = 1/\left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right)_{max}$ olarak tanımlanmaktadır. e_{max}, maksimum geri besleme hatası iken, $\left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right)_{max}$ ise geri besleme hatasındaki maksimum değişimi temsil etmektedir. Geri besleme hatasının (e) k_{e1} ile çarpımıyla normalize edilmesi, DIT2FLC'nin λ_1 girişini, hatanın türev değerinin $(\frac{\Delta e}{\Delta t})$ k_{e2} ile çarpımıyla normalize edilmesi ise DIT2FLC'nin λ_2 girişini oluşturmaktadır. PI kontrolün oransal kontrolü için giriş sinyali DIT2-FLC-P bulanık denetleyicisiyle elde edilir ve φ_0^p ile temsil edilir. Benzer şekilde PI kontrolün integral kontrolü için giriş sinyali DIT2-FLC-I bulanık denetleyicisiyle elde edilir ve φ_0^i ile temsil edilir. Her iki DIT2FLC aynı üyelik fonksiyonlarına sahiptir.

Denklem (5.1)'de verilen PD kontrolörünün giriş sinyali, DIT2FLC'nin girişlerine bağlı olarak elde edilen φ_0 çıkışlarından elde edilmektedir.

$$U_{PD} = k_u(k_{p1}.\varphi_0^p + k_i \int \varphi_0^i \, dt) \tag{5.1}$$

Denklem (5.1)'de, k_{p1} ve k_i, PI kontrolörünün kazançlarını, k_u ise DIT2FLC'nin çıkış ölçekleme faktörünü ifade etmektedir. k_u, aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [95,117].

$$k_u = 1/k_{e1} \tag{5.2}$$

Bu durumda C-DIT2-FLC'nin çıkış sinyali U_{DIT2} Denklem (5.3) ile elde edilir.

$$U_{DIT2} = U_{PD}.\left[k_{p2} + k_d\left(\frac{N}{1+\frac{N}{s}}\right)\right] \tag{5.3}$$

Denklem (5.3)'te k_{p2}, k_d ve N sırasıyla PD kontrolörünün oransal kazancını, türev kazancını ve filtre katsayısını ifade etmektedir.

DIT2FLC'nin Tasarımı

DIT2FLC'nin genel yapısı ve çalışma prensipleri hakkında detaylı bilgiler Bölüm 4.5.1'de sunulmuştur. Bu alt bölümde ise C-DIT2-FLC'nin tasarım sürecinde DIT2-FLC'nin nasıl yapılandırıldığı açıklanmaktadır. IT2-FS'lerin FOU'larını belirleyen m_i değerleri aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$\begin{cases} m_1 = m_3 = 1 - \delta_{IT2} \\ m_2 = \delta_{IT2} \end{cases} \tag{5.4}$$

Denklem (5.4)'de δ_{IT2}, IT2-FS'lerin FOU'sunu oluşturan tek ayarlanabilir değişkendir ve DIT2-FLC-P için δ_{DIT2}^p ile DIT2-FLC-I için ise δ_{DIT2}^i ile sembolize edilmiştir. IT2-FLC'nin bulanık eşleme (Fuzzy matching-FM) fonksiyonu $\varphi_0(\lambda)$, aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\varphi_0(\lambda) = \lambda.k(|\lambda|) \tag{5.5}$$

Burada, $k(\lambda)$, IT2-FLC'nin kazancı olup, Denklem (5.6) ile belirlenmektedir.

$$k(\lambda) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\delta_{IT2}+\lambda-\delta_{IT2}\lambda} + \frac{\delta_{IT2}-1}{\delta_{IT2}\lambda-1}\right) \tag{5.6}$$

IT2-FLC'nin tasarımı, Denklem (5.6) kullanılarak kontrol eğrisi (CC) oluşturulmasına indirgenmiştir. Tablo 5.2'de sunulan üç farklı CC, Denklem (5.7) ile tanımlanarak oluşturulabilmektedir.

$$\varepsilon_0(\lambda) = \varphi_0(\lambda) - \lambda.\,\varepsilon_0(\lambda). \tag{5.7}$$

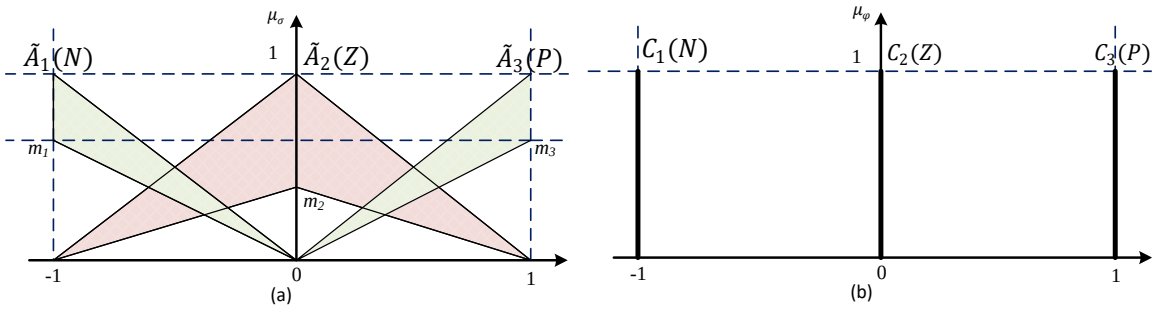
Denklemde yer alan $\varepsilon_0(\lambda)$, CC'nin hata fonksiyonu veya kontrol sapması olarak tanımlanabilir. Bu terim, IT2-FLC'nin çıkışı olan bulanık eşleme fonksiyonu $\varphi_0(\lambda)$ ile giriş değişkeni (λ) arasındaki farkı temsil eder.

Tablo 5.2. δ_{IT2} değerine göre CC sınıflandırılması

Durum	Dizayn Değişkenleri	CC Tipi
Durum 1	If $0 < \delta_{IT2} \leq 0{,}382$ then $\varepsilon > 0$ for $\forall_\lambda \in [0{,}1)$	Agresif CC (A-CC)
Durum 2	If $0{,}618 \leq \delta_{IT2} < 1$ then $\varepsilon < 0$ for $\forall_\lambda \in [0{,}1)$	Sakin CC (S-CC)
Durum 3	If $0{,}382 < \delta_{IT2} < 0{,}618$ then $\varepsilon > 0$ for $\forall_\lambda \in [0\ 0{,}5)$ and $\varepsilon < 0$ for $\forall_\lambda \in [0{,}5\ 1)$	Orta Seviye CC (M-CC)

δ_{IT2} parametresi, A-CC, M-CC ve S-CC eğrilerini oluşturmak için sırasıyla $\{0{,}2\ 0{,}3\}$, $\{0{,}4\ 0{,}5\ 0{,}6\}$, ve $\{0{,}7\ 0{,}8\}$ olarak seçilebilir. λ sıfıra yaklaştığında, Agresif Kontrol Eğrisi (A-CC), Sakin Kontrol Eğrisi (S-CC) ile kıyaslandığında daha yüksek etkililiğe sahiptir. Bunun aksine, giriş sinyali ±1 değerlerine yaklaştığında, S-CC'nin hassasiyeti A-CC'den daha yüksek olmaktadır. Orta Seviye Kontrol Eğrisi (M-CC), A-CC ve S-CC'nin birleşiminden oluştuğundan, giriş sinyali ±1 değerlerine yaklaştığında düşük hassasiyet, ancak giriş sinyali sıfıra yaklaştığında yüksek hassasiyet göstermektedir.

Giriş ve çıkış fonksiyonları için Şekil 5.4'te gösterildiği gibi Pozitif (P), Sıfır (Z) ve Negatif (N) olmak üzere üç üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur.



Şekil 5.4. **(a)** DIT2FLC'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** DIT2FLC'nin tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları

DIT2FLC'nin kural tablosu Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.3. DIT2FLC'nin kural tablosu

λ_1	λ_2		
	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Kontrolör Parametrelerinin ISSA ile Optimizasyonu

C-DIT2-FLC kontrolörünün kazançları, ISSA kullanılarak belirlenmiştir. Optimizasyon süreçlerinde amaç fonksiyonu, sistem performansını iyileştirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Kontrolör kazançlarının optimum şekilde ayarlanması amacıyla, amaç fonksiyonu ITAE fonksiyonuna dayalı olarak oluşturulmuştur. Bu amaç fonksiyonunun matematiksel formülasyonu Denklem (5.8)'de sunulmaktadır.

$$J = \int_0^{t_{sim}} t.|\Delta f|\, dt \tag{5.8}$$

Bu çalışmada tasarlanan mikro şebekede YFK, aynı yapıya sahip iki C-DIT2-LFC kontrolör tarafından gerçekleştirilmiştir. Kontrolör parametreleri, ISSA kullanılarak optimize edilmiştir. Parametre optimizasyonu, BGTG ve BDEG'nin YFK'ye eşit katılım sağladığı ($pf1 = pf2 = 0{,}5$) koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, $t = 0$ anında mikroşebeke sistemine $\Delta P_{PV} = 0{,}3$ pu büyüklüğünde bir güneş enerjisi değişimi ve $\Delta P_L = 0{,}1$ pu büyüklüğünde bir yük değişimi uygulanmıştır. Benzetim süresi 20 saniye olarak belirlenmiştir. ISSA algoritmasının optimizasyon parametreleri olan N_{tot}, N_{init} ve T sırasıyla 20, 8 ve 70 olarak atanmıştır. Sistem performansının değerlendirilmesi amacıyla, performans kriteri olarak ITAE kullanılmıştır. Bu doğrultuda, ISSA algoritması ile belirlenen kontrolör kazançları Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.4. ISSA ile belirlenen kontrolör kazançları

Kontrolörler	Kontrolör kazançları			
	k_{p1}	k_i	k_{p2}	k_d
Kontrolör 1	-1,872	-3,848	3,317	1,557
	k_{p1}	k_i	k_{p2}	k_d
Kontrolör 2	-1,784	-4,493	-3,490	0,982

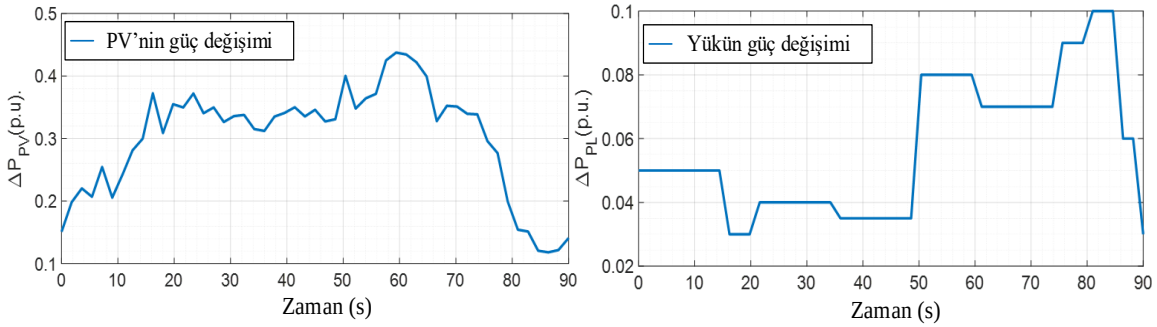
5.1.3. Benzetim Bulguları

Bu bölümde, izole bir mikroşebekenin frekans tepkisini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen zaman domeni benzetimleri üzerinden, C-DIT2-FLC kontrolörünün sistem kararlılığına ve frekans sapmasına etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, güneş ışınımındaki gerçek zamanlı değişimler dikkate alınarak, sistemin çevresel değişkenliklere ve anlık üretim dalgalanmalarına karşı verdiği yanıt değerlendirilmiştir. Mikroşebekelerde yer alan YEK'ler, doğaları gereği çevresel koşullara bağlı olarak yüksek oranda değişkenlik göstermekte olup, bu durum sistem kararlılığı açısından önemli bir belirsizlik kaynağı oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, YFK'ya PV, BGTG ve BDEG'nin katılımı dört farklı senaryo kapsamında ele alınmış ve her bir durumda sistemin dinamik performansı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Önerilen kontrolörün her bir senaryodaki başarımı, Fuzzy Type-1 PI-PD ve kaskat PI-PD denetleyici yapılarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; böylece kontrolörün zorlu çalışma koşulları altındaki etkinliği ortaya konmuştur. Ayrıca, DIT2-FLC'nin tasarımında kullanılan katsayı ayarları (coefficient Setting-CS) Tablo 5.5'te ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Tablo 5.5. DIT2FLC'lerin FOU'sunu belirleyen katsayı ayarları

Katsayı Ayarları (CS)	Dizayn Değişkenleri		CC Tipleri
	δ_{DIT2}^{p}	δ_{DIT2}^{i}	
CS_{DIT2}^{1}	0,2	0,5	φ_0^p is A-CC and φ_0^i is M-CC
CS_{DIT2}^{2}	0,5	0,2	φ_0^p is M-CC and φ_0^i is A-CC
CS_{DIT2}^{3}	0,5	0,5	φ_0^p is M-CC and φ_0^i is M-CC
CS_{DIT2}^{4}	0,2	0,8	φ_0^p is A-CC and φ_0^i is S-CC
CS_{DIT2}^{5}	0,8	0,8	φ_0^p is S-CC and φ_0^i is S-CC
CS_{DIT2}^{6}	0,8	0,2	φ_0^p is S-CC and φ_0^i is A-CC

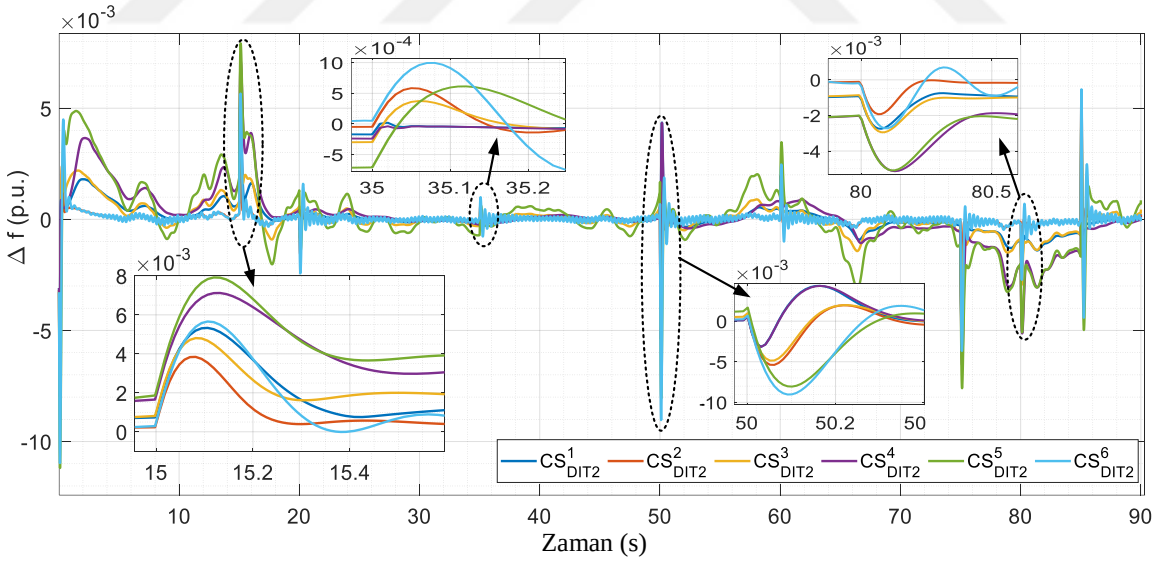
Benzetim çalışmalarında kullanılan güneş ışınımı verileri ve yük değişim eğrileri Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Güneş ışınımına ilişkin gerçek ölçüm verileri, Keweenaw Araştırma Merkezi'nden [118] temin edilmiştir.



Şekil 5.5. PV ve Yükün güç değişimleri

Senaryo-1

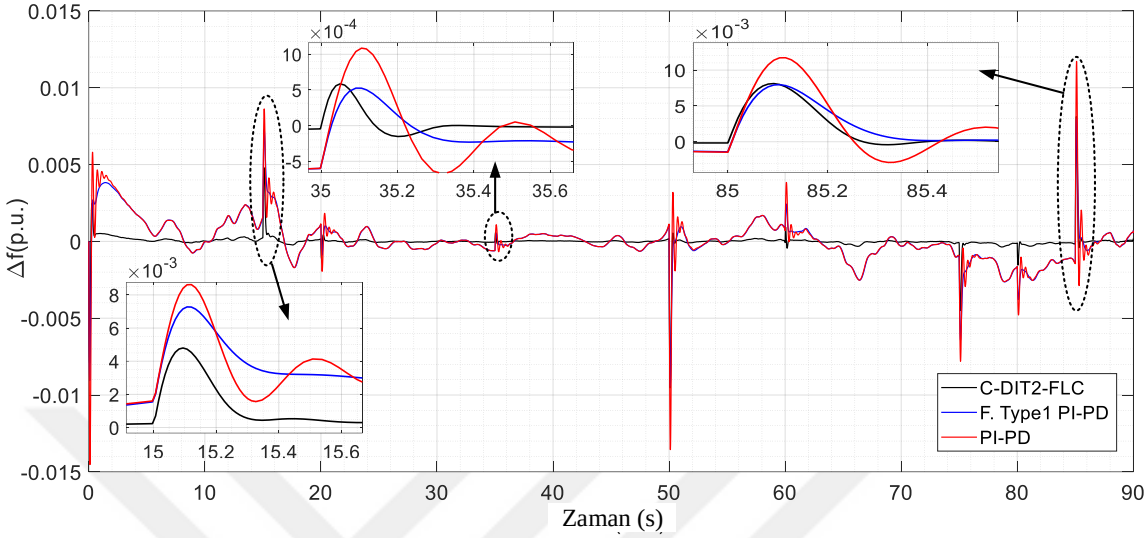
Bu senaryoda, tüm YEK'in elverişli hava koşulları altında tüketici talebini karşılayabilecek kapasitede olduğu varsayılmıştır. Başka bir deyişle, yeterli biyogaz ve biyodizel stoklarının bulunduğu ve güneş enerjisi üretiminin devam ettiği normal bir gün senaryosu ele alınmıştır. BGTG ve BDEG ünitelerinin YFK'ye katılım faktörleri eşit kabul edilmiş olup, $pf1 = pf2 = 0{,}5$ olarak belirlenmiştir. Önerilen C-DIT2-FLC, Tablo 5.5'te verilen altı farklı katsayı ayarı için ayrı ayrı ayarlanmıştır. Senaryo 1 kapsamında, farklı CS ayarları için ayarlanan kontrol mekanizmasının frekans tepkileri Şekil 5.6'da sunulmaktadır.



Şekil 5.6. Farklı CS için ayarlanmış denetleyicinin frekans tepkileri

Şekil 5.6 incelendiğinde sistemin en iyi frekans tepkisi, kontrolörün CS^2_{DIT2} durumuna ayarlandığında elde edilmiştir. Bu nedenle, hem bu senaryo hem de diğer senaryolar için önerilen kontrolörün FOU'sunu ayarlayan CS'ler CS^2_{DIT2} durumuna göre ayarlanmıştır. Senaryo 1

kapsamında, önerilen kontrolörün performansı, Fuzzy Type-1 PI-PD kontrolör ve PI-PD kaskat kontrolör ile karşılaştırılmış olup, karşılaştırma sonuçları Şekil 5.7'de sunulmuştur.



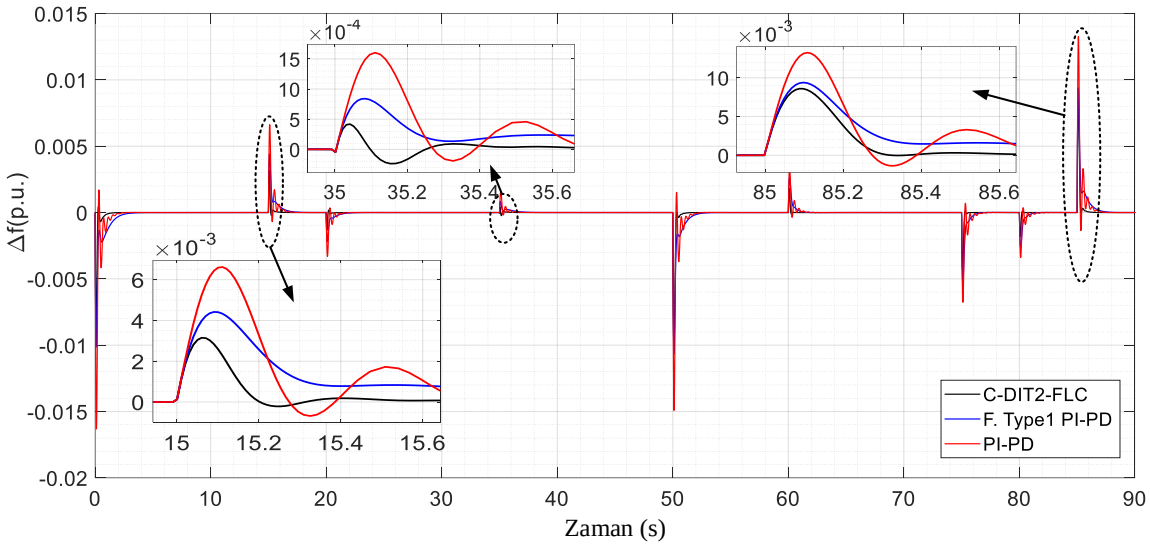
Şekil 5.7. Seneryo-1'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı

Şekil 5.7'in analizi, senaryo 1'de önerilen kontrolörün frekans sapmalarını etkin bir şekilde bastırdığını ortaya koymaktadır. Kontrolörlerin performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla, parametre optimizasyonunda kullanılan ITAE performans kriteri frekans tepkilerine uygulanmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, önerilen C-DIT2-FLC kontrolörü için ITAE değeri 0,566; Fuzzy Type 1 PI-PD kontrolörü için 3,261 ve PI-PD kontrolörü için 3,408 değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen kontrolörün sistem frekans kararlılığını artırmada ve frekans sapmalarını minimize ederek daha üstün bir dinamik performans sağladığını ortaya koymaktadır.

Senaryo-2

Bu senaryoda, gece saatleri veya olumsuz hava koşulları nedeniyle mikro şebekeye PV desteğinin sağlanmadığı varsayılmıştır. Buna ek olarak, yeterli biyogaz ve biyodizel stoklarının mevcut olduğu kabul edilmiştir. Senaryo 1'de olduğu gibi, BGTG ve BDEG ünitelerinin YFK'ya katılım faktörleri eşit alınmış ve $pf1 = pf2 = 0{,}5$ olarak belirlenmiştir. Bu senaryo kapsamında, önerilen kontrolörün performansı, Fuzzy Type 1 PI-PD ve PI-PD kaskat kontrolör ile karşılaştırılmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 5.8'de sunulmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre, önerilen kontrolör, sistem içerisindeki güç değişimlerinden kaynaklanan maksimum frekans sapmasını PI-PD kaskat kontrolöre kıyasla yaklaşık %50, Fuzzy Type 1 PI-PD kontrolöre kıyasla ise yaklaşık %30 oranında azaltmıştır. Ayrıca, frekans salınımlarını belirgin şekilde düşürerek sistem kararlılığını artırmıştır.



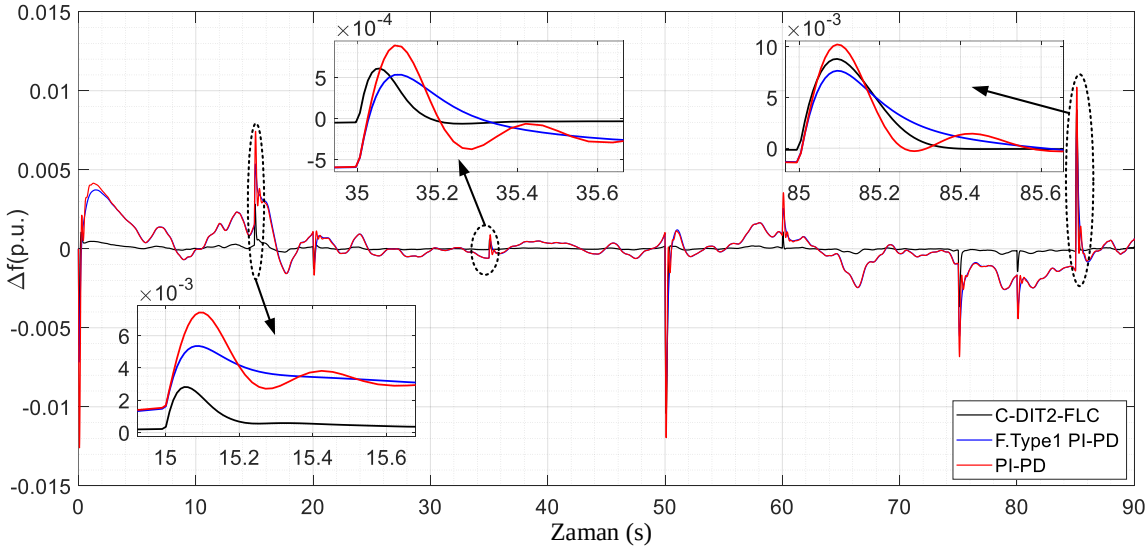
Şekil 5.8. Seneryo-2'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı

ITAE maliyet indeksi, C-DIT2-FLC, Bulanık Tip-1 PI-PD kaskat kontrolör ve PI-PD kaskat kontrolörün performanslarına uygulandığında, sırasıyla 0,325; 0,752 ve 0,785 değerleri elde edilmiştir.

Senaryo-3

Bu senaryoda, düzenli ışınım ve PV desteğinin mevcut olduğu bir gün senaryolaştırılmıştır. Enerji talebini karşılamak için yeterli biyodizel stoğunun bulunduğu, ancak biyogaz arzında bir azalma olduğu varsayılmıştır. Bu doğrultuda, BGTG'nin YFK'ya katılım faktörü $pf1 = 0{,}25$, BDEG'nin YFK'ya katılım faktörü ise $pf2 = 0{,}75$ olarak belirlenmiştir.

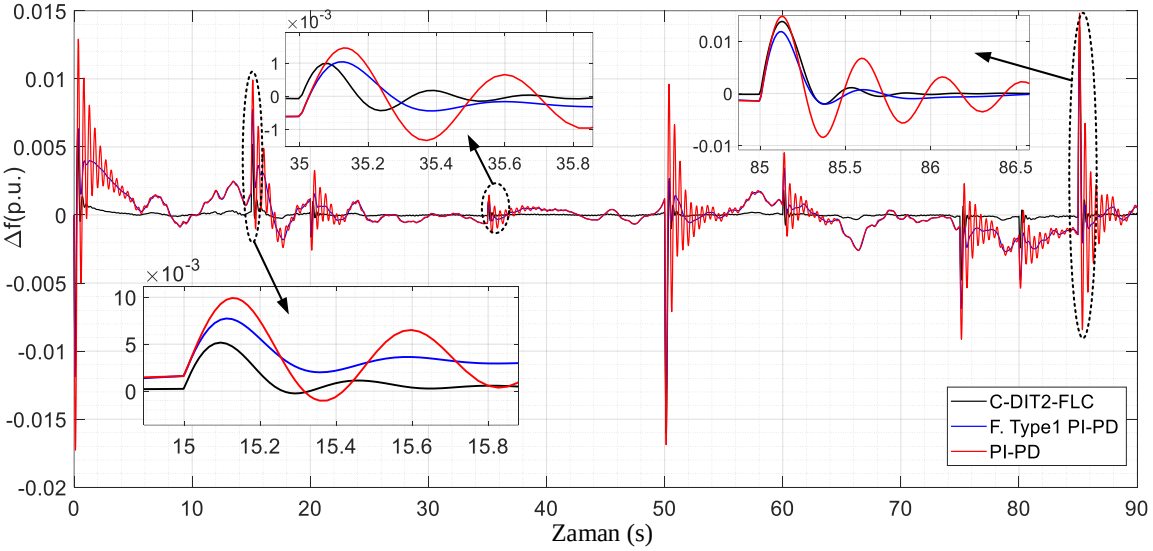
Bu senaryo kapsamında, önerilen C-DIT2-FLC kontrolörün performansı, Fuzzy Type-1 PI-PD kontrolör ve PI-PD kaskat kontrolörün performansları ile karşılaştırılmıştır. Senaryo 3 için kontrolörlerin frekans yanıtları Şekil 5.9'da yer almaktadır. Şekil 5.9 incelendiğinde, önerilen kontrolörün maksimum frekans sapmalarını ve salınımları azaltmada etkili olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 5.9'da gösterilen kontrolörlerin performanslarını sayısal olarak karşılaştırmak amacıyla, ITAE performans indeksi uygulanmış ve elde edilen değerler C-DIT2-FLC kontrolörü için 0,587; Fuzzy Type1 PI-PD kontrolör için 3,288 ve PI-PD kaskat kontrolör için 3,266 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9. Seneryo-3'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı

Senaryo-4

Bu senaryoda, güneş ışınımının düzenli olduğu ve PV desteğinin sağlandığı bir gün modeli ele alınmıştır. Ancak, Senaryo 3'ün aksine, yük talebinin karşılanması için yeterli biyogaz stoğunun bulunduğu, ancak biyodizel stoklarında bir azalma olduğu varsayılmıştır. Bu değişkenler doğrultusunda, BGTG ve BDEG ünitelerinin YFK'ya katılım faktörleri Senaryo 3'e kıyasla ters orantılı olacak şekilde belirlenmiş olup, BGTG için pf1 =0,75 ve BDEG için pf2 =0,25 olarak atanmıştır. Bu senaryoda önerilen C-DIT2-FLC kontrolörünün performansı, Şekil 5.10'da gösterilen farklı kontrolörlerin performansı ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.10. Seneryo-4'de mikroşebekenin farklı kontroller için frekans yanıtı

Şekil 5.10 analiz edildiğinde, önerilen kontrolörün frekans sapmalarını etkin bir şekilde bastırarak sistem dinamiklerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.10'da verilen frekans yanıtlarına, kontrolörlerin performanslarını nicel olara kıyaslayabilmek amacıyla ITAE performans indeksi uygulanmış ve C-DIT2-FLC, Fuzzy Type-1 PI-PD kontrolör ve PI-PD kaskat kontrolör için sırasıyla 0,844; 3,466 ve 4,248 değerleri hesaplanmıştır. Önceki üç senaryoda olduğu gibi, Senaryo 4 için önerilen kontrolör, karşılaştırıldığı diğer iki kontrolöre kıyasla daha kısa yerleşme süresi sağlayarak sistemin daha hızlı dengelenmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, frekans salınımlarını önemli ölçüde azaltarak kararlılığı artırmıştır.

5.1.4. Çalışmanın Sonuçları

Mikro şebekelerin sayısı sürekli artmakta ve bu sistemlerin kalitesi giderek iyileşmektedir. Bu bağlamda, hidrojenin geleceğin yakıtı olarak üretilmesi ve kullanılmasıyla birlikte, bu çalışma daha etkin bir kontrol mekanizmasına sahip izole bir mikro şebekeyi ele almaktadır. YEK'in güç şebekesine entegrasyonuyla ilgili zorlukların aşılması, hidrojen enerjisi kullanımıyla desteklenmektedir.

Bu araştırmada, güneş panelleri, biyogaz generatörü ve biyodizel generatörüne sahip izole bir mikro şebeke modellenmiştir. Sistem tarafından üretilen fazla enerji ve biyogaz, bir elektrolizör ve reformer aracılığıyla hidrojene dönüştürülmekte ve bu üretilen hidrojen, yedek generatör olarak çalışan FC'de kullanılmaktadır.

Mikro şebekenin frekans kontrol mekanizması, C-DIT2-FLC tarafından gerçekleştirilmiştir. C-DIT2-FLC, PI-PD kaskat kontrolörü içermektedir. Kontrolör kazançları ISSA ile belirlenmiştir. PI kontrolörün oransal ve integral kontrol giriş sinyalleri DIT2FLC ile en iyi frekans tepkisini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece, mikro şebekenin YFK'sı için daha az salınıma sahip bir yöntem geliştirilmiştir.

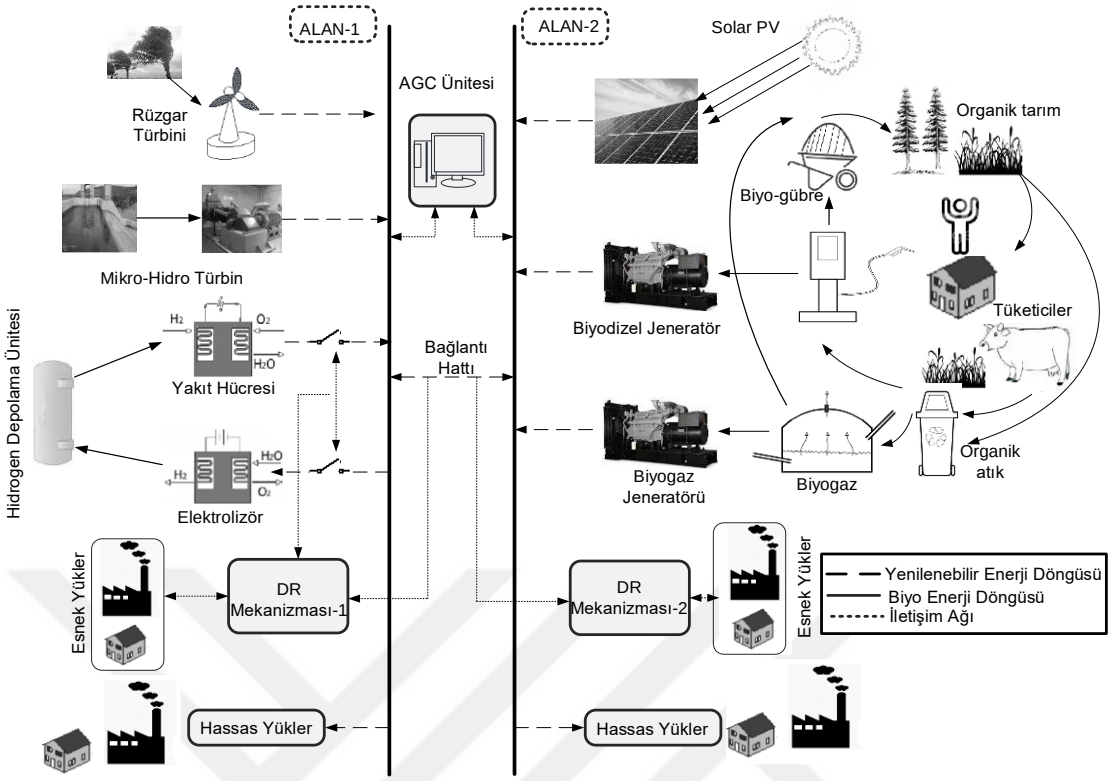
Gerçekleştirilen vaka çalışmaları kapsamında, ITAE performans indeksi temel alınarak yapılan analizlerde, önerilen C-DIT2-FLC kontrolörünün frekans yanıt performansı, diğer kontrolörlere (Fuzzy Type 1 PI-PD kontrolör ve PI-PD kaskat kontrolör) kıyasla %59 ile %84 oranında daha yüksek başarı elde etmiştir.

Sonuç olarak, YEK'in öngörülemez ve kesintili yapısına rağmen, önerilen YFK mekanizması mikro şebekeye etkin bir şekilde entegre edilmiştir. Bu çalışma kapsamında sunulan yöntemin geçerliliği ve etkinliği, farklı senaryolarla gerçekleştirilen vaka çalışmaları ile kanıtlanmıştır.

5.2. Hidrojen Bazlı Talep Yanıt Mekanizması ile Desteklenen Çok Bölgeli Mikroşebekelerde Yenilikçi Frekans Kontrolü

Günümüzde YEK'in mikroşebekelerde yaygın kullanımı, sistem dengesinin korunmasını ve istikrarlı bir enerji arzını sağlamak adına gelişmiş YFK mekanizmalarının uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Geleneksel frekans kontrol yöntemleri genellikle AGC ile sağlanmakta olup, bu yaklaşım enerji üretimini yöneterek talep ile arasındaki dengeyi sağlamaya yönelik çözümler sunmaktadır. Ancak, özellikle ada modunda çalışan mikroşebekelerde enerji arzının sürekliliğini sağlamak ve frekans kararlılığını korumak önemli zorluklar içermektedir. Bu bağlamda, hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri (HES), mikroşebekelerin kararlılığını artırmak ve frekans dalgalanmalarını minimize etmek amacıyla yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen, iki yönlü bir enerji kaynağı olarak hem yakıt pilleri aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılabilmekte hem de elektroliz süreciyle fazla enerjiyi depolamak amacıyla tüketilebilmektedir. Böylece hidrojen bazlı sistemler, AGC ve DR stratejilerini aynı anda destekleyerek enerji yönetimi açısından esnek ve verimli bir yapı sunmaktadır.

Bu bölümde, hidrojen bazlı enerji depolama sistemlerinin ve kontrol edilebilir yüklerin DR mekanizmaları ile YFK'ya entegre edildiği, yenilikçi bir frekans kontrolü yapısı önerilmektedir. Sunulan sistem, YEK kaynaklarını optimize eden, aynı zamanda atık yönetimi ve enerji depolama süreçlerine katkı sunabilecek bir mikroşebeke modeli önermektedir. Önerilen mikroşebeke, iki bölgeli, YEK tabanlı hibrit bir yapıya sahiptir ve güneş, rüzgar, biyokütle ve atık bazlı enerji sistemleri gibi çeşitli dağıtık enerji kaynaklarını entegre etmektedir. Mikroşebeke yapısı, hidrojen enerji depolama sistemi (HydrgnES) ile desteklenerek enerji arz güvenliği ve sistem kararlılığını artırmaktadır. Sistemde yer alan AE'ler, fazla üretilen elektriği hidrojen olarak depolarken, yakıt hücreleri bu hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürerek sürdürülebilirliği ve frekans kararlılığını arttırmaktadır. Ayrıca, talep tarafı katılım mekanizmaları (DRM) ile yük yönetimi optimize edilerek, sistemin dinamik frekans yanıtı iyileştirilmiştir. Önerilen mikroşebekenin yapısı Şekil 5.11'de sunulmuştur.



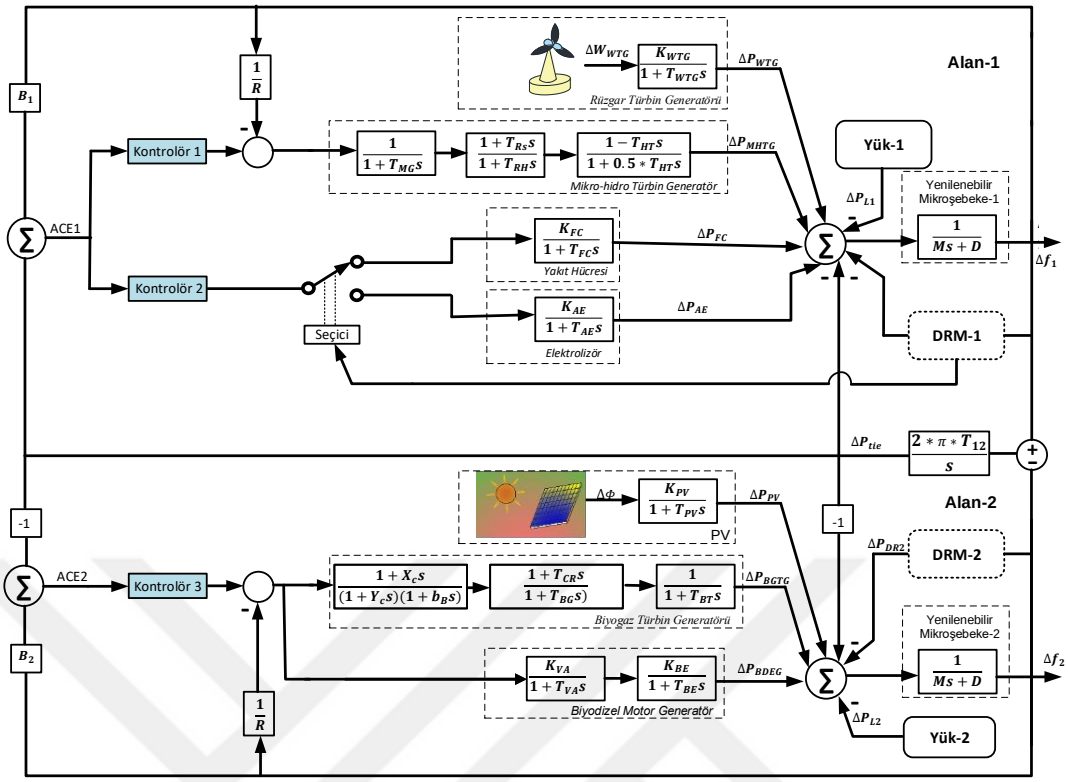
Şekil 5.11. YFK'sı araştırılan iki alanlı mikroşebekenin genel yapısı

Tasarlanan mikroşebekede AGC, ISSA ile kazançları belirlenen FOPI+TID kaskat yapısına sahip kontrolör ile gerçekleştirilmektedir. Önerilen kontolörün giriş sinyalleri DIT2FLC ile adaptif olarak ayarlanmatadır. Önerilen DIT2-FOPI+TID kademeli kontrolörü, çok bölgeli mikroşebekelerin YFK'sı için yenilikçi bir çözüm olarak sunulmaktadır.

Bu çalışmada, iki bölgeli bir mikroşebeke için hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri ve talep tarafı yönetim stratejileri ile desteklenen yenilikçi bir YFK yapısı sunulmaktadır. Önerilen kontrol çerçevesi, YFK performansını artırmak amacıyla AGC ve DR stratejilerini entegre ederek sistemin frekans kararlılığını iyileştirmekte ve hidrojen teknolojisinin frekans kontrolündeki etkinliğini artırmaktadır.

5.2.1. İki Bölgeli Mikroşebekenin Tasarımı

Şekil 5.11, bu çalışmada tasarlanan birbirine bağlı iki bölgeli mikroşebekenin yapısını ve entegre edilen talep tarafı katılım mekanizmalarını (DRM) göstermektedir. Önerilen sistem, enerji üretim birimleri olarak BGTG, BDEG, MHTG, WTG ve PV ünitelerini içermektedir. Bu ünitelerin üretim çıktılarının kesintili ve öngörülemez yapısı nedeniyle, etkin enerji ve frekans yönetimi için enerji depolama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, enerji depolama ve aktarma birimleri olarak FC ve AE mikroşebekeye dahil edilmiştir. Şekil 5.12, tasarlanan mikroşebekenin YFK modelini göstermektedir.



Şekil 5.12. Birbirine bağlı iki bölgeli mikroşebekenin YFK şeması

Mikroşebeke yapısında yer alan birimlerin matematiksel modelleri daha önce Bölüm 3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Tablo 5.6'da, önerilen iki bölgeli bağlantılı izole mikroşebeke yapısının benzetim analizlerinde kullanılan sistem parametrelerine ait sayısal değerler sunulmaktadır. [65,67,68,72,73,119]. Sistemde üretim gücü, talep edilen yükü aştığında veya talep tarafı yönetimi kapsamında yük artırımı gerektiğinde, bu fazla enerji AE aracılığıyla güçten-hidrojene (P2H) dönüşüm sürecine aktarılmakta ve böylece sistem içinde hidrojen üretimi sağlanmaktadır. Ters durumda, yani tüketim artışı veya üretim azalması gibi senaryolarda ise daha önce depolanan hidrojen, yakıt hücreleri aracılığıyla hidrojenden-elektrik gücüne (H2P) dönüştürülerek sisteme beslenmekte; bu sayede enerji arzının sürekliliği sağlanmakta ve sistemin genel kararlılığı desteklenmektedir.

Tablo 5.6. Mikroşebekenin YFK model parametreleri

İndeks	Değer	İndeks	Değer
$K_{PV}; T_{PV}$	*1; 1,8 s*	$K_{FC}; T_{FC}$	*0,01; 4,0s*
$X_c; Y_c; b_B$	*0,6;1s; 0,05*	$K_{BE}; T_{BE}$	*1; 0,5s*
$T_{CR}; T_{BG}; T_{BT}$	*0,01s; 0,23s;0,2s*	$K_{WTG}; T_{WTG}$	*1; 1,5s*
$K_{VA}; T_{VA}$	*1;0,05s*	$T_{RS}; T_{RH}$	*5s; 28,75s*
$K_{ES;} T_{ES}$	*0,002; 0,5s*	T_{HT}	*1s*
M; D; R	*0,2s; 0,012; 2,4*	$B_1; B_2$	*0,510; 0,512*

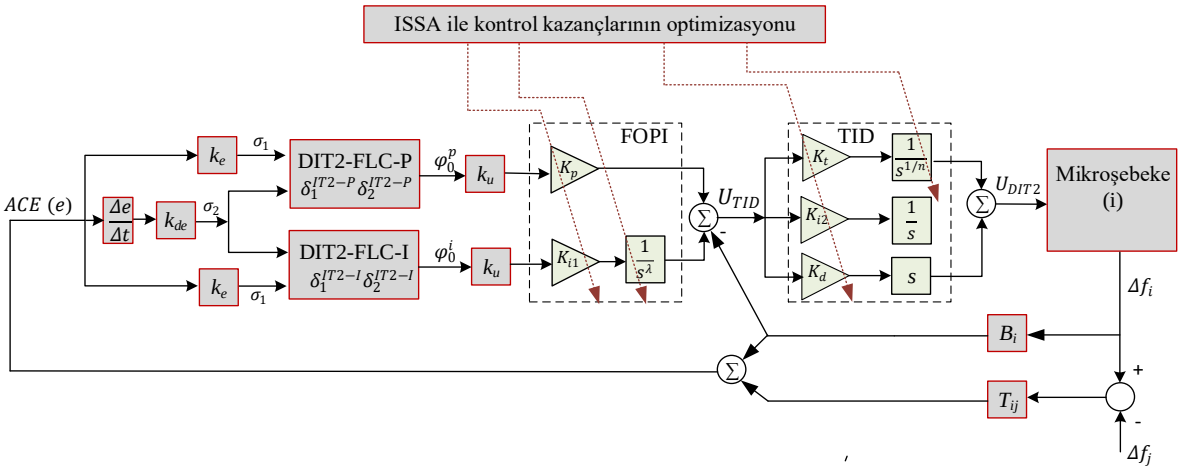
Bu çalışmada, hidrojen depolama kapasitesinin yeterli olduğu varsayılmaktadır. Bu sayede, talep YEK'in üretimini aştığında, depolanan enerji yük tarafına aktarılarak arz-talep dengesi korunabilmektedir.

5.2.2. Mikroşebekenin Talep Tarafı Katılım Mekanizmaları ile Desteklenen Yük Frekans Kontrol Yapısı

Mikroşebekelerde YFK, arz-talep dengesini koruyarak sistemin kararlı çalışmasını sağlamak ve ani yük değişimlerinden kaynaklanan frekans dalgalanmalarını en aza indirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel YFK yöntemleri, yük talebini izleyen bir üretim kontrolüne dayanmakta olup, genellikle AGC çerçevesinde integral (I), PI ve PID kontrolörleri ile uygulanmaktadır. Ancak, özellikle izole modda çalışan mikroşebekelerde, YEK'in artan penetrasyonu ve sistemdeki belirsizlikler, daha esnek ve uyarlanabilir kontrol stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada önerilen YFK stratejisi, yenilikçi bir AGC kontrolör tasarımının yanı sıra talep tarafı katılım mekanizmalarını (DRM) da içermektedir. Böylece, yalnızca üretim tarafında dengeleme sağlamak yerine, esnek yüklerin dinamik olarak yönetilmesiyle sistemin kararlılığı ve enerji verimliliği artırılmaktadır. Hidrojen üretimi, bu stratejide kritik bir rol oynamaktadır; çünkü hidrojen üretim süreçleri, bir yandan talep tarafında esnek bir yük olarak yönetilebilirken, diğer yandan depolanan hidrojenin geri dönüştürülmesiyle bir üretim kaynağına dönüşebilmektedir. Bu çift yönlü özellik sayesinde, hem arz hem de talep tarafının kontrol edilmesi kolaylaşmakta ve YEK'in değişkenliği daha etkin bir şekilde yönetilmektedir. Bu bütünleşik kontrol yaklaşımı, arz ve talep dengesini dinamik bir şekilde yöneterek frekans kontrolünün daha etkin ve esnek hale gelmesini sağlamaktadır.

Bu bölümde, iki bölgeli izole mikroşebekenin AGC için yenilikçi ve sağlam bir kontrolör tasarlamak amacıyla DIT2-FOPI+TID denetleyicisi geliştirilmiştir. Önerilen denetleyicinin genel mimarisi Şekil 5.13'te gösterilmektedir.



Şekil 5.13. DIT2-FOPI+TID Kontrolör Tasarımı

Şekil 5.13'te k_e ve k_{de}, DIT2FLC için bulanıklaştırıcı giriş sinyallerini ayarlayan ölçekleme faktörleri olarak tanımlanmaktadır. Alan kontrol hatası (ACE), e ile ifade edilmekte olup, e'nin k_e ile normalize edilmesi, DIT2FLC'nin σ_1 girişini oluştururken, e'nin türevinin ($\frac{\Delta e}{\Delta t}$) k_{de} ile normalize edilmesi, DIT2FLC'nin σ_2 girişini sağlamaktadır. TID denetleyicisinin giriş sinyali, DIT2FLC'nin φ_0 çıkışlarından türetilmekte olup, bu ilişkinin matematiksel ifadesi Denklem (5.9)'de sunulmuştur.

$$U_{TID} = k_u \left(K_p . \varphi_0^p + \frac{K_{i1}}{s^\lambda} . \varphi_0^i \right) - B_i . \Delta f_i \tag{5.9}$$

Denklem (5.9)'da, K_p, K_{i1} ve λ, FOPI denetleyicisinin parametrelerini temsil etmektedir. $k_u$ise, DIT2FLC çıkış sinyalinin ölçeklenmesini sağlayan bir katsayıdır ve Denklem (5.10).ile ifade edilir. Ayrıca B_i ve Δf_i sırasıyla i. bölgenin frekans bias faktörünü ve frekans değişimini ifade eder.

$$k_u = 1/k_e \tag{5.10}$$

U_{TID} Kontrol sinyali TID kontrolör için giriş sinyali olup bu sinyalae bağlı olarak DIT2-FOPI+TID kontrolörün üretti kontrol sinyeli U_{DIT2} Denklem (5.11)'te verilmiştir.

$$U_{DIT2} = U_{TID} . \left(\frac{K_t}{s^{1/n}} + \frac{K_{i2}}{s} + K_d s \right) \tag{5.11}$$

k_t, k_{i2} ve n TID denetleyicisinin parametrelerini ifade etmektedir.

Önerilen kontrol stratejisi üç aşamadan oluşmaktadır:

- Birinci aşamada, belirli bir senaryo için ISSA algoritması kullanılarak FOPI+TID kademeli denetleyicisinin kazançları belirlenmektedir.
- İkinci aşamada, iki bölgeli mikroşebekenin frekans tepkisini iyileştirmek amacıyla, DIT2FLC kullanılarak FOPI denetleyicisinin giriş sinyalleri dinamik olarak ayarlanmaktadır.

- Son aşamada, talep tarafı katılım mekanizmaları (DRM) kullanılarak, esnek yükler ve enerji depolama birimleri kontrol edilerek optimum frekans tepkisi sağlanmaktadır.

ISSA ile FOPI+TID Kademeli Denetleyicisinin Kazançlarının Belirlenmesi

ISSA algoritması, önerilen DIT2-FOPI+TID denetleyicisinin kazançlarını ve DRM parametrelerini optimize etmek amacıyla kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde kullanılan amaç fonksiyonu, sezgisel algoritmaların en iyi çözümü elde etmesini sağlayan temel unsurlardan biridir. Bu çalışmada, sistemin frekans kararlılığını ve dinamik performansını iyileştirmek amacıyla ITAE amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. ITAE, hata sinyalinin uzun vadeli bileşenlerini daha büyük ağırlıklarla değerlendirdiğinden, sistemin geçici rejim davranışını iyileştirmede ve kararlı duruma daha hızlı ulaşmasını sağlamada etkili bir performans indeksi olarak öne çıkmaktadır. ITAE performans indeksinin matematiksel ifadesi Denklem (5.12)'te sunulmuştur.

$$J = \int_0^{t_{sim}} t.|\Delta f|\, dt \tag{5.12}$$

Mikroşebekenin YFK'sı, tasarımları eşdeğer üç adet AGC denetleyici ve her iki bölgede bulunan DRM'ler ile sağlanmaktadır. Kontrolörlerin kazançları ve DRM'lere ait parametreler, ISSA kullanılarak optimize edilmiştir.

Optimizasyon, t=0 anında, güneş enerjisindeki güç değişimi $\Delta P_{PV} = 0{,}1$ p.u., rüzgar türbinindeki güç değişimi $\Delta P_{WTG} = 0{,}15$ p.u. ve her iki bölgede yük talebindeki değişim $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L2} = 0{,}15$ p.u. güç değişimi uygulanarak gerçekleştirilimiştir. ISSA algoritması için toplam salp sayısı (N_{tot}) 25 ve iterasyon sayısı (T) 100 olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında optimize edilen kontrolör kazançları ve DRM parametre ayarları Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.7. ISSA ile belirlenen kontrolör parametreleri

Denetleyici	K_p	K_{i1}	λ	K_t	n	K_{i2}	K_d	K_{DR}	K_{tie}
Kontrolör 1	*-8,581*	*-0,464*	*0,287*	*-9,444*	*1,015*	*8,618*	*-0,427*		
Kontrolör 2	*-11,503*	*-4,813*	*0,409*	*10,847*	*0,227*	*-6,537*	*-9,310*		
Kontrolör 3	*-11,717*	*-7,306*	*0,651*	*-10,754*	*1,136*	*-10,969*	*-8,035*		
DRM1								*0,818*	*0,9899*
DRM2								*0,768*	*0,081*

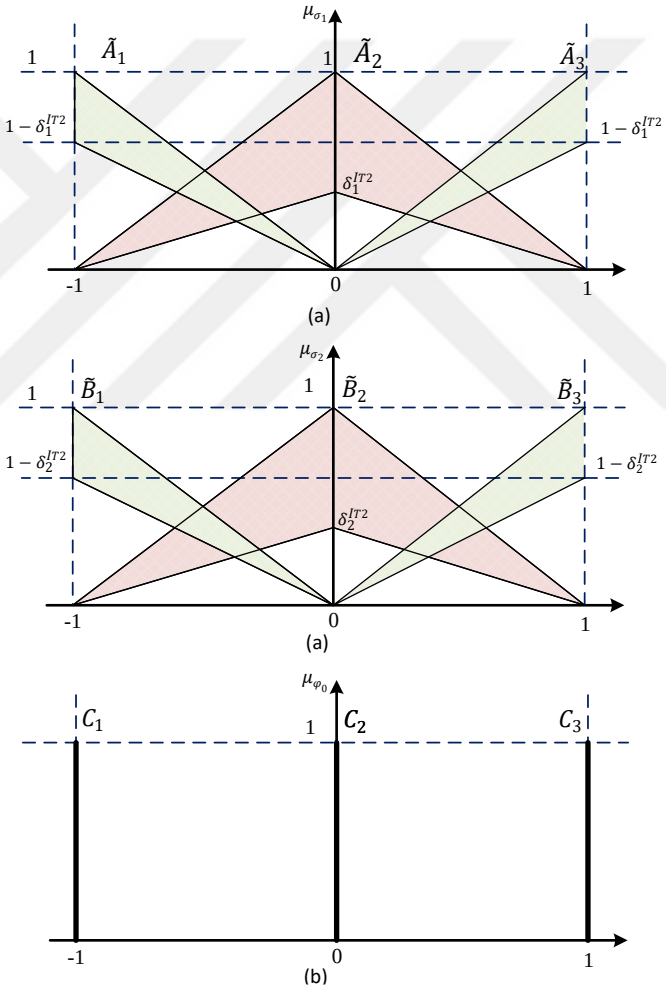
DIT2FLC'nin Ayarlanması

Bulanık mantık denetleyicilerinin yapısı ve çalışma prensiplerine ilişkin ayrıntılı açıklamalara Bölüm 4.5'te yer verilmiştir. Bu bölümde ise tez çalışmasının ilgili kısmında

kullanılan DIT2FLC nasıl yapılandırıldığı açıklanmaktadır. Bu kapsamda, IT2-FS'lerin FOU'sunu tanımlayan m_i parametreleri Denklem (5.13)'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

$$\begin{cases} m_1 = m_3 = 1 - \delta_i^{IT2} \\ m_2 = \delta_i^{IT2} \end{cases} \tag{5.13}$$

Burada simetrik olmayan üyelik fonksiyonları kullanılmış olup δ_i^{IT2}, IT2-FS'lerin FOU'sunu oluşturan, ayarlanabilir değişkendir ve σ_1 girişi için δ_1^{IT2} ile σ_2 girişi için ise δ_2^{IT2} ile sembolize edilmiştir. Bu durumda DIT2FLC'nin σ_1 ve σ_2 giriş değişkenlerine ve φ_0 çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları Şekil 5.14'te sunulmuştur.



Şekil 5.14. **(a)** σ_1'in üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** σ_2'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(c)** φ_0'ın tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları

DIT2FLC'nin genel kural yapısı Denklem (5.14)'de verilmiştir.

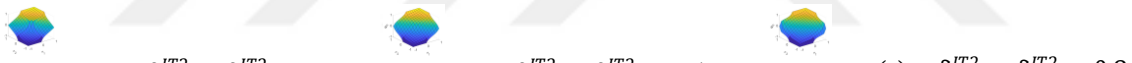
$$R_n : \text{if } \sigma_1 \text{ is } \tilde{A}_n \text{ and } \sigma_2 \text{ is } \tilde{B}_n \text{ THEN } \varphi_0 \text{ is } C_n \tag{5.14}$$

Burada n bulanık kuralların sayısını ifade eder. Bu çalışma için oluşturulmuş bulanık kurallar Tablo 5.8'de sunulmuştur.

Tablo 5.8. DIT2FLC'nin kural tablosu

σ_1	$\tilde{B}_1$	σ_2 $\tilde{B}_2$	$\tilde{B}_3$
$\tilde{A}_1$	$\tilde{C}_1$	$\tilde{C}_1$	$\tilde{C}_2$
$\tilde{A}_2$	$\tilde{C}_1$	$\tilde{C}_2$	$\tilde{C}_3$
$\tilde{A}_3$	$\tilde{C}_2$	$\tilde{C}_3$	$\tilde{C}_3$

Tablo 5.8'de verilen kural yapısına göre ayarlanan DIT2FLC'ye ait kontrol yüzeyleri, farklı FOU'yu ayarlayan parametreler ($\delta_1^{IT2}, \delta_2^{IT2}$) için Şekil 5.15'de sunulmuştur.



(a) $\delta_1^{IT2} = \delta_2^{IT2} = 0.2$ (b) $\delta_1^{IT2} = \delta_2^{IT2} = 0.5$ (c) $\delta_1^{IT2} = \delta_2^{IT2} = 0.8$

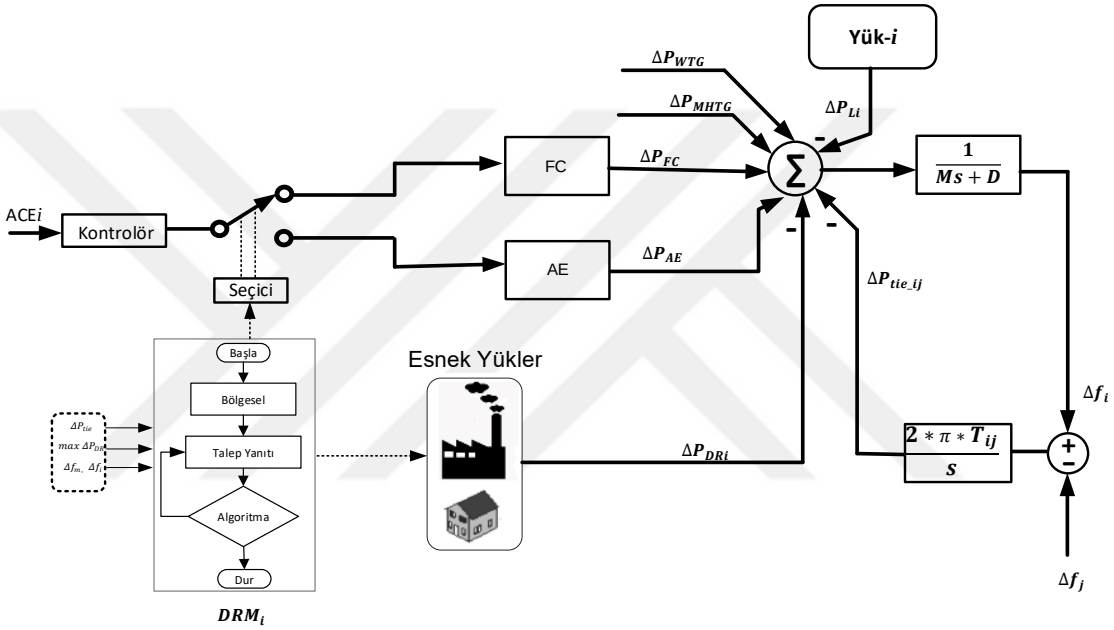
Şekil 5.15. Farklı δ_1^{IT2}ve δ_2^{IT2} değerleri için kontrol yüzeylerinin grafiği

YFK'ye DRM'nin Katkısı

DR uygulamaları, ekonomik kısıtlamalar ve güç sistemi kararlılığı gibi çeşitli nedenlerle elektrik sistemlerinde uygulanmaktadır. Yük talebinin dengelenmesiyle frekans dalgalanmaları azaltılabilir. Bu, kritik olmayan yüklerin tüketiminin artırılıp azaltılmasıyla sağlanabilir [120,121].

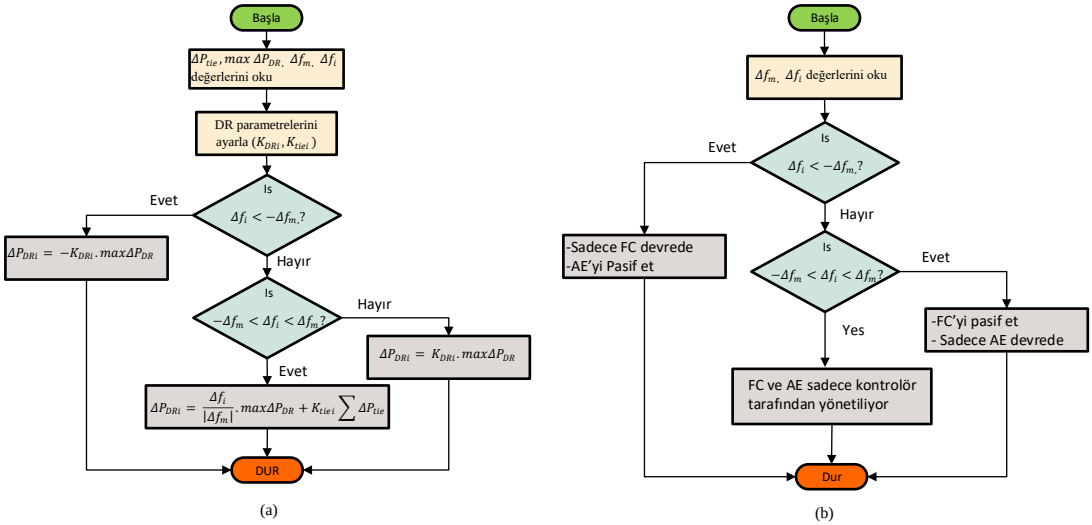
Güç sistemlerinde, klima, ısı pompası, su ısıtıcısı ve buzdolabı gibi kritik olmayan yükler toplam tüketimin büyük bir kısmını oluşturur. Bu termostat kontrollü yükler, şebekenin frekans regülasyonu için önemli bir yük rezervi olarak kabul edilir. Bu yükler, belirli bir sıcaklık aralığını korumak için açılıp kapanacak şekilde tasarlanmıştır. Hızla açılıp kapatılabilen bu yükler, tüketici tarafındaki güç ihtiyacını dengeleyebilir. Termal enerjiyi muhafaza edebilme özellikleri sayesinde, bu yüklerin birkaç dakika devre dışı bırakılması tüketicileri etkilemez. Bu özellikleri, onları YFK için uygun bir yük rezervi haline getirir. Bazı elektrik şebekelerinde elektrikli ısıtıcıların toplam talebin %10'undan fazlasını oluşturduğu bildirilmektedir [122].

Ayarlanabilir, esnek yüklerin yanı sıra, modern güç sistemleri, yakıt hücreleri ve elektrolizörler gibi elektrik enerjisini depolayıp şebekeye aktarabilen birimleri de içerir. Bu birimlerin kontrolü ile DR sistemleri frekans regülasyonunu geliştirebilir. Bu çalışma, iki ayrı kontrol birimine sahip DRM önermektedir. Birinci birim, esnek yükleri bağlama ve devre dışı bırakmadan sorumludur. İkinci birim ise yük talebine AE aracılığıyla yanıt verir; bu birim, P2H yöntemi ile hidrojen üretir ve AGC'ye FC ile yanıt verir; bu da depolanan enerjinin H2P yöntemiyle sisteme aktarılmasını sağlar. DRM katkısını da içeren MG'nin frekans tepki modeli Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. DRM katkısıyla mikroşebekenin frekans tepki modeli

Şekil 5.17-a, mikroşebekenin esnek yükleri için DRM'nin; Şekil 5.17-b ise enerji depolama birimlerine ait DRM'nin akış şemasını göstermektedir.



Şekil 5.17. DRM'nin akış şeması

ΔP_{tie}, bağlantı hattındaki (tie-line) güç değişimini ifade ederken, Δf_m, izin verilen maksimum frekans regülasyon aralığını temsil etmektedir. $\max \Delta P_{DRi}$, Δf_i, K_{DRi} ve K_{tiei}sırasıyla i'inci bölge için maksimum güç değişimi, frekans değişimi, esnek yüklerin DR katsayısı ve bağlantı hattının DR katsayısını göstermektedir. K_{DRi} ve K_{tiei} katsayılarının ayarlanmasında ISSA optimizasyon algoritması kullanılmış olup, her bölge için hesaplanan katsayılar Tablo 5.7'de verilmiştir.

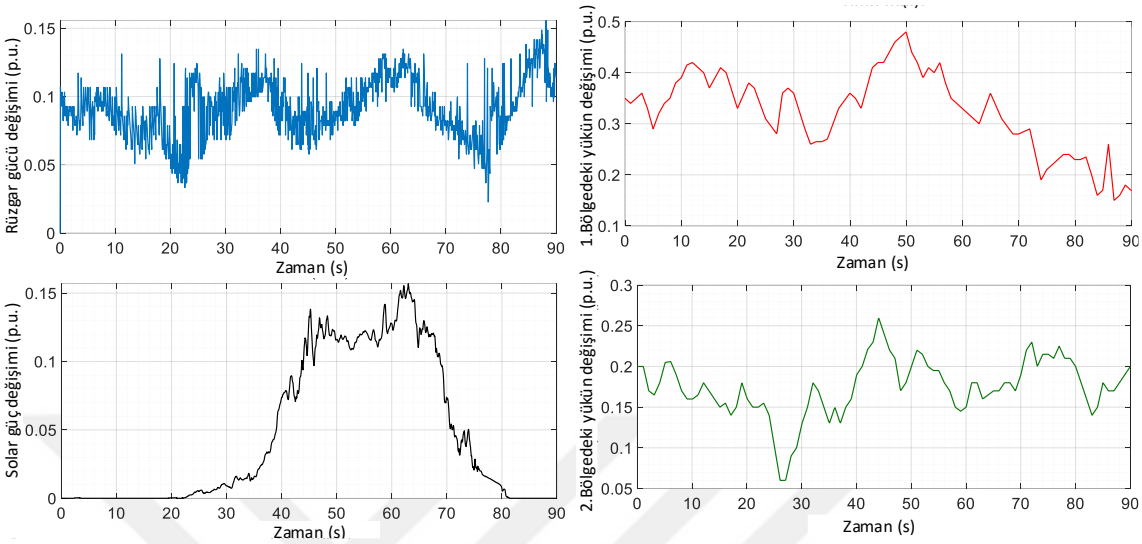
Bu çalışmada Δf_m, 0,05 Hz olarak kabul edilmiştir [123]. Ayrıca, her bir bölge için DR sistemi tarafından yönetilen esnek yük katkıları $\max \Delta P_{DRi}$=0.1 p.u. olarak önceden tanımlanmıştır. Aşağıda verilen Denklem (5.15), DRM tarafından kontrol edilen esnek yüklerin güç değişimini ifade etmektedir.

$$\Delta P_{DRi} = \begin{cases} K_{DRi}.max\Delta P_{DR}, & \Delta f_i < -\Delta f_{m,} \\ \frac{\Delta f_i}{|\Delta f_m|}.max\Delta P_{DR} + K_{tiei}\sum \Delta P_{tie}, & -\Delta f_m < \Delta f_i < \Delta f_m \\ -K_{DRi}.max\Delta P_{DR}, & \Delta f_m < \Delta f_{i,} \end{cases} \quad (5.15)$$

5.2.3. Benzetim Bulguları

Bu bölümde, önerilen YFK mekanizmasının güç sisteminin kararlılığı ve frekans sapması üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, dört farklı senaryo MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında, gerçek zamanlı kaydedilen güneş radyasyonu ve rüzgar gücü verileri benzetim zamanı ($t_{sim} = 90\ s$) için dönüştürülmüştür. Şekil 5.18, benzetim çalışmaları için National Renewable Energy Laboratory (NREL) kaynaklarından [124] elde edilen rüzgar ve Keweenaw Araştırma Merkezi'nden [118] temin edilen güneş enerji profillerini göstermektedir. Ayrıca, benzetim süresi boyunca 1. ve 2. bölgelerdeki güç talebindeki değişim de

gerçekçi bir şekilde Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Her bir bölgedeki yük talebi, hem kritik hem de esnek yüklerden oluşmaktadır.



Şekil 5.18. Rüzgar, güneş ve yükün güç değişimi

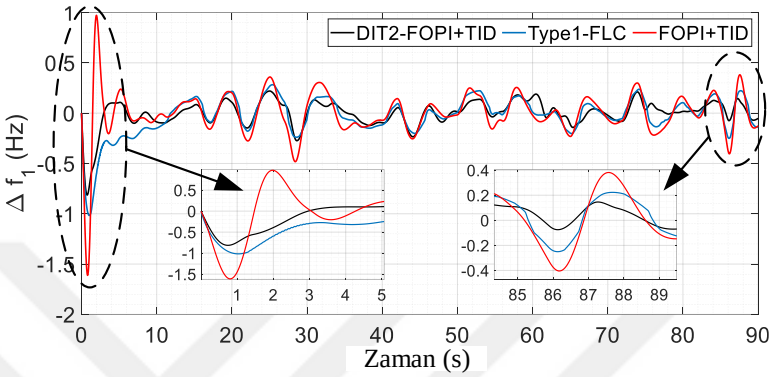
Senaryo 1: DRM'nin Katkısı Olmadan Farklı Kontrolörlerinin Karşılaştırılması

Senaryo 1'in amacı, biyogaz, biyodizel, hidro, rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının yanı sıra Şekil 5.18'de gösterilen rüzgar, güneş enerjisi ve toplam yük dalgalanmaları altında, önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörünün performansını farklı kontrolörlerin performansı ile karşılaştırmaktır. Bu senaryoda, her iki güç bölgesi için DRM devre dışı bırakılmıştır.

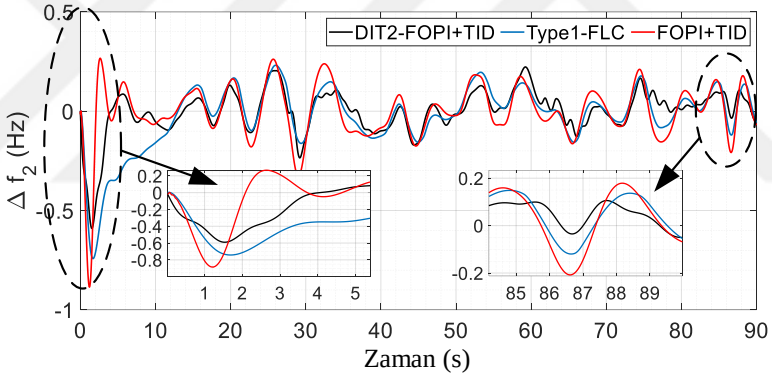
Şekil 5.19'da, önerilen kontrolörün performansının Tip-1 bulanık mantık kontrolörü (Type1-FLC) [125] ve FOPI+TID kontrolörü ile karşılaştırılmasının sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.19-a, 1. bölgedeki frekans cevabını; Şekil 5.19-b, 2. bölgedeki frekans cevabını; Şekil 5.19-c ise, 1. ve 2. bölgeler arasında güç akışını sağlayan bağlantı hattındaki güç değişimini, üç farklı kontrolör için göstermektedir. Kontrolör performanslarını daha sağlıklı kıyaslayabilmek amacıyla, ITAE performans indeksi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 5.9'da sunulmuştur.

Tablo 5.9. Kontrolör performanslarının ITAE performans indeksine göre kıyaslanması

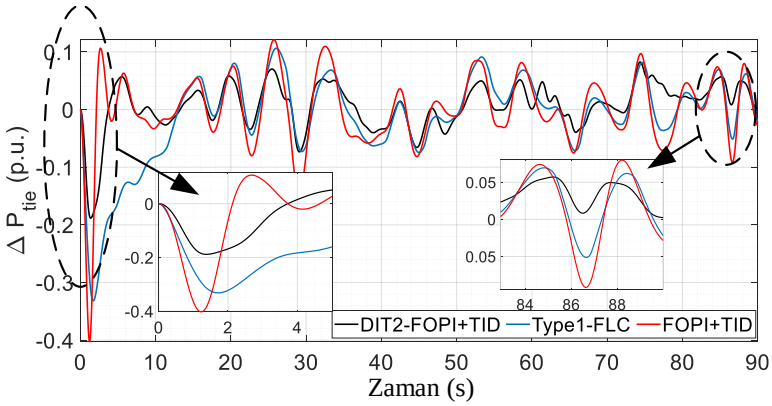
Kontrolör Tipi	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
FOPI+TID	*519,4*	*360,6*	*165,5*
Type1-FLC	*410,7*	*311*	*145,8*
DIT2-FOPI+TID	*294,7*	*258,7*	*113,1*



(a) Senaryo 1 için 1.bölgedeki frekans dalgalanması



(b) Senaryo 1 için 2.bölgedeki frekans dalgalanması



(c) Senaryo 1 için bağlantı hattındaki güç dalgalanması

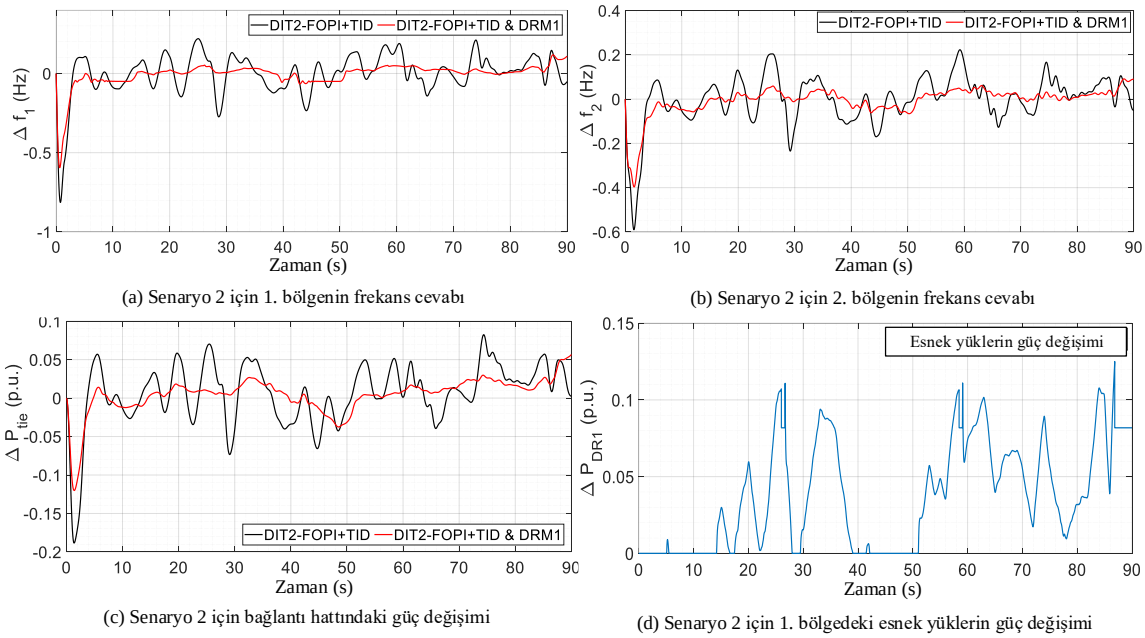
Şekil 5.19. Senaryo 1 için kontrolör performanslarının karşılaştırılması

Elde edilen bulgular, önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörünün frekans salınımlarını sönümleme konusunda oldukça etkili olduğunu güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır. Önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörü, 1. bölgede frekans salınımını Type1-FLC kontrolörüne göre %28,2; FOPI+TID kontrolörüne göre ise %43,2 oranında azaltmıştır. Ayrıca, 2. bölgedeki frekans salınımını Type1-FLC'ye kıyasla %16,8; FOPI+TID kontrolörüne kıyasla ise %28,2 oranında düşürmüştür. Bağlantı hattındaki güç sapmasını ise Type1-FLC'ye göre %22,4 ve FOPI+TID kontrolörüne göre %46,3 oranında azaltmıştır.

Senaryo 2: 1.bölgede DRM'li ve DRM'siz DIT2-FOPI+TID Karşılaştırması

Senaryo 2, önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörü ile birlikte sadece 1. bölgede DRM etkinleştirildiğinde ve devre dışı bırakıldığında mikroşebekenin frekans cevabını incelemeyi amaçlamaktadır. Her iki durumda da 2. bölgede DRM uygulanmamıştır. Bu senaryoda, Şekil 5.18'de verilen güneş, rüzgar ve yük profilleri kullanılarak frekans sapmaları ve sistem kararlılığı üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Senaryo 1'deki güç üretimi ve yük profili koşulları sabit tutulurken, 1. bölgeye bir DRM1 modülünün eklenmesi durumunda önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörünün performansı incelemektir. DRM1, 1. bölgede mevcut olduğu varsayılan 0.1 p.u'luk esnek yükü (P_{DR1}), AE ve FC ünitelerini kontrol etmektedir.

Şekil 5.20'de, DRM1'in devrede olup olmamasına bağlı olarak DIT2-FOPI+TID kontrolörünün performansı sunulmuştur.



(a) Senaryo 2 için 1. bölgenin frekans cevabı

(b) Senaryo 2 için 2. bölgenin frekans cevabı

(c) Senaryo 2 için bağlantı hattındaki güç değişimi

(d) Senaryo 2 için 1. bölgedeki esnek yüklerin güç değişimi

Şekil 5.20. DRM1 ile ve DRM1 olmadan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.20-a, 1. bölgedeki frekans cevabını; Şekil 5.20-b, 2. bölgedeki frekans cevabını; Şekil 5.20-c iki bölge arasındaki bağlantı hattındaki güç değişimini ve Şekil 5.20-d, Alan-1'deki esnek yük güç sapmasını göstermektedir.

Tablo 5.10. Senaryo 2'de kontrolör stratejilerinin ITEA performans indeksine göre kıyaslanması

Kontrolör Tipi	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
DIT2-FOPI+TID	*294,7*	*258,7*	*113,1*
DIT2-FOPI+TID & DRM1	*123,1*	*114,5*	*67,91*

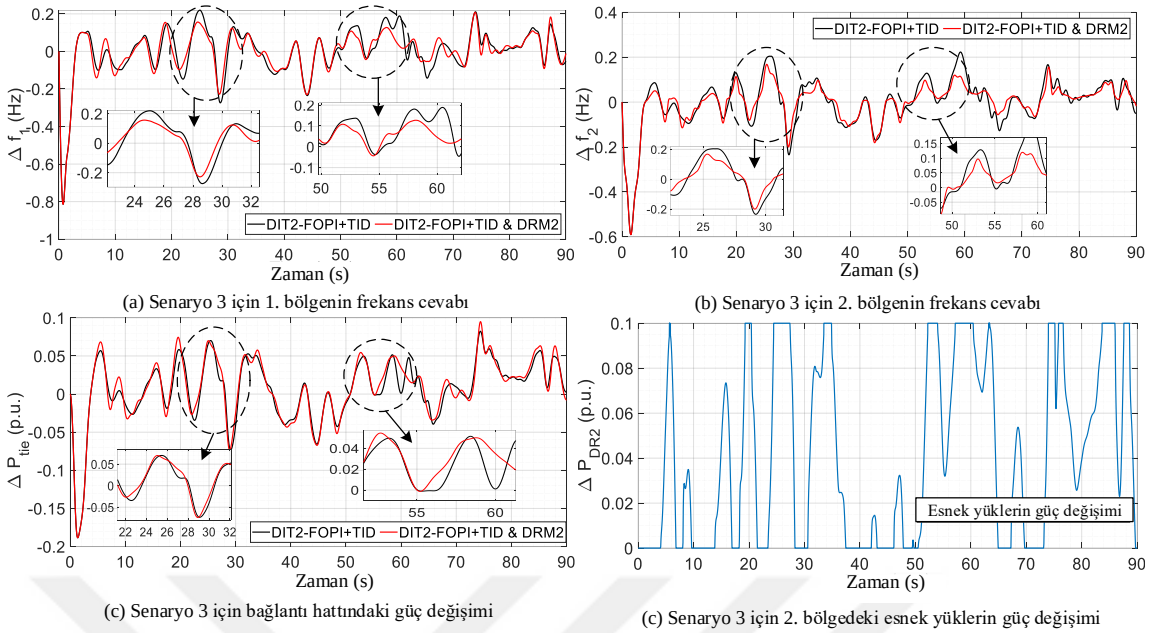
ITAE performans indeksi yine karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.10'da verilmiştir. Önerilen kontrol stratejisi, DRM1 sayesinde 1. bölgedeki frekans sapmasını %58,2; 2. bölgedeki sapmayı ise %55,7 oranında azaltmıştır. Ayrıca bağlantı hattındaki güç dalgalanması %39,9 oranında düşmüştür. Sonuçlar, esnek yüklerin enerji depolama ve aktarma birimleriyle kontrol altına alınmasının sistemin frekans cevabının önemli ölçüde düzenlenebileceğini göstermiştir.

Senaryo 3: 2. Bölgede DRM2'li ve DRM2'siz DIT2-FOPI+TID Kontrolör Performansının Karşılaştırılması

Senaryo 3'ün temel amacı, Şekil 5.18'de sunulan güneş ve rüzgar enerjisi üretimi ile yük talebi profilleri altında, yalnızca 2. bölgede uygulanan DRM2 desteğinin, önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörünün frekans cevabı üzerindeki etkisini incelemektir. Bu bağlamda, Senaryo 1 ile aynı üretim ve yük koşulları korunmuş; ancak bu kez mikroşebekenin yalnızca 2. bölgesine DRM2 entegre edilmiştir.

DRM2, 2. bölgede faaliyet gösterdiği varsayılan 0,1 p.u'luk esnek yükün (P_{DR2}) kontrolünden sorumludur. DRM2'nin enerji depolama birimlerinin kontrolü üzerinde bir etkisi yoktur. Dolayısıyla, DRM2 yalnızca tüketim taraflı talep esnekliği üzerinden frekans sapmalarını dengelemeyi hedeflemektedir.

Şekil 5.21, DIT2-FOPI+TID kontrolörünün DRM2 desteği olmadan ve DRM2 desteğiyle çalıştığı iki farklı durumda elde edilen performans çıktılarının karşılaştırmalı sonuçlarını sunmaktadır.



Şekil 5.21. DRM2 ile ve DRM2 olmadan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması

Her iki kontrol stratejisinin performansı, zaman domeni analizleri üzerinden hesaplanan ITAE değeri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 5.11'de özetlenmiştir.

Tablo 5.11. Senaryo 3'de kontrolör stratejilerinin ITAE performans indeksine göre kıyaslanması

Kontrolör Tipi	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
DIT2-FOPI+TID	*294,7*	*258,7*	*113,1*
DIT2-FOPI+TID & DRM2	*247*	*191,8*	*120*

Senaryo 3 kapsamında elde edilen sonuçlar, yalnızca esnek yükleri kontrol eden DRM2'nin, Senaryo 2'de hem esnek yükler hem de enerji depolama birimleriyle entegre çalışan DRM1'e kıyasla, sistemin frekans dinamiğini iyileştirme konusunda daha sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. DRM2 uygulamasıyla birlikte, frekans salınımları 1. bölgede %16,2; 2. bölgede ise %25,8 oranında azalmıştır.

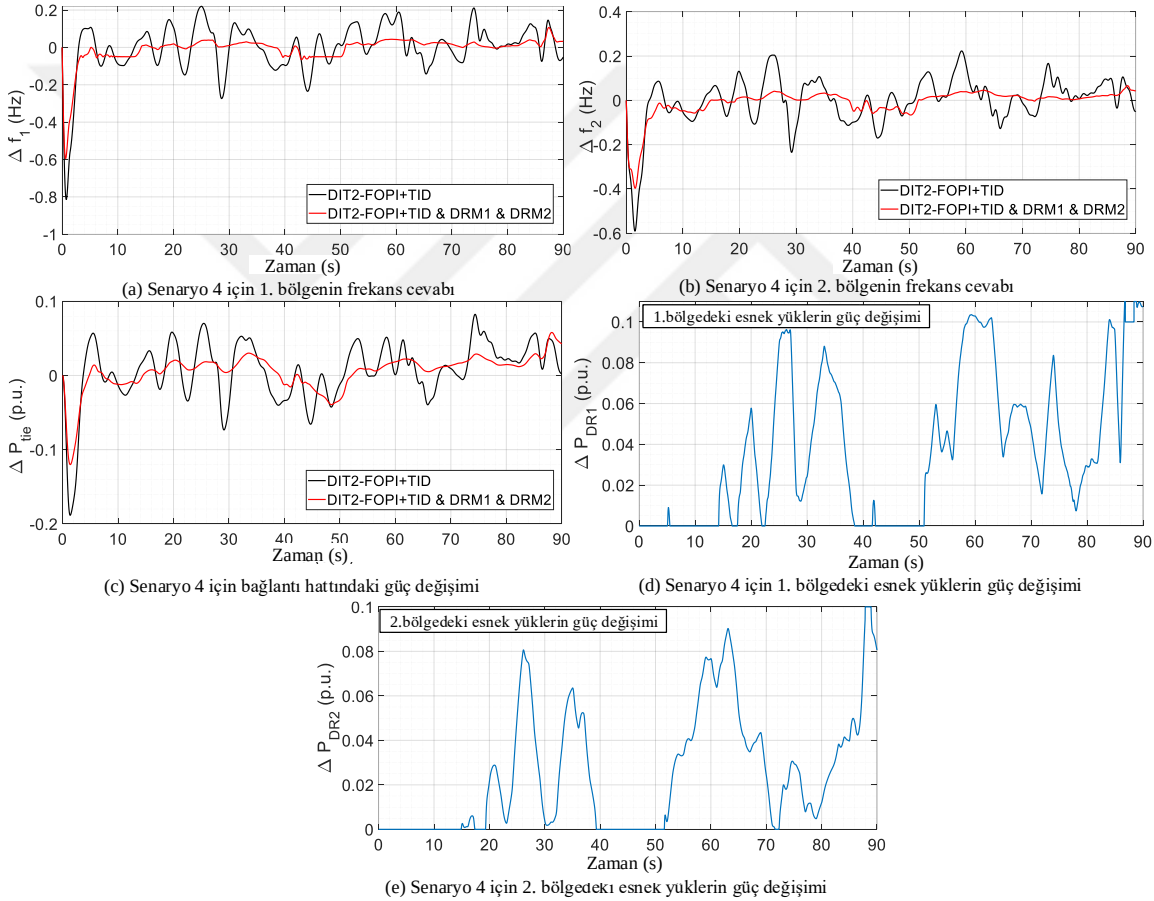
Senaryo 4: 1. ve 2. Bölgede DRM1 ve DRM2'li ve DRM'siz DIT2-FOPI+TID Kontrolör Performansının Karşılaştırılması

Senaryo 4, önceki üç senaryonun birleştirilmiş halidir. Bu senaryoda, Senaryo 1'deki güç üretim ve yük profili koşulları sabit tutulurken, 1. bölgeye Senaryo 2'de tanımlanan DRM1 ve 2. bölgeye Senaryo 3'te tanımlanan DRM2 modülleri entegre edilmiştir. Böylece hem esnek yük kontrolü hem de enerji depolama desteği içeren bütüncül bir DRM yapısı oluşturulmuş ve önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörü ile birlikte sistem performansı değerlendirilmiştir.

Şekil 5.22, her iki bölgede DRM desteği etkinleştirilmiş ve devre dışı bırakılmış durumlarda önerilen kontrolörün performans sonuçlarını sunmaktadır. Her iki kontrol stratejisi için zaman domeni analizlerine dayalı ITAE performans indeksi uygulanmış ve elde edilen sayısal karşılaştırmalar Tablo 5.12'de sunulmuştur.

Tablo 5.12. Senaryo 4'de kontrolör stratejilerinin ITAE performans indeksine göre kıyaslanması

Kontrolör Tipi	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
DIT2-FOPI+TID	*294,7*	*258,7*	*113,1*
DIT2-FOPI+TID & DRM2	*104,9*	*97,32*	*74,18*



(a) Senaryo 4 için 1. bölgenin frekans cevabı

(b) Senaryo 4 için 2. bölgenin frekans cevabı

(c) Senaryo 4 için bağlantı hattındaki güç değişimi

(d) Senaryo 4 için 1. bölgedeki esnek yüklerin güç değişimi

(e) Senaryo 4 için 2. bölgedeki esnek yüklerin güç değişimi

Şekil 5.22. İki bölgede DRM katkılı ve DRM katkısı olmayan kontrol stratejilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.22-a, 1. bölgedeki frekans sapmasını, Şekil 5.22-b, 2. bölgedeki frekans sapmasını, Şekil 5.22-c, iki bölge arasındaki bağlantı hattı güç sapmasını, Şekil 5.22-d, DRM1 uygulamasıyla 1. bölgedeki esnek yük güç sapmasını ve Şekil 5.22-e ise DRM2 uygulamasıyla 2. bölgedeki esnek yük güç sapmasını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, hem 1. hem de 2. bölgede eş zamanlı olarak uygulanan DRM stratejisinin, mikroşebekenin dinamik frekans tepkisini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Sadece

önerilen DIT2-FOPI+TID kontrolörüne kıyasla 1.bölgedeki frekans salınımları %64,4; 2.bölgedeki frekans salınımları %62,3 ve bağlantı hattı güç sapması ise %34,4 oranında azaltılmıştır. Bu bulgular, üretim ve tüketim taraflı entegre talep yanıtı stratejisinin, mikroşebekelerde YFK performansını artırmada son derece etkili olduğunu göstermektedir.

5.2.4. Genel Değerlendirme, Kısıtlar ve Gelecek Çalışmalar

Son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle kesirli dereceli (FO) kontrolörleri içeren kaskat yapılı kontrolörlerin güç sistemlerinin frekans regülasyonu performansını önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, bu kontrolörlerin genellikle belirli işletme koşullarına göre optimize edilmiş olmaları, farklı çalışma senaryolarında etkinliklerini sınırlamaktadır [29–34]. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla bazı çalışmalar kontrol sistemlerine bulanık mantık tabanlı kontrolörler entegre etmekte olup, bu çalışmalarda genellikle Tip-1 Bulanık Mantık Kontrolörü (Type1-FLC) tercih edilmektedir [126-131]. Ancak Type1-FLC kontrolörleri, yüksek belirsizlik ve değişkenliğe sahip sistemlerde sınırlı etkiye sahiptir. Bu bağlamda, belirsizliği daha etkin şekilde yönetebilen Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörleri (T2-FLC) ön plana çıkmaktadır [31-33]. Tez çalışmasının bu bölümünde, AGC için özgün bir kontrolör olan DIT2-FOPI+TID önerilmiştir.

Senaryo 1 kapsamında, önerilen kontrolörün performansı FOPI+TID ve Type1-FLC gibi yaygın kullanılan iki kaskat kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, DIT2-FOPI+TID kontrolörünün sistemin frekans salınımlarını önemli ölçüde azalttığını ve genel dinamik tepkisini iyileştirdiğini göstermektedir. Senaryo 2, 1. bölgeye DRM1 (esnek yükler ve enerji depolama sistemlerini yöneten) entegrasyonu ile gerçekleştirilmiş; sonuçlar, bu entegrasyonun dinamik frekans cevabında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir.

Senaryo 3'te, yalnızca 2. bölgedeki esnek yüklerin DRM2 ile kontrol edildiği bir durum incelenmiştir. Bu senaryoda DRM'nin enerji depolama sistemi üzerinde bir etkisi yoktur ve yalnızca tüketim taraflı esnek yük yönetimi uygulanmaktadır. Sonuçlar, DRM2'nin tek başına sistem performansını iyileştirmede 2. Senaryoya göre daha sınırlı fakat ölçülebilir bir etki sağladığını ortaya koymuştur. Senaryo 4 ise her iki bölgeye DRM1 ve DRM2'nin eş zamanlı uygulanmasını içermekte olup, tüm esnek yüklerin ve enerji depolama sisteminin katılımıyla sistemin dinamik cevabının en üst düzeye ulaştığını göstermektedir. Her iki bölgede frekans salınımları %60'tan fazla oranlarda azaltılmıştır.

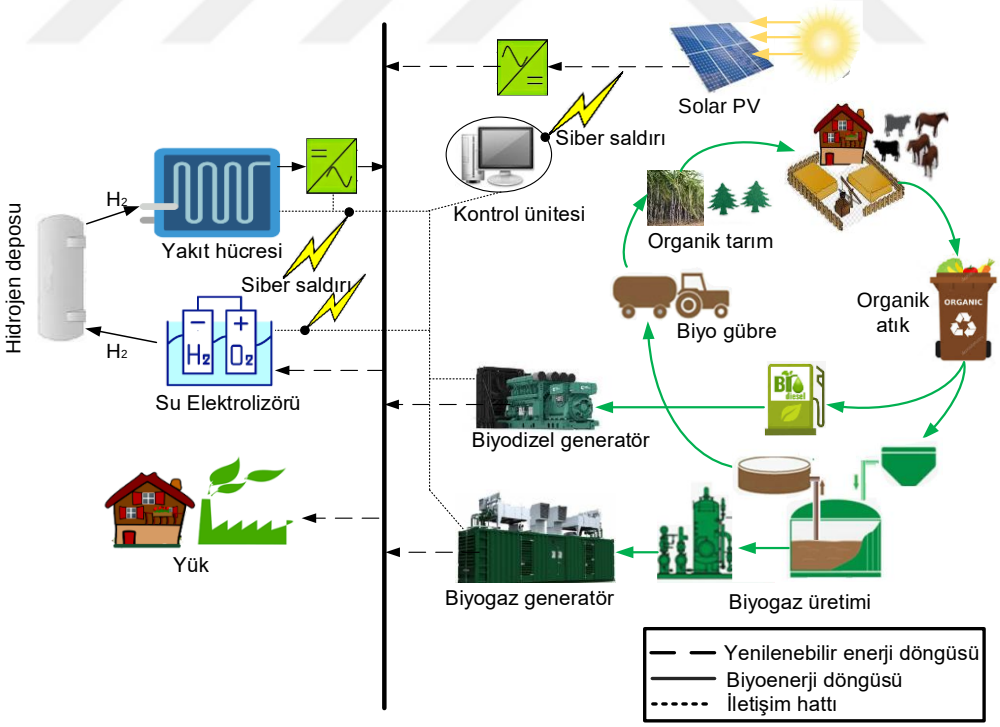
Gerçekleştirilen kapsamlı benzetim çalışmaları, önerilen kontrol yapısının YFK performansı açısından önemli kazanımlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle DR mekanizmalarının entegrasyonu sayesinde, frekans yanıt performansında %65'e varan iyileştirme sağlandığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri ile desteklenen DR

stratejilerinin, Mikroşebekelerin dinamik frekans yanıtlarını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada HydrgnES sistemi yalnızca 1. bölgede konumlandırılmış ve her iki bölgede talep tarafı yönetimine dahil edilen esnek yük miktarı sabit olarak 0,1 p.u. alınmıştır. HydrgnES sisteminin yerleşimi ve kapasitesi, uygulama öncesinde optimize edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda, HydrgnES sisteminin konumu ve kapasitesi ile birlikte her bir bölgedeki değişken esnek yük profilleri dikkate alınarak çok boyutlu bir optimizasyon yapılabilir.

5.3. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Mikroşebekelerde Yük-Frekans Kontrolü ve Siber Güvenliğin Artırılması: Yakıt Hücreli ve Kesir Dereceli Denetleyici Yaklaşımı

Mikroşebeke sistemlerinin kontrol stratejileri, yalnızca yenilenebilir kaynakların doğasından kaynaklanan belirsizliklere değil, aynı zamanda sayısal altyapıların getirdiği yeni tehditlere de karşı dayanıklı olmalıdır. Bu kapsamda özellikle YFK mekanizmalarının, hem YEK'in süreksiz yapısına hem de olası siber saldırılara karşı esnek ve güvenli bir yapı sergilemesi gerekmektedir. Bu bölümde, ana güç şebekesinden izole edilmiş ve çiftlik konseptine uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış bir mikroşebeke yapısı önerilmiştir. BGTG, BDEG, PV, FC) ve AE ünitelerinden oluşan mikroşebekenin genel yapısı, Şekil 5.23'te gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Çiftlik konseptine uygun mikroşebekenin genel yapısı

YFK'ye yönelik yapılan birçok çalışmada, kontrol parametrelerinin belirlenmesi için fiziksel yasalar ya da doğadaki canlıların davranışlarından esinlenen sezgisel algoritmalar tercih

edilmektedir. Bu çalışmada trigonometrik çemberden esinlenilerek geliştirilmiş yeni bir optimizasyon algoritması olan CIOA kullanılarak denetleyici kazançlarının belirlenmesi önerilmektedir. Literatürdeki karşılaştırmalı değerlendirmeler, CIOA'nın karmaşık optimizasyon problemlerinde yüksek doğrulukta ve hızlı çözümler sunduğunu göstermektedir [46].

Sezgisel algoritmalar ile kontrolör kazançları genellikle belirli senaryolara göre ayarlanmakta olup, bu kazançlar sistemin farklı durumlarında en iyi performansı sağlamayabilmektedir. YEK kaynaklı belirsizlikler ve siber saldırılar gibi durumlar, sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Bu etkilerin azaltılması için kontrolörlerin dinamik olarak ayarlanabilmesi ve siber tehditlere karşı dayanıklı bir yapı kurulması gerekir. Bu kapsamda, son yıllarda tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı kontrol yaklaşımları ön plana çıkmıştır [103,132]. Geleneksel tip-1 bulanık denetleyiciler, büyük belirsizliklerin ve beklenmeyen sistem arızalarının kontrolünde yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda, IT2FLC yapılarının daha üstün performans sunduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [32,33,133].

Bu çalışmada, BGTG, BDEG ve PV'den oluşan bir mikroşebeke modeli tasarlanmıştır. Mikroşebekede fazla enerji AE aracılığıyla hidrojene çevrilerek depolanmaktadır. İhtiyaç halinde bu hidrojen, FC'de elektrik enerjisine dönüştürülerek enerji sürekliliği sağlanmaktadır. Mikroşebekenin YFK için DIT2FLC-FOTID yapısında yeni bir kaskat kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Bu kontrol yaklaşımı üç aşamadan oluşmaktadır: İlk olarak, FOTID denetleyici kazançları CIOA ile optimize edilmiştir. Kazançları optimize edilen denetleyicinin giriş sinyali DIT2FLC ile adaptif olarak uyarlanmaktadır. Son olarak, DIT2FLC'nin giriş sinyallerini ve çıkış sinyalini uyarlayan ölçekleme katsayıları, tek giriş IT2FLC bulanık mantık denetleyici ile ayarlanarak kontrolün siber saldırılar karşısındaki dayanıklılığı artırılmıştır.

Bu çalışmanın öne çıkan katkıları aşağıda özetlenmiştir:

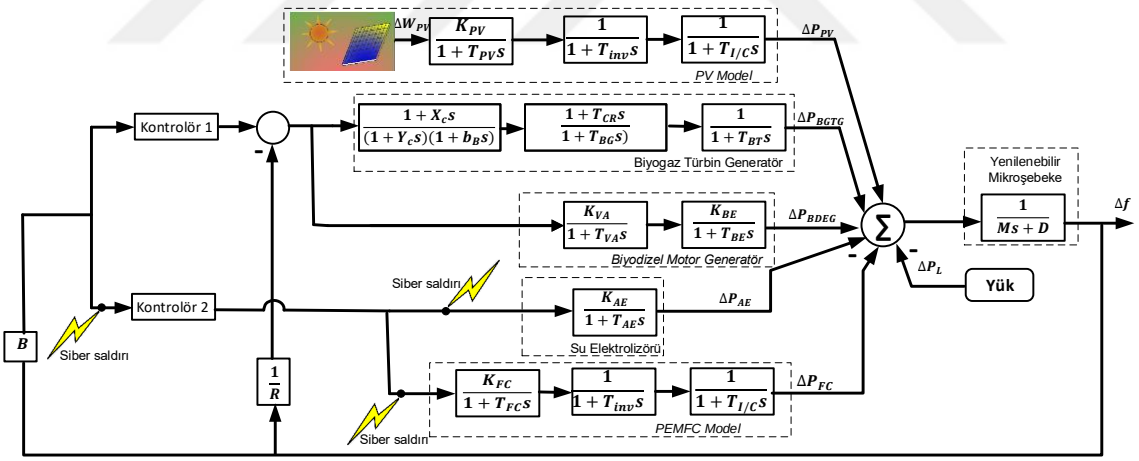
- FDI ve DoS saldırılarına maruz kalan mikroşebekelerde frekans salınımlarını azaltmak üzere yeni bir denetleyici geliştirilmiştir.
- CIOA'nın siber saldırı altındaki mikroşebekelerde YFK amaçlı ilk kez uygulanması sağlanmıştır.
- Tip-2 bulanık mantık tabanlı DIT2FLC-FOTID denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir.
- Karbon salınımı içermeyen hidrojen ile enerji sürekliliği sağlanmıştır.
- Sabit güç değişimleri yerine gerçek güneş ve rüzgar verileri kullanılmıştır.
- Önerilen yöntem, literatürde yakın zamanda kullanılan Fuzzy-TID [134] ve FOTID [135] denetleyicilerle karşılaştırılmıştır.
- Kontrol mekanizmasına yönelik siber saldırı modeli sunulmuş ve geliştirilen denetleyicinin bu koşullarda gösterdiği performans analiz edilmiştir.

5.3.1. Mikroşebekenin Modellenmesi

İzole mikroşebekelerde enerji sürekliliğinin sağlanması, YEK'in değişken doğasına karşı uygun enerji depolama stratejilerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Güneş ışınımı, rüzgar hızı, biyogaz ve biyodizel üretim verimliliği gibi çevresel ve iklimsel faktörlere bağlı olarak üretimde meydana gelen dalgalanmalar, sistem kararlılığı açısından önemli bir sorundur. Bu bağlamda, üretim fazlası enerjinin hidrojene dönüştürülerek depolanması ve enerji ihtiyacının arttığı dönemlerde yakıt hücreleri aracılığıyla tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmesi, sürdürülebilir ve dengeli bir enerji yönetimi sunmaktadır.

Bu çalışmada, ana güç şebekesinden bağımsız çalışan ve çiftlik tipi yerleşim alanlarına uygun olarak tasarlanmış bir mikroşebeke modeli oluşturulmuştur. Önerilen sistem; BGTG, BDEG, PV paneller, AE ve FC bileşenlerinden oluşmaktadır. Mikroşebeke içerisindeki enerji üretim-tüketim dengesizliği, sistem frekansını doğrudan etkilemekte olup, bu etkilerin minimize edilmesi amacıyla geliştirilmiş 2 adet kontrolör kullanılmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardaki belirsizliklere ve haberleşme tabanlı kontrol sistemlerinin maruz kalabileceği olası siber saldırılar göz önünde bulundurularak, sistemde dayanıklı ve esnek bir kontrol stratejisi uygulanmıştır. Bu sayede hem arz-talep dengesi korunmakta hem de sistemin dinamik kararlılığı güvence altına alınmaktadır.

İzole mikroşebeke yapısının YFK modeline ilişkin blok diyagram Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. İzole mikroşebekenin YFK modeli

Şekil 5.24'te verilen mikroşebeke modelinin tasarımı ve benzetimi için kullanılan sistem parametreleri Tablo 5.13'te sunulmaktadır.

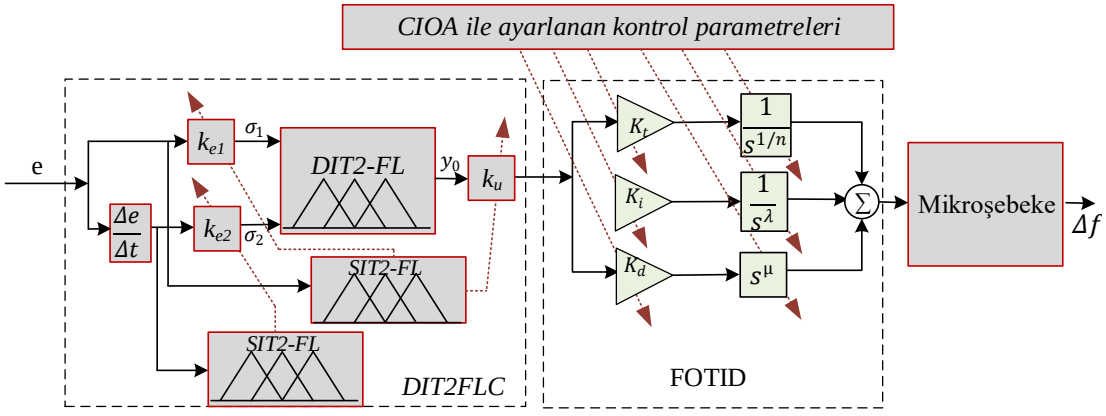
Tablo 5.13. Mikroşebeke model parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer
K_{PV}; T_{PV}	PV sisteminin kazancı; güneş enerjisi sisteminin zaman sabiti	1; 1,8 s
T_{inv}; $T_{I/C}$	İnvertör ve bağlantı elemanının zaman sabitleri	0,04s; 0,004s
X_c; Y_c; b_B	İlerleme zamanı; gecikme zamanı; valf aktüatörü dinamikleri	0,6; 1s; 0,05
T_{CR}; T_{BG}; T_{BT}	Yanma reaksiyonu gecikmesi; biyogaz gecikmesi; deşarj zaman sabiti	0,01s; 0,23s;0,2s
M; D;	Eşdeğer atalet sabiti; sönümleme sabiti	0,2s; 0,01
K_{FC}; T_{FC}	FC'nin kazancı; FC'nin zaman sabiti	1; 0,26s
$K_{AE;}$ T_{AE}	AE'nin kazancı; AE'nin zaman sabiti	0,002; 0,5s
K_{VA}; T_{VA}	BDEG valf kazancı ve valf aktüatörü gecikmesi	1;0,05s;
K_{BE}; T_{BE}	BDEG motor kazancı ve zaman sabiti	1; 0,5s
B; R	Frekans duyarlılığı ; primer frekans azalma katsayısı	0,510; 2

5.3.2. Kontrolörün Tasarımı

YEK'in belirsiz doğası ve olası siber saldırılar, izole güç sistemlerinde frekans kararlılığını ciddi şekilde tehdit edebilmektedir. Bu koşullar altında sistem kararlılığının sağlanabilmesi, güçlü ve esnek kontrol stratejilerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere, mikroşebekelerin YFK performansını optimize etmek için DIT2FLC-FOTID yapısında yeni bir kontrolör önerilmektedir.

Önerilen kontrol yapısı, Kontrol sinyalini uyarlayan DIT2FLC ile kazançları CIOA algoritması ile optimize edilen FOTID denetleyicisinin kaskat bağlanmasından oluşmaktadır. Bu bütünleşik yapı, hem yenilenebilir kaynaklardan kaynaklanan üretim belirsizliklerine hem de kontrol sinyallerini hedef alan siber tehditlere karşı sistemin frekans dengesini etkili biçimde korumayı amaçlamaktadır. Önerilen kontrol mimarisi Şekil 5.25'te sunulmaktadır.



Şekil 5.25. DIT2FLC-FOTID kontrolörün şematik gösterimi

Şekil 5.25'te, k_{e1} ve k_{e2} , hata sinyali (e) ile bu sinyalin zamana göre değişiminin $(\Delta e/\Delta t)$ DIT2FLC yapısına uygun giriş aralığına dönüştüren ölçekleme katsayılardır. k_u katsayısı ise DIT2FLC çıkış sinyalini FOTID denetleyicisinin girişine uygun hale getiren bir ölçekleme katsayısıdır. Literatürde bu katsayılar genellikle manuel olarak belirlenmekte [52] ya da çeşitli optimizasyon algoritmaları ile ayarlanmaktadır [136]. Ancak bu tür sabit parametreler, yalnızca belirli senaryolar altında etkin performans sağlayabilmekte, beklenmedik sistem koşulları (örneğin, siber saldırılar) altında hata sinyalini denetleyiciye uygun şekilde dönüştürmekte yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada k_{e1}, k_{e2} ve k_u ölçekleme katsayılarının adaptif olarak güncellenmesini sağlayan bir bulanık mantık yaklaşımı önerilmiştir. Böylece YFK performansı, sistemin karşılaştığı belirsizliklere ve saldırılara karşı daha esnek hale getirilmiştir. DIT2FLC çıkışına bağlı olarak FOTID denetleyicisi tarafından üretilen kontrol sinyali Denklem (5.16) ile ifade edilmektedir:

$$U_{DIT2-FOTID} = k_u . y_0 \left(\frac{K_t}{\frac{1}{S^n}} + \frac{K_i}{S^\lambda} + K_d . S^\mu \right) \tag{5.16}$$

Burada K_t, K_i, K_d, n, λ, ve μ FOTID denetleyicisine ait parametrelerdir ve bu parametreler CIOA algoritması ile optimize edilmektedir. Bu süreçte, sistemin frekans yanıtını iyileştirmek amacıyla ITAE performans indeksi amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. ITAE, frekans sapmalarının zamanla çarpılarak değerlendirilmesini esas alır. Bu sayede hem hata büyüklüğü hem de hatanın sistemde ne kadar süreyle kaldığı göz önünde bulundurulur. CIOA ile belirlenen kontrolör kazançları Tablo 5.14'de verilmiştir.

Tablo 5.14. CIOA ile belirlenen kontrolör parametreleri

	K_t	K_i	K_d	n	λ	μ
Kontrolör 1	*-12,428*	*-29,010*	*-10,564*	*8,020*	*0,662*	*1,141*
Kontrolör 2	*5,832*	*-7,296*	*-14,707*	*4,682*	*1,443*	*0,116*

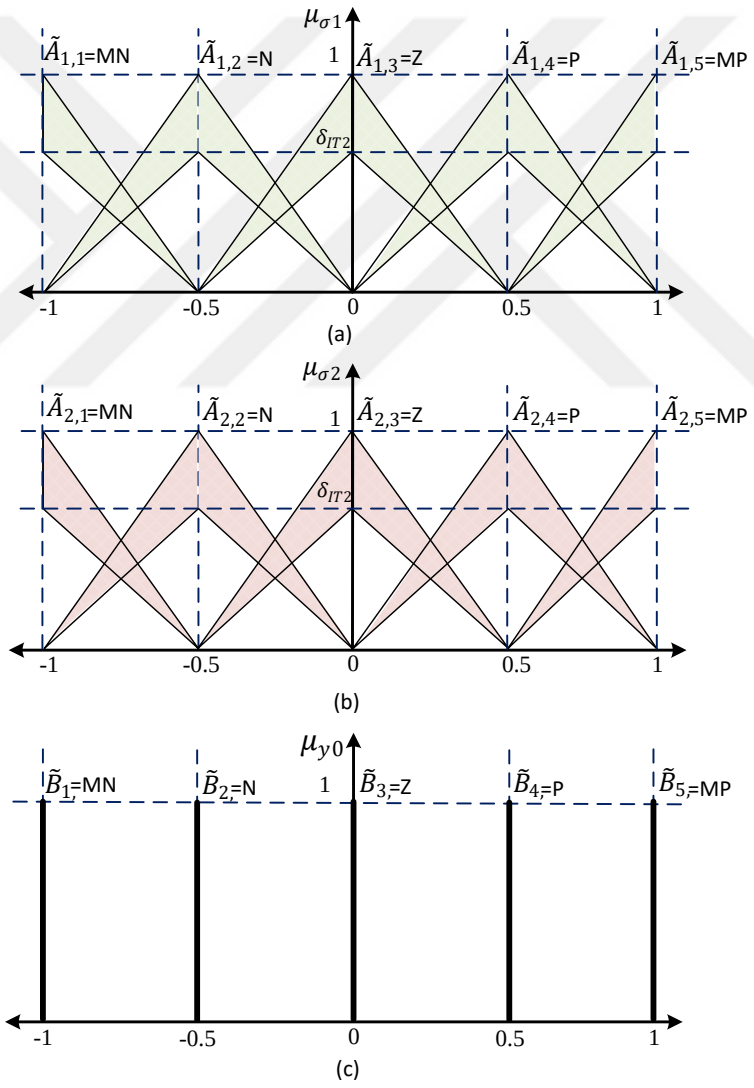
DIT2FLC'nin Ayarlanması

IT2-FS ve bu yapılara dayalı bulanık mantık denetleyicilerinin temel ilkeleri daha önce Bölüm 4.5'te detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde ise, söz konusu yapının bu çalışmaya özgü uygulaması kapsamında geliştirilen DIT2FLC yapısının tasarımına yer verilmektedir. Tasarım karmaşıklığını azaltmak ve sistem uygulamasını kolaylaştırmak amacıyla simetrik üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bu durumda LMF yüksekliğini belirleyen katsayılar m_i ile Denklem(5.17)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$m_{i,1} = m_{i,2} = \ldots = m_{i,n} = \delta_{IT2} \tag{5.17}$$

Burada $i = 1,2,$ olmak üzere denetleyicinin girişlerini, n ise kullanılan üyelik fonksiyonlarının sayısını belirtmektedir. Bu çalışmada $n = 5$ olarak seçilmiştir. DIT2FLC, hata sinyallerini FOTID kontrolör için uyarlayan bir adet çift giriş aralık tip 2 bulanık mantık (DIT2-FL), e hata sinyali ile DIT2-FL çıkış sinyalini uyarlayan ölçekleme katsayıları k_{e1} ve k_u'yu ayarlayan bir tek giriş aralık tip 2 bulanık mantık (SIT2-FL) ve ($\frac{\Delta e}{\Delta t}$) sinyalini uyarlayan ölçekleme katsayısı k_{e1}'i uyarlayan bir SIT2-FL'den oluşmaktadır. DIT2-FL ve SIT2-FL eş giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarına sahiptir.

DIT2FLC'nin kural tabanını tanımlayan üyelik fonksiyonları Şekil 5.26'da sunulmuştur.



Şekil 5.26. **(a)** σ_1'in üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(b)** σ_2'nin üçgen giriş üyelik fonksiyonları **(c)** y_0'ın tekil (singleton) çıkış üyelik fonksiyonları

DIT2FLC'nin genel kural yapısı Denklem (5.18) ile ifade edilmektedir.

$$R_n : \text{if } \sigma_1 \text{ is } \tilde{A}_{1,n} \text{ and } \sigma_2 \text{ is } \tilde{A}_{2,n} \text{ THEN } y_0 \text{ is } B_n \tag{5.18}$$

Burada σ_1 ve σ_2, DIT2-FL'nin giriş sinyallerini, $\tilde{A}_{1,n}$ ve $\tilde{A}_{2,n}$, bu girişlere ait aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarını, B_n ise çıktıya karşılık gelen tekil (singleton) değerleri temsil etmektedir. Bu çalışmada, her iki giriş ve çıkış için beş üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır: Maksimum Pozitif (MP), Pozitif (P), Sıfır (Z), Negatif (N) ve Maksimum Negatif (MN). Bu üyelik fonksiyonları doğrultusunda oluşturulan kural tabanı Tablo 5.15'te sunulmaktadır.

Tablo 5.15. DIT2FLC'nin kural tablosu

σ_1	σ_2				
	MN	N	Z	P	MP
MN	MN	MN	N	N	Z
N	MN	N	N	Z	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	MP
MP	Z	P	P	MP	MP

DIT2FLC'nin bulanıklaştırılmış net çıkış değeri y_0, sağ ve sol indirgenmiş çıkışların ortalaması olarak hesaplanır ve Denklem (5.19) ile tanımlanır.

$$y_0 = \frac{y_0^r + y_0^l}{2} \tag{5.19}$$

Burada y_0^r ve y_0^l sırasıyla sağ ve sol indirgenmiş çıktı değerlerini temsil eder. Bu değerler, aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır:

$$y_0^r = \frac{\sum_{n=1}^{R} \underline{f}_n(\sigma).B_n + \sum_{n=R+1}^{N} \overline{f}_n(\sigma).B_n}{\sum_{n=1}^{R} \underline{f}_n(\sigma) + \sum_{n=R+1}^{N} \overline{f}_n(\sigma)} \tag{5.20}$$

$$y_0^l = \frac{\sum_{n=1}^{L} \overline{f}_n(\sigma).B_n + \sum_{n=L+1}^{N} \underline{f}_n(\sigma).B_n}{\sum_{n=1}^{L} \overline{f}_n(\sigma) + \sum_{n=L+1}^{N} \underline{f}_n(\sigma)} \tag{5.21}$$

Burada R ve L, geçiş noktalarını temsil ederken, $\underline{f}_n(\sigma)$ ve $\overline{f}_n(\sigma)$, kural tabanındaki minimum ve maksimum üyelik derecelerine karşılık gelen değerlerdir. Bu üyelik dereceleri ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{cases} \underline{f}_n(\sigma) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_{1,n}}(\sigma_1) * \overline{\mu}_{\tilde{A}_{2,n}}(\sigma_2) \\ \overline{f}_n(\sigma) = \overline{\mu}_{\tilde{A}_{1,n}}(\sigma_1) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_{2,n}}(\sigma_2) \end{cases} \tag{5.22}$$

YFK Üzerine Siber Saldırılar

Bu çalışmada önerilen denetleyici yapının dayanıklılığı, YFK sinyallerini hedef alan siber saldırılar altında test edilmiştir. Özellikle FDI ve DoS saldırılarının, kontrolörler ve enerji depolama birimleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, sistemin frekans kararlılığını koruyup koruyamadığı analiz edilmiştir.

Modellemede, saldırganın ölçüm sistemine sızarak kontrol sinyallerini manipüle ettiği FDI senaryosu ve iletişim altyapısını işlevsiz hale getirerek sistem tepkisini bastırdığı DoS senaryosu dikkate alınmıştır. Uygulanan FDI saldırısında, kontrolör girişine yanıltıcı veriler gönderilmekte ve bu sinyaller kontrol sınırları içerisinde kaldığı sürece sistem tarafından kabul edilmektedir. Bu durum, üretim-tüketim dengesinin bozulmasına ve frekansın sapmasına yol açmaktadır.

DoS saldırı senaryosunda ise, bazı üretim birimleri devreden çıkmaktadır. Aynı zamanda, enerji depolama birimlerinin kontrol sinyalleri engellenerek bu sistemlerin geçici veya kalıcı olarak durdurulmasına neden olmaktadır. Bu müdahaleler sonucunda frekans istikrarı daha da zayıflamakta, sistemin kararlılığı tehdit edilmektedir.

Saldırı senaryoları, ABD Ulusal Elektrik Sektörü Siber Güvenlik Kaynağı (NESCOR) standardında tanımlanan ve zamanla değişen dört temel saldırı formuna göre modellenmiştir [137].

$$v_1(t) = 0{,}2 \tag{5.23}$$

$$v_2(t) = 0{,}2\sin(t) \tag{5.24}$$

$$v_3(t) = \begin{cases} 0{,}5\sin(2t) + \frac{5}{t^2}, & 5 < t < 20 \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{5.25}$$

$$v_4(t) = 0{,}3\cos(t) \tag{5.26}$$

Bu yapı sayesinde, önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin saldırı altındaki performansı ayrıntılı olarak test edilmiş ve sistemin YFK kabiliyetinin korunup korunmadığı çeşitli senaryolar ile analiz edilmiştir.

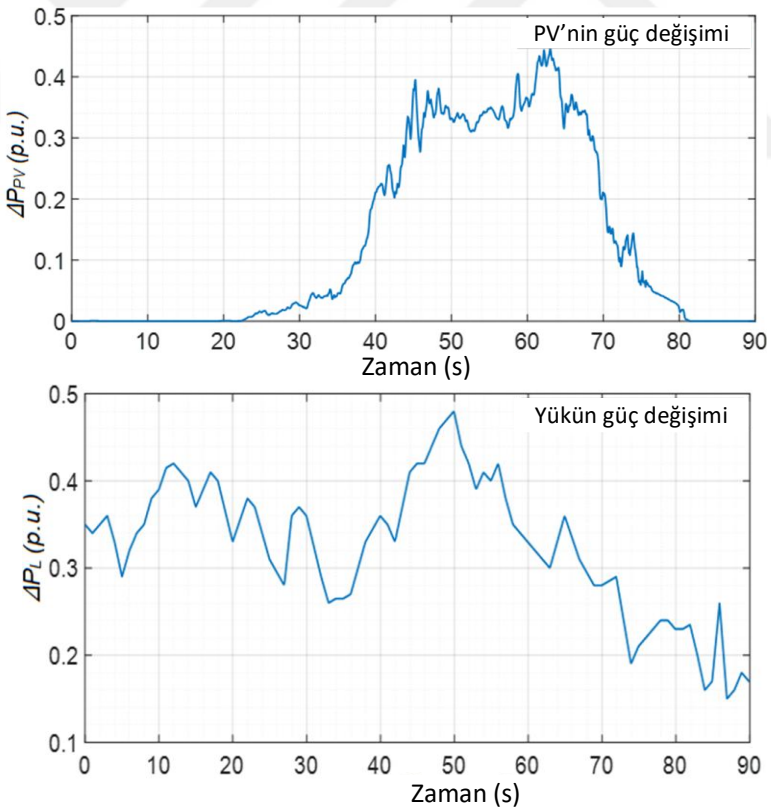
5.3.3. Benzetim Bulguları

Bu bölümde, Şekil 5.24'te gösterilen izole mikroşebeke sistemi, önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin etkinliğini ve doğruluğunu değerlendirmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Önerilen kontrolörün performansı, literatürde yaygın olarak kullanılan Fuzzy-TID ve kesirli dereceli TID kontrol yapıları ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
DIT2FLC-FOTID denetleyici tasarımında, IT2 yapısının belirsizlik alanını (FOU) belirleyen tek parametre olan δ_{IT2} giriş için FOU'nun sınırlarını belirlemekte ve sistemin adaptifliğini doğrudan etkilemektedir. DIT2FLC'nin her iki girişi için kullanılan δ_{IT2} değerleri, altı farklı durum için belirlenmiş ve bu durumlar Tablo 5.16'da sunulmuştur.

Tablo 5.16. DIT2FLC'nin farklı FOU ayarları

Durumlar	İnput-1 (σ_1)	İnput-2 (σ_2)
	δ_{IT2}	δ_{IT2}
Durum1	0,2	0,2
Durum2	0,2	0,8
Durum3	0,5	0,2
Durum4	0,5	0,5
Durum5	0,8	0,5
Durum6	0,8	0,8

Gerçekçi çalışma koşullarına daha yakın benzetim sonuçları elde edebilmek amacıyla, bu bölümde gerçek güneş ışınımı verileri ve gerçekçi yük dalgalanma senaryoları dikkate alınmıştır. Önerilen denetleyicinin yalnızca normal çalışma koşullarında değil, aynı zamanda FDI ve DoS saldırılarının etkisi altındaki performansı da kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, dört farklı senaryo altında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Güneş ışınımı verileri ve yük değişim senaryosu Şekil 5.27'de gösterilmektedir. Güneş ışınımına ilişkin gerçek veriler, NREL kaynaklarından alınmıştır [124].

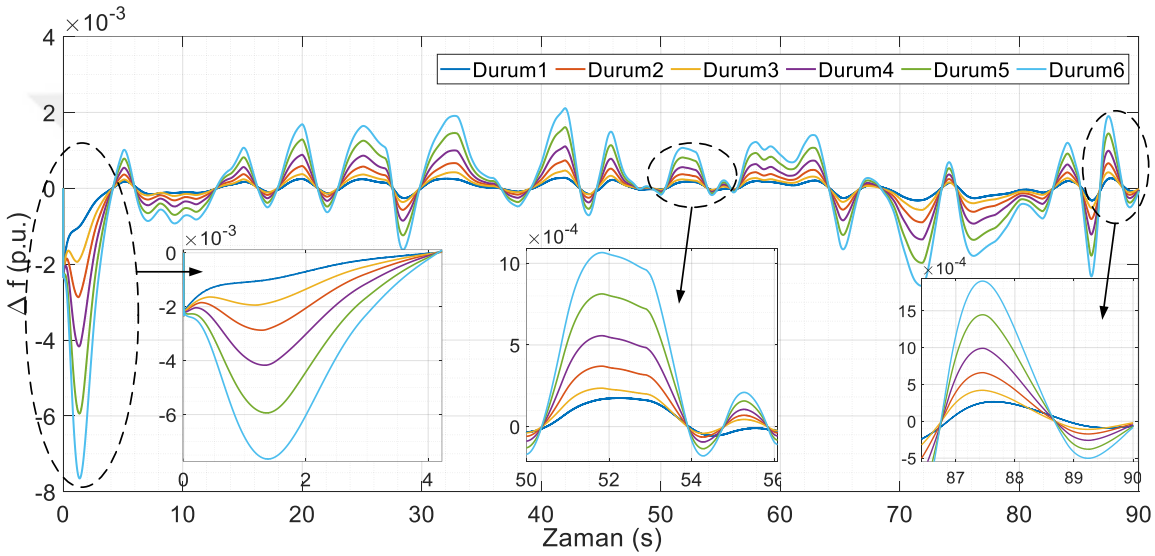


Şekil 5.27. PV ve Yükün güç değişimleri

Senaryo 1

Bu senaryoda, Şekil 5.27'de gösterildiği gibi güneş enerjisi üretimi ve yükün dalgalandığı tipik bir gün için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi herhangi bir siber saldırıya maruz kalmamaktadır. BGTG, BDEG ve hidrojen kaynaklarının yeterli kapasiteye sahip olduğu varsayılmıştır.

Önerilen kontrolör yapısında, DIT2FLC'nin belirsizlik ayak izi, Tablo 5.16'da listelenen altı farklı duruma göre yapılandırılmıştır. Bu senaryo koşulları altında, Önerilen kontrolörün farklı FOU ayarları için performansı Şekil 5.28'de karşılaştırılmıştır.



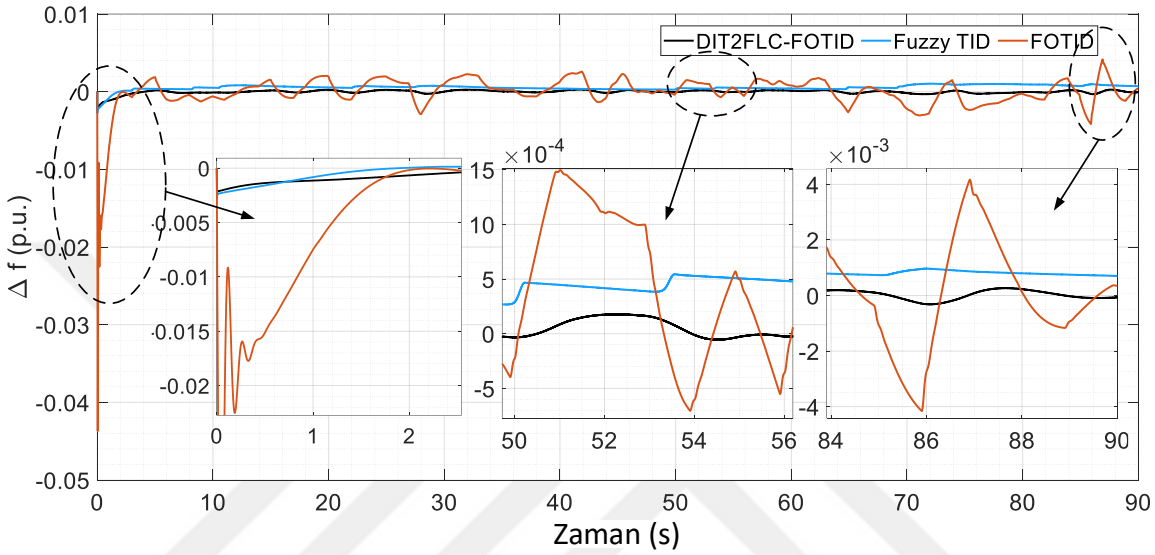
Şekil 5.28. Farklı durumlara göre ayarlanmış FOU ile denetleyicinin frekans yanıtları

Şekil 5.28 incelendiğinde, mikroşebekenin en iyi frekans yanıtını, DIT2FLC'nin belirsizlik ayak izinin Durum1 için ayarlandığında elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, önerilen kontrol yapısına, hem normal çalışma koşullarını içeren bu senaryoda hem de siber saldırıların uygulandığı diğer üç senaryoda Durum1'deki FOU ayarları uygulanmıştır.

Senaryo 1 kapsamında önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin performansı, Fuzzy-TID ve FOTID denetleyiciler ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.29'da sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, Senaryo 1 kapsamında önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin frekans sapmalarını azaltmadaki başarısı açık biçimde görülmektedir. Bu değerlendirmeyi nicel olarak desteklemek amacıyla, her bir denetleyiciye ait frekans yanıtları dört farklı performans kriteri ile analiz edilmiştir: Mutlak Hata İntegrali (IAE), Karesel Hata İntegrali (ISE), Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın İntegrali (ITAE) ve Zaman Ağırlıklı Karesel Hata İntegrali (ITSE). Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Tablo 5.17'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.17. Senaryo 1'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
DIT2FLC-FOTID	0,01352	5,134x10-6	0,5162	9,501x10-5
Fuzzy TID	0,05384	$3{,}789x10^{-5}$	2,613	0,00192
FOTID	0,1101	0,0004375	4,533	0,007953



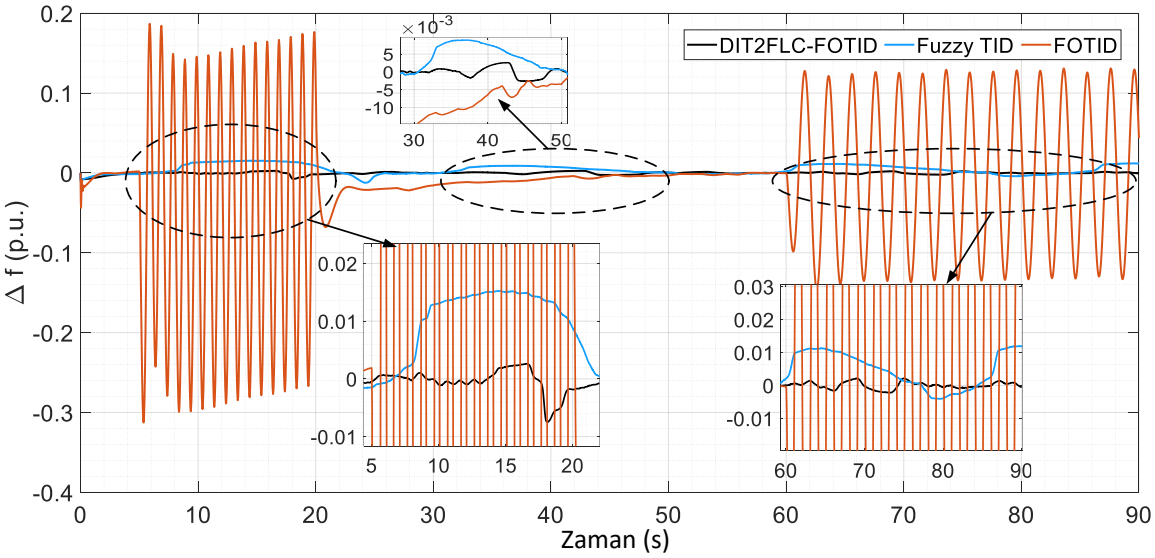
Şekil 5.29. Senaryo 1 için kontrolörlerin frekans yanıtları

Senaryo 2

Bu senaryoda, Senaryo 1'de belirtilen çalışma koşulları altında, FC ve AE ünitelerine yönelik siber saldırıların mikroşebekenin frekans tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, aşağıdaki FDI saldırı senaryoları uygulanmıştır:

- 5 s < t < 20 s aralığında, kötü amaçlı $v_3(t)$ sinyali FC'nin kontrol sinyaline uygulanmıştır.
- 30 s < t < 50 s aralığında, kötü amaçlı $v_4(t)$ sinyali AE'nin kontrol sinyaline eklenmiştir.
- 60 s < t < 90 s aralığında, kötü amaçlı $v_2(t)$ sinyali tekrar FC'nin kontrol sinyaline uygulanmıştır.
- 60 s < t < 90 s aralığında, yine AE kontrol sinyaline ani bir adımsal bozulma içeren $v_1(t)$ sinyali uygulanmıştır.

Bu saldırı senaryoları sonucunda, FC ve AE ünitelerinin FDI saldırılarına karşı savunmasız olduğu varsayılmıştır. Önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyici ile diğer denetleyicilerin bu siber saldırılar altındaki frekans yanıt performansları Şekil 5.30'da sunulmaktadır.



Şekil 5.30. Senaryo 2 için kontrolörlerin frekans yanıtları

Şekil 5.30 incelendiğinde, önerilen DIT2FLC-FOTID kontrolörün, Fuzzy TID ve FOTID kontrolörlere kıyasla frekans salınımlarını daha etkin bir şekilde sönümlediği açıkça görülmektedir. Bu kontrol yapılarına ilişkin sayısal performans karşılaştırmaları, IAE, ISE, ITAE ve ITSE performans kriterlerine göre değerlendirilmiş olup, sonuçlar Tablo 5.18'de sunulmuştur.

Tablo 5.18. Senaryo 2'ye göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
DIT2FLC-FOTID	0,08095	0,0001692	3,192	0,003684
Fuzzy TID	0,4923	0,00492	18,69	0,1662
FOTID	5,135	0,6951	226,5	24,65

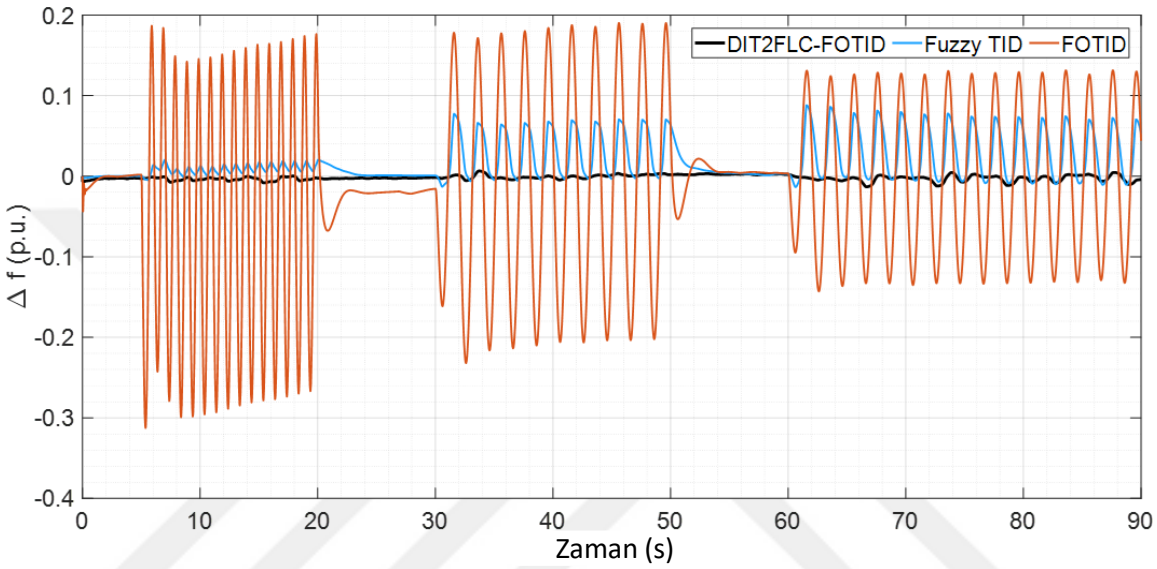
Tablo 5.18'de sunulan sayısal bulgular, önerilen denetleyicinin, FC ve AE'ye yönelik FDI saldırıları altında mikroşebeke sisteminde frekans salınımlarını azaltma konusunda yüksek başarı sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Uygulanan performans kriterlerine göre, DIT2FLC-FOTID denetleyicisi Fuzzy TID kontrolörüne kıyasla frekans salınımını %83,55 ila %97,77 oranında, FOTID kontrolörüne kıyasla ise %98,42 ila %99,98 oranında azaltarak önemli bir iyileşme sağlamıştır.

Senaryo 3

Bu senaryoda, Şekil 5.24'te gösterilen yapıya uygun olarak, enerji depolama ve depolanan enerjinin mikroşebekeye aktarımından sorumlu denetleyicinin giriş sinyaline yönelik FDI türü siber saldırıların sistem frekans yanıtı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda aşağıda belirtilen kötü niyetli sinyaller sırasıyla uygulanmıştır:

- 5 s < t < 20 s aralığında, kontrol girişine kötü niyetli $v_3(t)$ sinyali,
- 30 s < t < 50 s aralığında, $v_4(t)$ sinyali,
- 60 s < t < 90 s aralığında ise, $v_2(t)$ sinyali uygulanmıştır.

Bu saldırı senaryosu altında, DIT2FLC-FOTID, Fuzzy-TID ve FOTID denetleyicilerinin mikroşebekenin frekans yanıtları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.31'de sunulmuştur.



Şekil 5.31. Senaryo 3 için kontrolörlerin frekans yanıtları

Şekil 5.31 incelendiğinde, Fuzzy-TID ve FOTID denetleyicilerin frekans salınımlarını nominal şebeke frekansına yeterli düzeyde sönümleyemediği gözlemlenmektedir. Buna karşın, önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisi, frekans salınımlarını etkin bir şekilde bastırarak sistem kararlılığını büyük ölçüde korumuş ve sistem frekansını müsaade edilir sınırlar içerisinde tutmayı başarmıştır. Frekans yanıtlarına ilişkin sayısal analizler, IAE, ISE, ITAE ve ITSE gibi performans indeksleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular Tablo 5.19'da sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, önerilen kontrol stratejisinin başarısı açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5.19. Senaryo 3'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
DIT2FLC-FOTID	0,3179	0,00177	15,13	0,0932
Fuzzy TID	1,836	0,0915	104,2	5,554
FOTID	7,561	1,079	325,5	40,12

Uygulanan performans kriterlerine göre, DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin, Fuzzy TID kontrolörüne kıyasla frekans salınımını %67'nin üzerinde, FOTID kontrolörüne kıyasla ise %88'in üzerinde azalttığı gözlemlenmiştir.

Senaryo 4

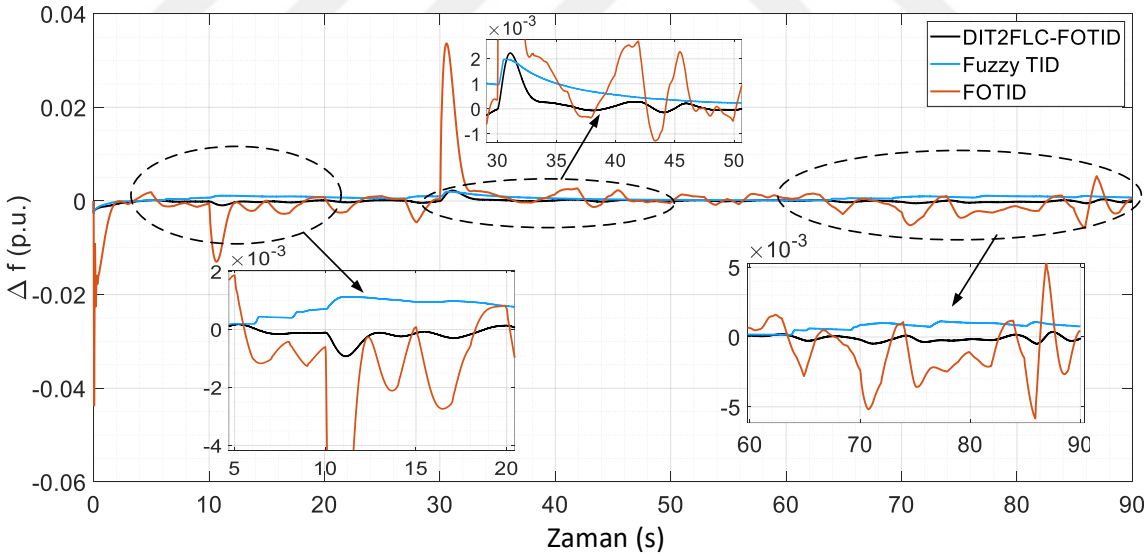
Bu bölümde, hidrojen tabanlı enerji depolama sistemine yönelik DoS saldırıları altında önerilen kontrol yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla aşağıdaki senaryolar uygulanmıştır:

- t = 10 s anında, FC'nin kontrol bağlantısına DoS saldırısı gerçekleştirilmiştir.
- t = 40 s anında, AE'nin kontrol bağlantısı hedef alınmıştır.
- t = 70 s anında ise, hem FC hem de AE kontrol hatları aynı anda saldırıya uğramıştır.

Bu saldırıların sonucunda, aşağıdaki zaman aralıklarında sistem bileşenleri devre dışı kalmıştır:

- 10 s – 30 s aralığında FC,
- 40 s – 60 s aralığında AE,
- 70 s – 90 s aralığında ise hem FC hem de AE sistem dışı bırakılmıştır.

Bu koşullar altında DoS saldırılarının kontrolörlerin frekans yanıtına etkisi Şekil 5.32'de sunulmaktadır.



Şekil 5.32. Senaryo 4 için kontrolörlerin frekans yanıtları

Şekil 5.32, önerilen kontrolörün DoS saldırıları altındaki başarısını, Fuzzy TID ve FOTID denetleyicilerle karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Önceki senaryolarda olduğu gibi, önerilen kontrol yöntemi bu senaryoda da frekans salınımlarını etkin biçimde bastırmış ve sistem frekansını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmayı başarmıştır.

Denetleyicilerin frekans yanıt performansları çeşitli performans kriterleri kullanılarak sayısal olarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular Tablo 5.20'de sunulmuştur.

Tablo 5.20. Senaryo 4'e göre denetleyici performanslarının karşılaştırılması

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
DIT2FLC-FOTID	0,0202	$1{,}328x10^{-5}$	0,7627	0,00035
Fuzzy TID	0,0620	$5{,}402x10^{-5}$	2,842	0,002392
FOTID	0,1827	0,001745	7,105	0,0482

Tablo 5.20 incelendiğinde, önerilen DIT2FLC-FOTID denetleyicisinin mikroşebeke frekansının dinamik yanıtını Fuzzy TID denetleyiciye kıyasla %83.55'in üzerinde, FOTID denetleyiciye kıyasla ise %98.42'nin üzerinde iyileştirdiği gözlemlenmektedir.

5.3.4. Genel Değerlendirme ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, YEK içeren izole mikroşebekeler için siber saldırılara karşı dayanıklı bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Bu amaçla, BDEG, BGTG ve PV kaynaklarını içeren bir izole mikroşebeke modeli oluşturulmuştur. Enerji üretimi belirsizlikler içeren YEK tabanlı sistemlerde enerji sürekliliğini sağlamak amacıyla hem enerji depolama sistemlerine hem de sağlam kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, hidrojen teknolojisi, YEK'in güç sistemlerine entegrasyonundaki zorlukların aşılmasında önemli fırsatlar sunmaktadır.

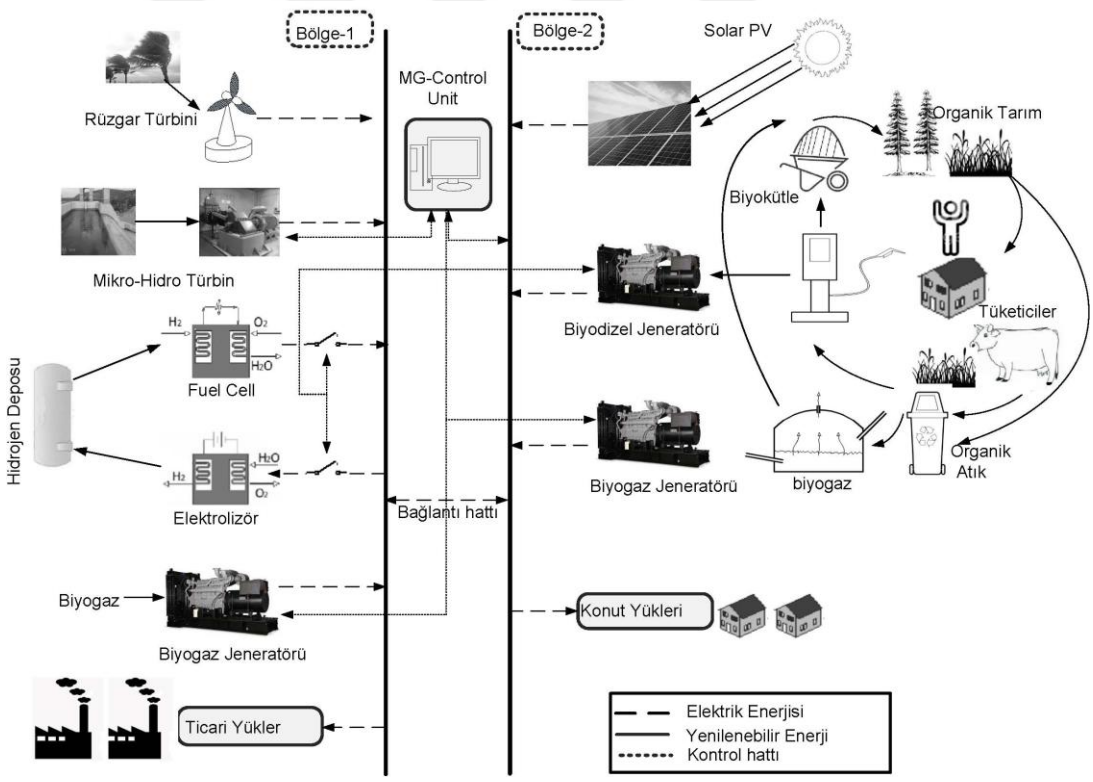
Tasarlanan mikroşebekede, YEK'den üretilen fazla elektrik enerjisi bir AE aracılığıyla hidrojene dönüştürülmekte, üretilen hidrojen ise FC'de kullanılarak sistemde frekans salınımlarını bastırmakta ve enerji sürekliliğini sağlamaktadır. İzole çalışan güç sistemlerinde enerji depolama sistemlerine yönelik siber saldırılar, özellikle kritik sistem bileşenlerini içeren mikroşebekelerde ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Bu kapsamda, YEK'in belirsiz doğası ve olası siber saldırılar göz önünde bulundurularak mikroşebeke frekansını dengelemek amacıyla DIT2FLC-FOTID Kontrolörü geliştirilmiştir. Kontrol kazançları, yakın zamanda geliştirilen CIOA algoritması ile belirlenmiştir. Geliştirilen kontrolörün başarısı, literatürde yakın zamanda kullanılan Fuzzy TID [134] ve FOTID [135] kontrolörlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yenilenebilir kaynakların süreksiz doğasına ve siber saldırı tehditlerine rağmen, önerilen denetleyici yapısı mikroşebeke sisteminde YFK görevini başarıyla yerine getirmiştir.

Önerilen kontrol stratejisi, biyokütle kaynakları, güneş enerjisi ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerini içeren izole bir mikroşebeke için geliştirilmiş olsa da, dağıtık enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerine sahip diğer mikroşebeke türlerine de uygulanabilir niteliktedir. Gelecek çalışmalarda, siber saldırıların tespiti ve kontrol parametrelerinin çevrim içi olarak uyarlanmasına yönelik yapay zeka tabanlı yaklaşımların kullanılması; kontrol stratejilerinin

esneklik ve dayanıklılık açısından daha da geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu yönüyle bu çalışmanın, farklı konfigürasyonlara ve enerji profillerine sahip mikroşebeke sistemlerine uyarlanabilirliği, alandaki araştırma potansiyelini önemli ölçüde genişletmektedir.

5.4. Çok Bölgeli Mikroşebekelerin Tip-2 Bulanık Mantık Destekli Kesir Dereceli Kontrolü ve Gerçek Zamanlı Doğrulanması

Geleneksel fosil yakıt temelli enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri, artan küresel enerji talebiyle birleştiğinde; sürdürülebilir, düşük emisyonlu ve esnek sistem çözümlerine olan ihtiyacı daha da belirgin hale getirmiştir. Bu doğrultuda, mikroşebekeler; dağıtık enerji kaynakları, yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama teknolojileri ile entegre edilerek, hem şebekeye bağlı hem de izole modda çalışabilen etkili enerji altyapıları olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, frekans kararlılığını artırmaya yönelik olarak, FC destekli iki bölgeli izole bir mikroşebeke yapısı oluşturulmuştur. Mikroşebekenin temel mimarisi Şekil 5.33'te sunulmaktadır.



Şekil 5.33. İki bölgeli mikroşebekenin yapısı

Tasarlanan mikroşebekenin YFK'sı için önerilen kontrol yapısı; DIT2FLC destekli kesir dereceli PI ve PD (DIT2FLC+FOPI-FOPD) kontrolörlerinin ardışık olarak bağlandığı bir kaskat mimariden oluşmaktadır. Bu kontrolör yapısı, hem sistemin dinamik tepkisini iyileştirmeyi hem de YEK'ten kaynaklanan belirsizlikleri daha etkin bir şekilde yönetmeyi amaçlamaktadır.

Kontrolör kazançlarının optimize edilmesinde, literatürde yakın zamanda geliştirilen ve trigonometri temelli bir yaklaşım olan CIOA kullanılmıştır. CIOA'nın, popüler sezgisel algoritmalara kıyasla daha hızlı yakınsama, daha düşük hesaplama maliyeti ve yüksek doğruluk sağladığı literatürde gösterilmiştir [46].

Bu bölümde MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, gerçek zamanlı kaydedilmiş güneş ışınımı ve rüzgar verileri ile birlikte gerçeğe uygun rastgele yük varyasyonları kullanılmıştır. Önerilen DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrolörünün performansı, çeşitli senaryolar altında Tip-I bulanık kontrolör ve FOPI-FOPD kontrolörün performansı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kontrolörün doğrulaması, OPAL-RT tabanlı gerçek zamanlı benzetim platformunda gerçekleştirilerek, benzetim sonuçları ile gerçek zamanlı sistem yanıtları karşılaştırılmıştır

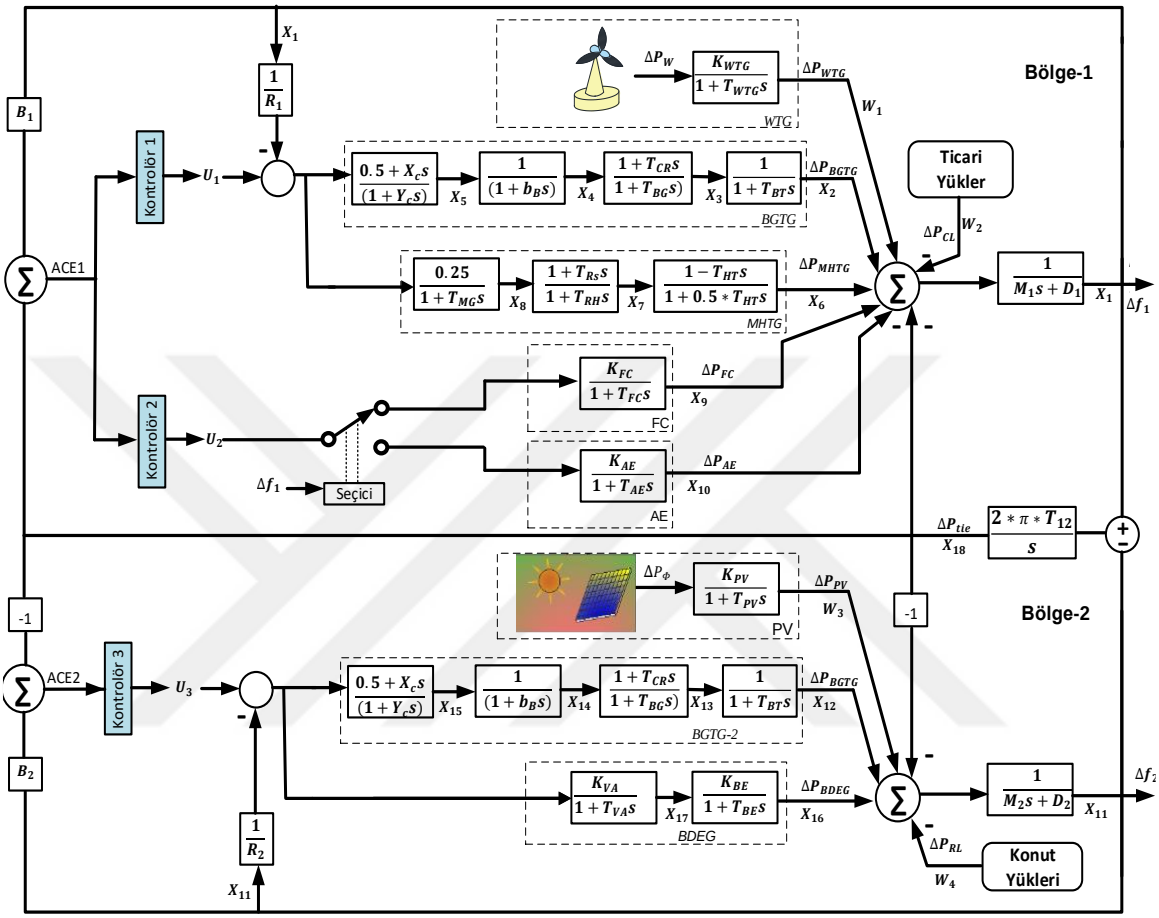
5.4.1. Mikroşebeke Yapısı ve Modeli

İzole mikroşebekelerin tasarımında, ilgili bölgenin enerji kaynakları ile çevresel ve ekonomik koşullar birlikte değerlendirilmelidir. Bu bölümde, farklı yük tipleri ve çeşitli YEK'in bulunduğu iki farklı bölgede, bu kaynakların etkin kullanımını gözeterek oluşturulmuş iki bölgeli izole mikroşebeke yapısı sunulmaktadır. Önerilen mikroşebeke yapısı Şekil 5.33'te gösterilmektedir.

Birinci bölgede, temel frekans regülasyon birimleri olarak biyogaz BGTG ve MHTG yer almaktadır. İkinci bölgede ise, senkron generatör temelli üretim birimleri olan BGTG ve BDEG bulunmaktadır. Ataletsiz karakterde çalışan PV ve WTG sistemleri sırasıyla birinci ve ikinci bölgede yer almakta olup, bu sistemler sönümleme yetisine sahip denetleyicilere sahip değildir. Üretilen elektrik enerjisi, birinci bölgede endüstriyel yükler, ikinci bölgede ise konut tipi yükler tarafından tüketilmektedir.

Biyogaz ve biyodizel sistemlerinin üretim kapasiteleri, büyük ölçüde çevresel ve iklim koşullarına, atık çeşitliliğine ve tarımsal artıkların değerlendirilebilirliğine bağlıdır. Rüzgar enerjisi öngörülemez yapıda olup, güneş ışınımı ise gün içerisinde sınırlı zaman dilimlerinde üretim sağlar. Bu belirsizlikler, mikroşebekenin atalet ve sönümleme kapasitesini azaltarak sistem kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu durum, enerji depolama sistemleri ve daha gelişmiş bir enerji yönetimi yaklaşımı gerektirmektedir. Bu bağlamda, AE ve FC birimlerinden oluşan hidrojen temelli enerji depolama yapıları sistem kararlılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır [28]. Bu doğrultuda, mikroşebekenin birinci bölgesine entegre edilen hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi, üretim fazlası enerjiyi AE aracılığıyla hidrojene dönüştürmekte; enerji ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda ise FC bu hidrojeni tekrar elektriğe çevirerek sistemin güç dengesini sağlamaktadır. Şekil 5.33'de; yenilenebilir enerji döngüsü (düz çizgi), frekans kontrol ağı (kısa kesikli çizgi) ve mikroşebeke yüklerine yönelik güç iletim yapısı (uzun kesikli çizgi) gösterilmektedir.

Mikroşebeke sisteminin frekans kararlılığı analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, Şekil 5.34'te gösterilen iki bölgeli mikroşebeke sistemine ait YFK modeli [67,68,72,103,119] numaralı referanslar göz önünde bulundurularak modellenmiştir.



Şekil 5.34. İki bölgeli mikroşebekenin YFK modeli

Mikroşebeke sisteminin tasarımında kullanılan temel parametreler Tablo 5.21'de sunulmuştur.

Tablo 5.21. Mikroşebeke modelinin parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer
$K_{PV};\ T_{PV}$	PV sisteminin kazancı ve zaman sabiti	1 ; 1,8 s
$X_c;\ Y_c;\ b_B$	ilerleme sabiti; gecikme zamanı; valf aktüatörü dinamiği;	0,3 ; 1 s ; 0,05
$T_{CR};\ T_{BG}$	Yanma reaksiyon gecikmesi ve biyogaz gecikmesi	0,01 s ; 0,23 s
T_{BT}	BGTG ünitesinin deşarj zaman sabiti	0,2 s
$K_{MG}; T_{MG}; T_{Rs};$ $T_{RH}; T_{HT}$	Sırası ile hız regülatörünün kazancı ve zaman sabiti; MHTG ünitesinin regülatör sıfırlama ve geçici düşüş zaman sabitleri ve hidro türbinin zaman sabiti	0,25; 0,2 s ; 5 s ; 28,75 s; 1 s
$K_{AE};\ T_{AE}$	AE sisteminin kazancı ve zaman sabiti	0,002 ; 0,5 s
$K_{FC};\ T_{FC}$	FC sisteminin kazancı ve zaman sabiti	0,01 ; 4 s
$K_{WTG};\ T_{WTG}$	WTG sisteminin kazancı ve zaman sabiti	1 ; 1,5 s
$K_{VA};\ T_{VA}$	Valf kazancı ve aktüatör gecikmesi	0,5 ; 0,05 s
$K_{BE};\ T_{BE}$	Motor kazancı ve zaman sabiti	1 ; 0,5 s
$D_1;\ D_2$	1. ve 2. bölgeye ait sönümleme katsayısı	0,01
$M_1;\ M_2$	1. ve 2. bölgeye ait eşdeğer atalet sabiti	0,2
$R_1;\ R_2$	Droop katsayıları (Hz/p.u. MW)	2,4
$B_1;\ B_2$	1. ve 2. bölgeye ait frekans duyarlılık katsayısı	0,510 ; 0,512

5.4.2. Kontrolörün Tasarımı

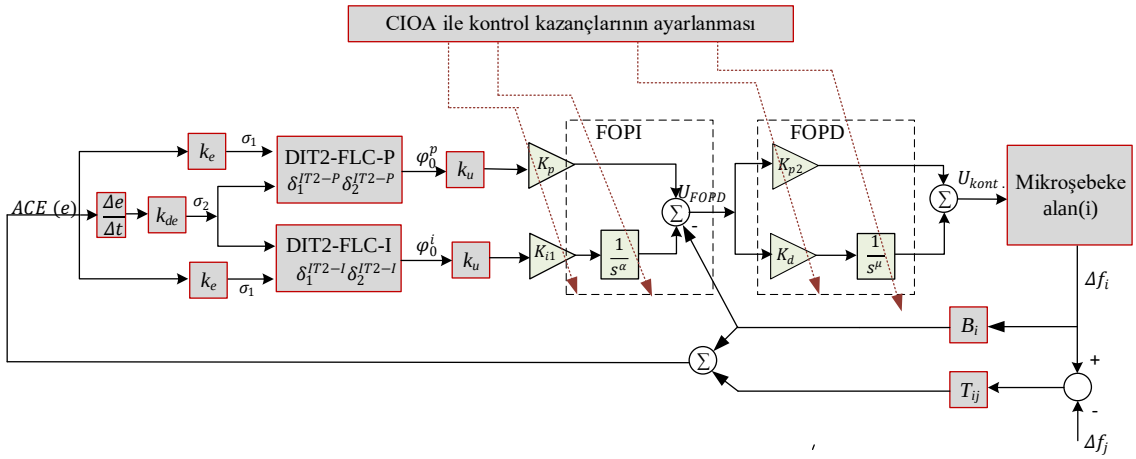
İzole mikroşebekelerde, YEK'in değişkenliği ve sistemin sınırlı atalet yapısı, frekans sapmalarının etkin şekilde kontrolünü zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, frekans kararlılığına yönelik sağlam ve hızlı tepki veren kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada önerilen kontrol yaklaşımı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, kesir dereceli PI–PD (FOPI-FOPD) yapısındaki kaskat kontrolörün kazançları, CIOA ile optimize edilmektedir. Bu yapı, sistemin genel dinamik performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

İkinci aşamada ise, sistemin değişken koşullara verdiği tepkinin daha kararlı ve uyarlanabilir olması için, kontrol hatası (e) ve hata değişim oranı ($\frac{de}{dt}$) giriş sinyalleri DIT2FLC aracılığıyla normalize edilerek FOPI-FOPD kontrolörün giriş sinyali elde edilmektedir.

Bu bölümde kullanılan DIT2FLC kontrolör yapısı, Bölüm 5.2.2'de ayrıntılı olarak açıklanan tasarıma sahiptir. Aynı giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ile aynı kural tabanı kullanılmıştır. Dolayısıyla bu bölümde, yalnızca bu yapının genel kontrol mimarisi içindeki işlevi ve katkısı üzerinde durulacaktır.

Şekil 5.35'te, önerilen DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrolör yapısının genel blok diyagramı sunulmaktadır.



Şekil 5.35. DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrolörün şematik gösterimi

Burada, δ_i^{IT2}, IT2FLC yapısında FOU'nun şeklini belirleyen ayarlanabilir bir parametredir. Buradaki i (i = 1 ve 2), DIT2FLC için giriş numarasını temsil etmektedir. IT2FLC tasarım süreci, esasen δ_i^{IT2} parametresinin ayarlanması yoluyla CC oluşturulmasına dayanmaktadır. δ_i^{IT2} değerlerine bağlı olarak, üç farklı CC elde edilmekte olup, bu yapıların genel özellikleri Tablo 5.22'de özetlenmiştir.

Tablo 5.22. δ_i^{IT2} değerine göre CC sınıflandırılması

Durum	Değişken aralığı	CC Tipi
Durum 1	$0 < \delta_i^{IT2} \leq 0{,}382$	A-CC
Durum 2	$0{,}618 \leq \delta_i^{IT2} < 1$	S-CC
Durum 3	$0{,}382 < \delta_i^{IT2} < 0{,}618$	M-CC

DIT2FLC'nin belirsizlik bölgesini belirleyen δ_i^{IT2} parametresi, CC'lerin karakteristiğini belirlemekte olup; A-CC, M-CC ve S-CC olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır.

Önerilen kontrol stratejisinin ilk aşamasında FOPI-FOPD kaskat kontrolörünün kazançlarının belirlenmesinde CIOA kullanılmıştır. Söz konusu algoritmanın etkinliğini artırmak ve en uygun çözümü elde edebilmek için, ITAE performans indeksi seçilmiştir. ITAE performans indeksi, hata büyüklüğünü zamana bağlı olarak ağırlıklandırarak, özellikle sistemin uzun süreli kararsızlıklarını baskılamada etkili bir ölçüt sunmaktadır. Bu çerçevede, CIOA ile optimize edilen kontrolör parametreleri Tablo 5.23'te sunulmaktadır.

Tablo 5.23. CIOA algoritması ile elde edilen kontrolör parametreleri

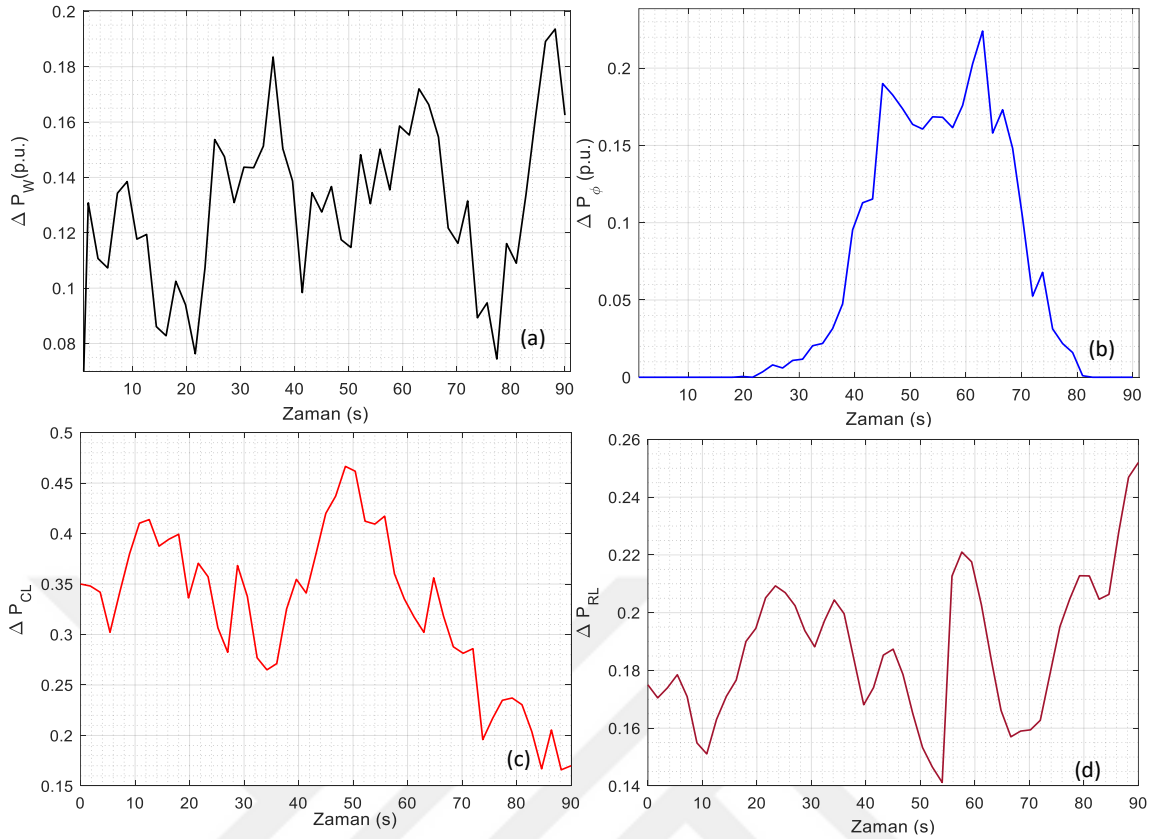
Kontrolör	K_{p1}	K_i	α	K_{p2}	K_d	μ
Kontrolör 1	0,21762	1,18801	1,20084	1,69297	1,73038	0,91639
Kontrolör 2	-0,52185	1,64909	0,91840	-1,11233	-4,99698	1,05489
Kontrolör 3	0,56494	1,49634	0,52552	6,28796	0,71460	1,37302

5.4.3. Benzetim Bulguları

Bu bölümde, önerilen kontrol yapısının geçerliliğini test etmek amacıyla iki bölgeli izole bir mikroşebeke modeli üzerinde çeşitli vaka çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mikroşebeke, farklı YEK'in bulunduğu iki bölgeden oluşmaktadır. 1. bölgede; WTG, BGTG ve MHTG yer alırken, 2. bölgede güneş potansiyelinden yararlanan PV sistem, ayrıca 1. bölgeden bağımsız çalışan bir BGTG ve BDEG bulunmaktadır. Bu yapı, her iki bölge için özel yük profillerine uygun enerji arzı sağlayarak şebekenin esnekliğini ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

Bölümler arasında enerji alışverişi, iki bölgeyi birbirine bağlayan bir iletim hattı üzerinden sağlanmaktadır. 1. bölgedeki ticari yükler ve 2. bölgedeki konut yükleri, ilgili bölgenin üretim kaynaklarından beslenmektedir. YEK'in özellikle rüzgar ve güneş gibi değişken karakteristikleri nedeniyle mikroşebekede enerji sürekliliğini sağlamak adına 1. bölgede gelişmiş bir enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. Bu sistem, fazla enerjiyi hidrojen formunda depolayan bir AE ve ihtiyaç halinde bu hidrojeni elektrik enerjisine dönüştüren bir FC içermektedir. Bu yapı, frekans dalgalanmalarının azaltılmasında önemli bir rol oynar ve sistemin genel esnekliğini artırır.

Mikroşebeke sistemi, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve önerilen kontrolörlerin optimizasyonu için 5 senaryo gerçekleştirilmiştir. Senaryo tabanlı analizler, kontrolör performansının farklı çalışma koşulları altında değerlendirilmesine imkân tanımakta ve sistemin dinamik davranışlarının ayrıntılı biçimde incelenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen kontrol yapısının gerçek zamanlı uygulanabilirliği OPAL-RT platformu üzerinde gerçekleştirilmiş benzetimler ile doğrulanmıştır. Şekil 5.36'da, vaka çalışmalarında kullanılan gerçek zamanlı kaydedilmiş güneş ışınımı [118] ve rüzgar gücü değişimleri [124] ile gerçek dünya ile uyumlu yük varyasyonları sunulmuştur.



Şekil 5.36. Kaynak ve yük değişimleri **(a):** Rüzgar gücü **(b):** Solar güç **(c):** Ticari yükler **(d):** Konut yükleri

Şekil 5.36-a ve Şekil 5.36-b, sırasıyla bir günlük zaman diliminde kaydedilen rüzgar ve güneş ışınımı güç değişimlerini, 90 saniyelik benzetim süresine ölçeklenmiş biçimde göstermektedir. Benzer biçimde, Şekil 5.36-c ve Şekil 5.36-d ise gün boyunca değişkenlik gösteren ticari ve konut yüklerini temsil etmektedir. Bu kaynak ve yük profilleri, önerilen kontrol yapısının farklı ve gerçekçi çalışma senaryoları altında performansının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Mikroşebekede, sağlam bir YFK sağlamak amacıyla aynı yapıya ve farklı kazançlara sahip 3 kontrolör kullanılmıştır. Kontrolör 1, 1. bölgede yer alan BGTG ve MHTG ünitelerinin yönetiminden sorumludur. Kontrolör 2, frekans regülasyonuna katkı sağlayan FC ve AE birimlerinin katılımını düzenlemektedir. Kontrolör 3 ise, 2. bölgede bulunan BGTG ve BDEG ünitelerinin AGC'den sorumludur. Kontrolörlerin CIOA ile belirlenen optimal parametreleri Tablo 5.23'te sunulmuştur. Benzetimler, beş senaryo çerçevesinde yürütülmüş olup; her bir senaryoda rüzgar ve güneş kaynaklarının sisteme entegrasyon oranları, frekans kontrolüne katılan dağıtık enerji kaynaklarının katkı düzeyleri, ticari ve konut yüklerinin azaltılmasına ilişkin senaryolar ile sistem parametrelerinde uygulanan değişkenlikler değerlendirilmiştir.

Kesir dereceli kontrolörler için hata sinyallerini uyarlayan DIT2FLC'lerin FOU'sunu belirleyen farklı CS değerlendirilmiş ve bu yapılandırmalar Tablo 5.24'te sunulmuştur.

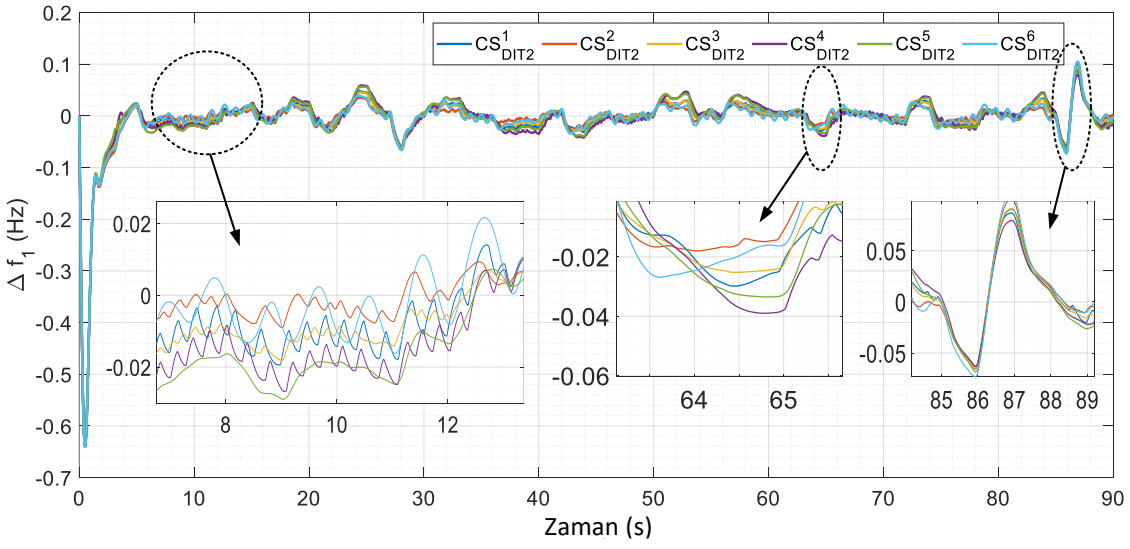
Tablo 5.24. DIT2FLC'lerin FOU'sunu belirleyen katsayı ayarları

Katsayı Ayarları (CS)	Dizayn Değişkenleri		CC Tipleri
	δ_i^{IT2-p}	δ_i^{IT2-i}	
CS_{DIT2}^1	0,2	0,5	φ_0^p = A-CC ve φ_0^i = M-CC
CS_{DIT2}^2	0,5	0,2	φ_0^p = M-CC ve φ_0^i = A-CC
CS_{DIT2}^3	0,5	0,5	φ_0^p = M-CC ve φ_0^i = M-CC
CS_{DIT2}^4	0,2	0,8	φ_0^p = A-CC ve φ_0^i = S-CC
CS_{DIT2}^5	0,8	0,8	φ_0^p = S-CC ve φ_0^i = S-CC
CS_{DIT2}^6	0,8	0,2	φ_0^p = S-CC ve φ_0^i = A-CC

Senaryo 1: Günlük İşletim Koşullarında Frekans Analizi

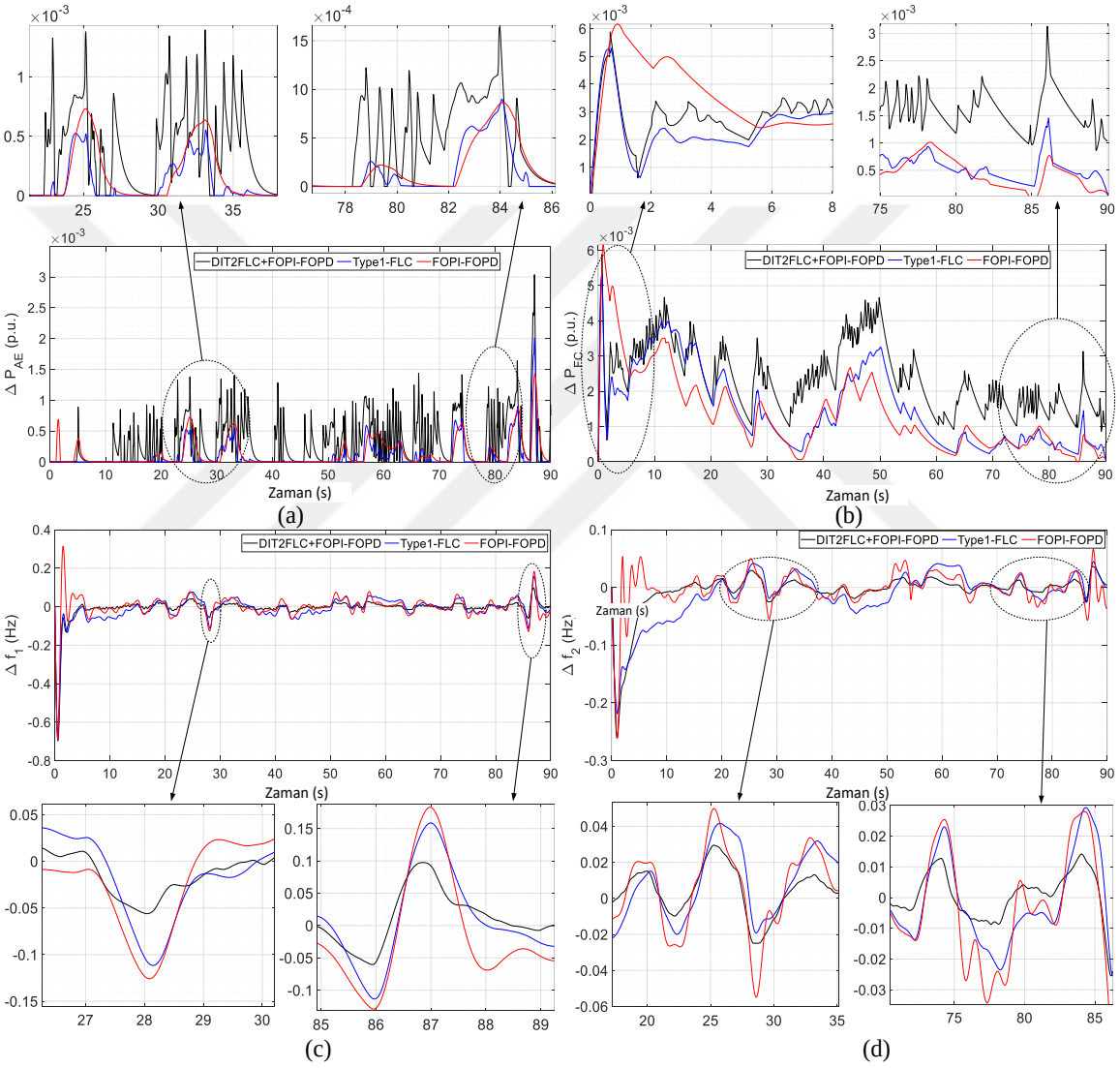
Bu senaryoda, izole iki bölgeli bir mikroşebeke yapısının, normal bir gün için maruz kalabileceği frekans salınımları değerlendirilmiştir. Güneş ışınımı, rüzgar hızı ve elektrik tüketimi gibi değişkenlere dayalı olarak oluşturulan güç profilleri dikkate alınmış ve benzetim ortamında uygulanmıştır. Şekil 5.36'da bu kaynak ve yük değişimlerine ilişkin grafikler sunulmaktadır. Mikroşebekedeki diğer YEK'in yeterli kapasiteye sahip olduğu ve aktif olarak çalıştığı varsayılmıştır.

Önerilen DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrol yapısı, Tablo 5.24'te sunulan altı farklı konfigürasyon için ayrı ayrı ayarlanmış; her bir yapılandırmaya ilişkin frekans yanıtları Şekil 5.37'de gösterilmiştir. Şekildeki frekans tepkileri karşılaştırıldığında, birinci bölgede en iyi frekans kontrol yanıtı, kontrol yapısının CS_{DIT2}^2 katsayı ayarı ile elde edilmiştir. Bu nedenle, bu yapılandırma sonraki tüm senaryolarda da temel alınacaktır.



Şekil 5.37. Farklı CS değerlerine göre ayarlanmış kontrolörün frekans yanıtı

Kontrolörün performansı, Tip-I bulanık mantık kontrolörü ve FOPI-FOPD kontrolörü ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.38'de sunulmuştur. Şekil 5.38 (a) ve (b), sırasıyla AE'nin sistemden çektiği güç değişim ile FC'nin sisteme verdiği güç değişimini göstermektedir. Bu veriler, kontrolörlerin AE ve FC ünitelerini ne ölçüde etkin kullandığını ortaya koymaktadır. Şekil 5.38 (c) ve (d) ise, her iki bölgedeki frekans yanıtlarının karşılaştırmalı değerlendirmesini içermektedir.



Şekil 5.38. Senaryo 1 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı

Frekans yanıtlarının sayısal olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla, kontrolörlerin performansı ITAE kriterine göre değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.25'te sunulmuştur.

Tablo 5.25. Senaryo 1 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları

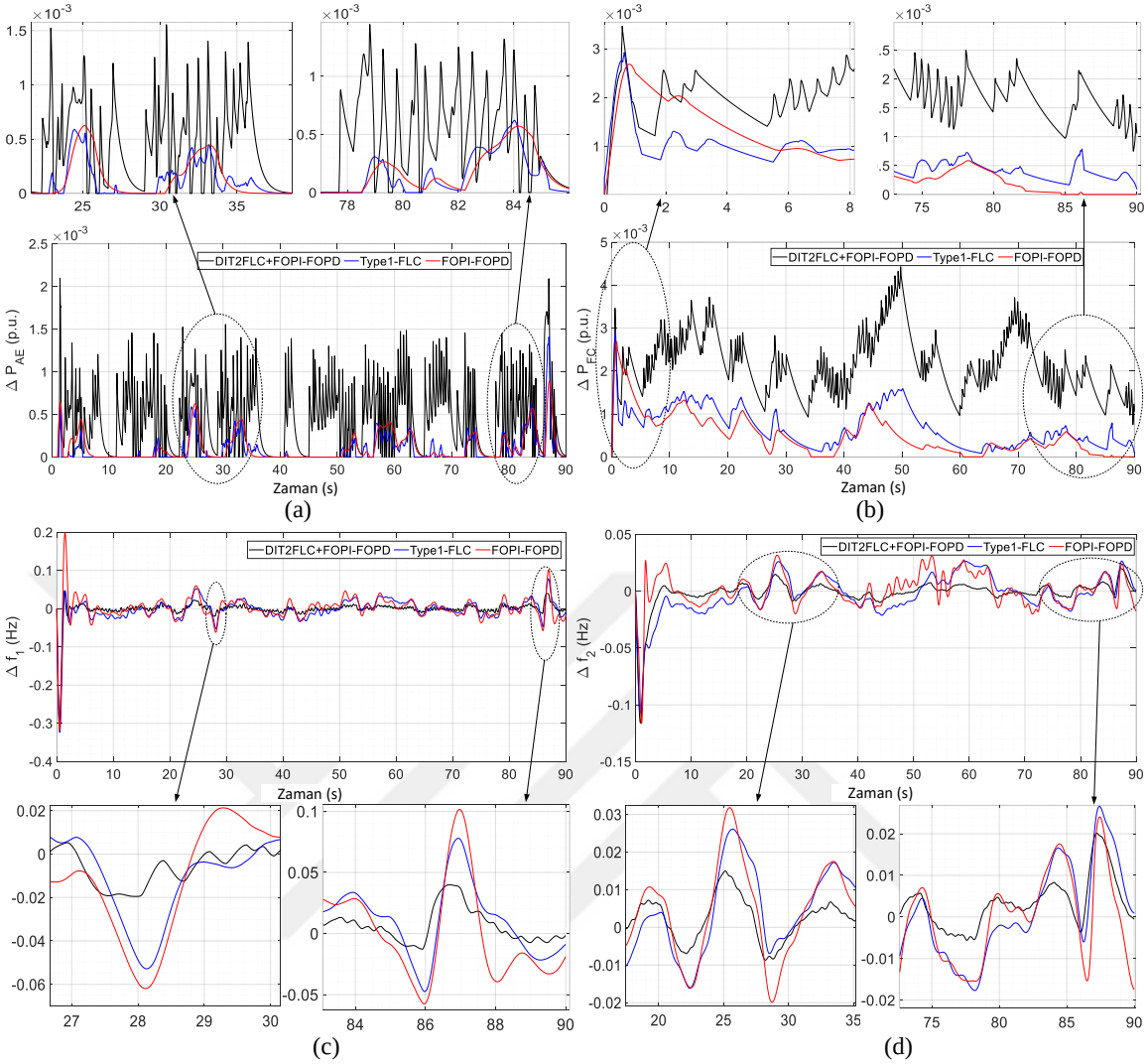
Bölge	DIT2FLC+FOPI-FOPD	Tip-I FLC	FOPI-FOPD
1. Bölge	47,73	118,2	122
2. Bölge	38,39	76,53	66,68

Birinci bölge için yapılan analizde, önerilen kontrolörün frekans salınımlarını Tip I-FLC kontrolörüne göre %59,6; FOPI-FOPD kontrolörüne göre ise %60,8 oranında azalttığı görülmüştür. Benzer şekilde, ikinci bölgede de önerilen kontrolör, frekans salınımlarını sırasıyla Tip I-FLC kontrolörüne göre %49,8 ve FOPI-FOPD kontrolörüne göre %42,4 oranında düşürmüştür.

Senaryo 2: Azaltılmış Yük Talebinin YFK Performansına Etkisi

Bu senaryoda, Şekil 5.36'da sunulan rüzgar ve güneş enerjisi üretimi altında, tüketici güç talebinin azaltılmasının mikroşebeke frekans kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, konut ve ticari yüklerin günlük tüketim değerleri yarıya düşürülmüştür. Senaryoda, BGTG'ler, MHTG ve BDEG ünitelerinin yeterli kapasiteye sahip olduğu varsayılmıştır.

Mikroşebekenin YFK performansından sorumlu kontrolörlerin karşılaştırmalı analizi Şekil 5.39'da sunulmuştur. Şekil 5.39 (a) ve (b), sırasıyla AE'nin sistemden çektiği ve FC'nin sisteme verdiği güç değişimlerini göstermektedir.



Şekil 5.39. Senaryo 2 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı

Grafikler, önerilen kontrolörle birlikte AE ve FC birimlerinde yaklaşık üç kat daha fazla güç değişimi oluştuğunu göstermekte; bu durum, sistem frekansını sönümleme sürecinde bu birimlerin daha etkin kullanıldığını ortaya koymaktadır.

Mikroşebekenin 1. ve 2. bölgelerine ait frekans sapmaları sırasıyla Şekil 5.39 (c) ve (d)'de sunulmuştur. Kontrolörlerin performansları sayısal olarak karşılaştırılmak üzere ITAE performans kriteri kullanılarak değerlendirilmiş; elde edilen sonuçlar Tablo 5.26'da verilmiştir.

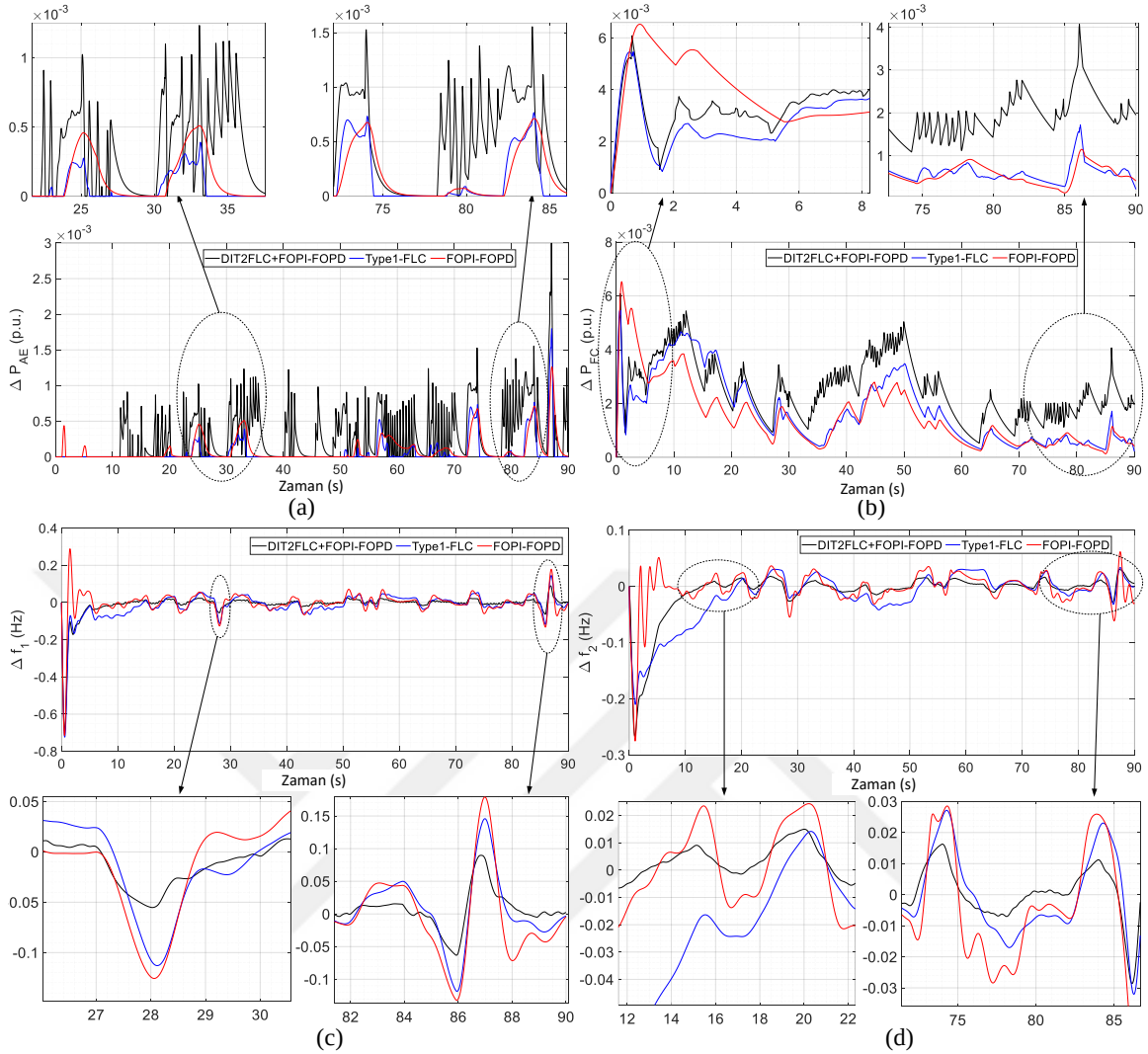
Tablo 5.26. Senaryo 2 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları

Bölge	DIT2FLC+FOPI-FOPD	Tip-I FLC	FOPI-FOPD
1. Bölge	25,63	62,16	71,53
2. Bölge	17,05	42,32	41,67

Karşılaştırmalar sonucunda, önerilen kontrolörün birinci bölgedeki frekans sapmalarını Tip-I FLC kontrolöre kıyasla %58,7; FOPI-FOPD kontrolöre kıyasla ise %64,1 oranında azalttığı görülmüştür. Benzer şekilde, ikinci bölgede, önerilen kontrolör ile elde edilen frekans sapmaları; Tip-I FLC kontrolöre kıyasla %59,7 ve FOPI-FOPD kontrolöre kıyasla %59,1 oranında azaltılmıştır

Senaryo 3: Azaltılmış Rüzgar ve Güneş Katkısının YFK Performansına Etkisi

Bu senaryoda, konut ve ticari yük taleplerinin normal günlük seviyelerde sabit tutulduğu koşullarda, rüzgar ve güneş enerjisi katkısının azaltılmasının mikroşebeke YFK performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yük profilleri Şekil 5.36'da sunulan günlük tüketim eğrileriyle aynı tutulmuş; ancak günlük rüzgar ve güneş üretim eğrileri %50 oranında azaltılmıştır. YFK'ye katılan BGTG, MHTG ve BDEG birimleri, Senaryo 1 ve Senaryo 2'deki ile aynı şekilde yapılandırılmıştır. Bu koşullar altında kontrolörlerin frekans kararlılığına etkisi Şekil 5.40'ta gösterilmektedir.



Şekil 5.40. Senaryo 3 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı

Mikroşebekenin birinci bölgesindeki frekans yanıtları Şekil 5.40 (c)'de, ikinci bölgeye ait yanıtlar ise Şekil 5.40 (d)'de sunulmuştur. İlk devreye almadan sonra, birinci bölgede en yüksek frekans sapması 84 ile 87. saniyeler arasında gözlemlenmiştir. Bu zaman aralığında; frekans değişimi FOPI-FOPD kontrolörü için 0,307 Hz, Tip-I FLC için 0,264 Hz ve önerilen kontrolör için 0.151 Hz olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, önceki senaryolarda olduğu gibi kontrolörlerin performansı ITAE kriterine göre değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 5.27'de sunulmuştur.

Tablo 5.27. Senaryo 3 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları

Bölge	DIT2FLC+FOPI-FOPD	Tip-I FLC	FOPI-FOPD
1. Bölge	43,7	109,2	116,4
2. Bölge	32,48	68,64	63,81

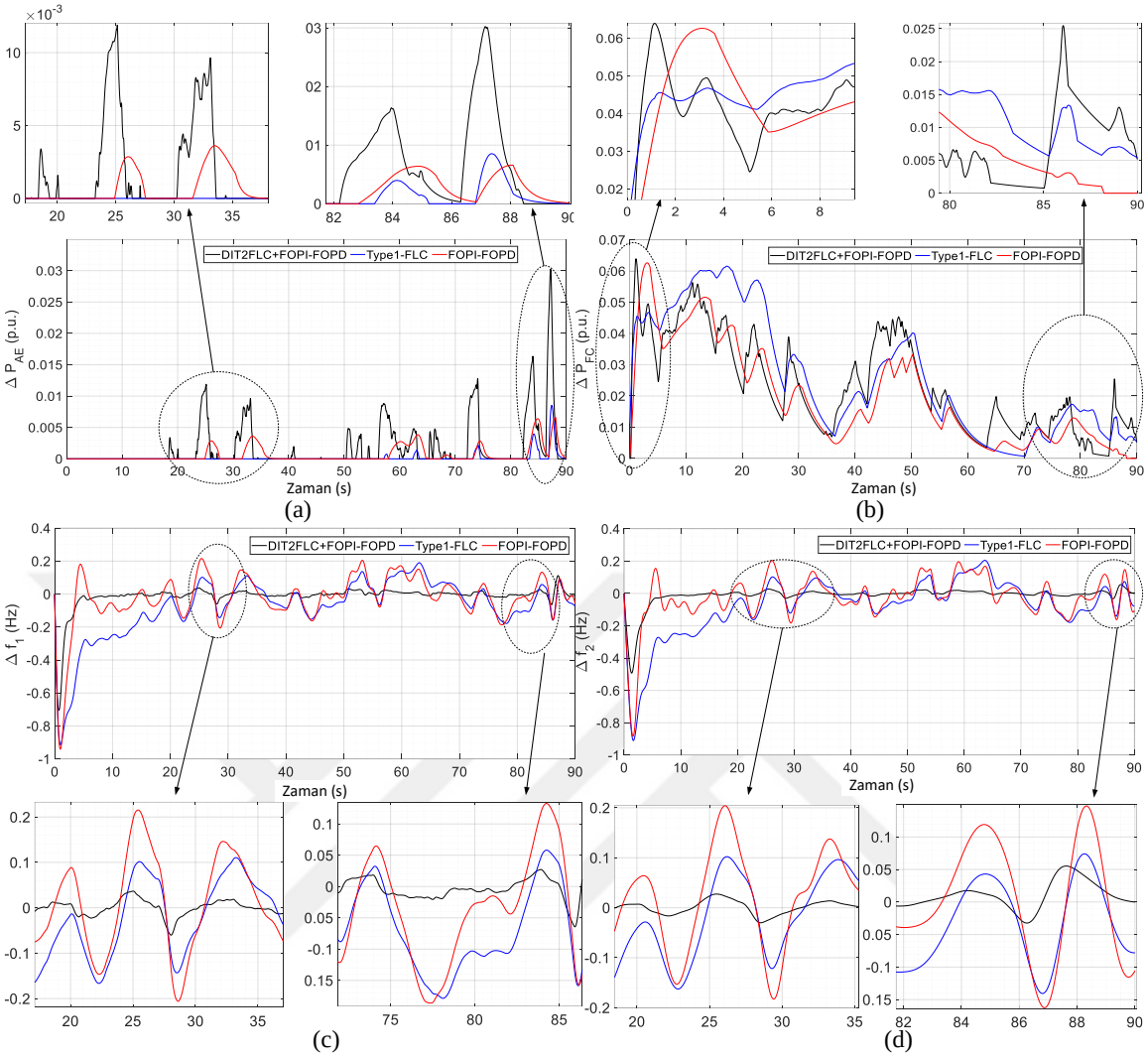
Tablo 5.27 incelendiğinde önerilen DIT2FLC+FOPI-FOPD kontrolörü, frekans salınımlarını Tip-I FLC kontrolöre kıyasla %52'den fazla ve FOPI-FOPD kontrolöre kıyasla ise %49'dan fazla azaltmayı başarmıştır.

Benzetim süresince AE'nin güç değişimleri Şekil 5.40 (a)'da, FC'nin güç değişimleri ise Şekil 5.40 (b)'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, önerilen kontrolörün frekans salınımlarını etkin biçimde bastırmasında, AE ve FC birimlerinin daha aktif bir şekilde devreye alınmasının belirleyici rol oynadığı gözlemlenmektedir.

Senaryo 4: Azalan Enerji Arzı Koşullarında FC'nin Frekans Regülasyonu Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu senaryoda, önerilen kontrolör aracılığıyla hidrojen teknolojisinin, azalan enerji arzını dengeleyici bir kaynak olarak sistem performansına etkisi incelenmiştir. Bu senaryoda, rüzgar ve güneş enerjisi üretiminin yanı sıra konut ve ticari yük taleplerinin, Şekil 5.36'da sunulan günlük değişim eğrilerini izlediği varsayılmıştır. Ancak, sistem bakımı ya da beklenmeyen koşullar nedeniyle mikroşebekedeki diğer dağıtılmış enerji kaynak birimlerinin kapasitesinin azaldığı kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, mikroşebekenin birinci bölgesinde yer alan BGTG ve MHTG'nin frekans kontrolüne katılım oranları sırasıyla %16 ve %53 oranında azaltılmıştır. Benzer şekilde, ikinci bölgede yer alan BGTG ve BDEG'nin kapasitesi de sırasıyla %40 ve %27 oranında düşürülmüştür.

Bu senaryoda, azaltılmış enerji arzının, hidrojen enerjisi aracılığıyla FC tarafından dengelendiği koşullarda sistemin frekans yanıtı analiz edilmiştir. Şekil 5.41'de, bu senaryoya göre kontrolörlerin YFK performansları gösterilmektedir.



Şekil 5.41. Senaryo 4 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı

Mikroşebekenin birinci ve ikinci bölgelerinde oluşan frekans sapmaları, sırasıyla Şekil 5.41 (c) ve (d)'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Kontrolör performanslarının sayısal olarak değerlendirilmesi amacıyla frekans yanıtları ITAE performans kriterine göre analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.28'de özetlenmiştir.

Tablo 5.28. Senaryo 4 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları

Bölge	DIT2FLC+FOPI-FOPD	Tip-I FLC	FOPI-FOPD
1. Bölge	54,74	337,6	302,9
2. Bölge	43,25	333,7	306,3

Tablo 5.28'e göre, önerilen kontrolör birinci bölgedeki frekans salınımını FOPI-FOPD kontrolöre kıyasla %81,9; Tip-I FLC kontrolöre kıyasla ise %83,7 oranında azaltmıştır. İkinci

bölgede ise, frekans salınımlarındaki azalma FOPI-FOPD kontrolöre göre %85,8 ve Tip-I FLC'ye göre %87 olarak hesaplanmıştır.

Benzetim süresince AE ve FC birimlerinin güç değişimleri sırasıyla Şekil 5.41 (a) ve (b)'de sunulmuştur. Önceki senaryolardan farklı olarak bu senaryoda FC yalnızca frekans regülasyonu sağlamakla kalmamış, aynı zamanda azalan arz koşullarında yük talebini karşılamada da aktif rol üstlenmiştir. Şekil 5.41 (a) ve (b) incelendiğinde, önerilen kontrolörün AE ve FC ünitelerini etkin biçimde sisteme entegre ederek frekans sapmalarını nominal sınırlar içinde tuttuğu görülmektedir.

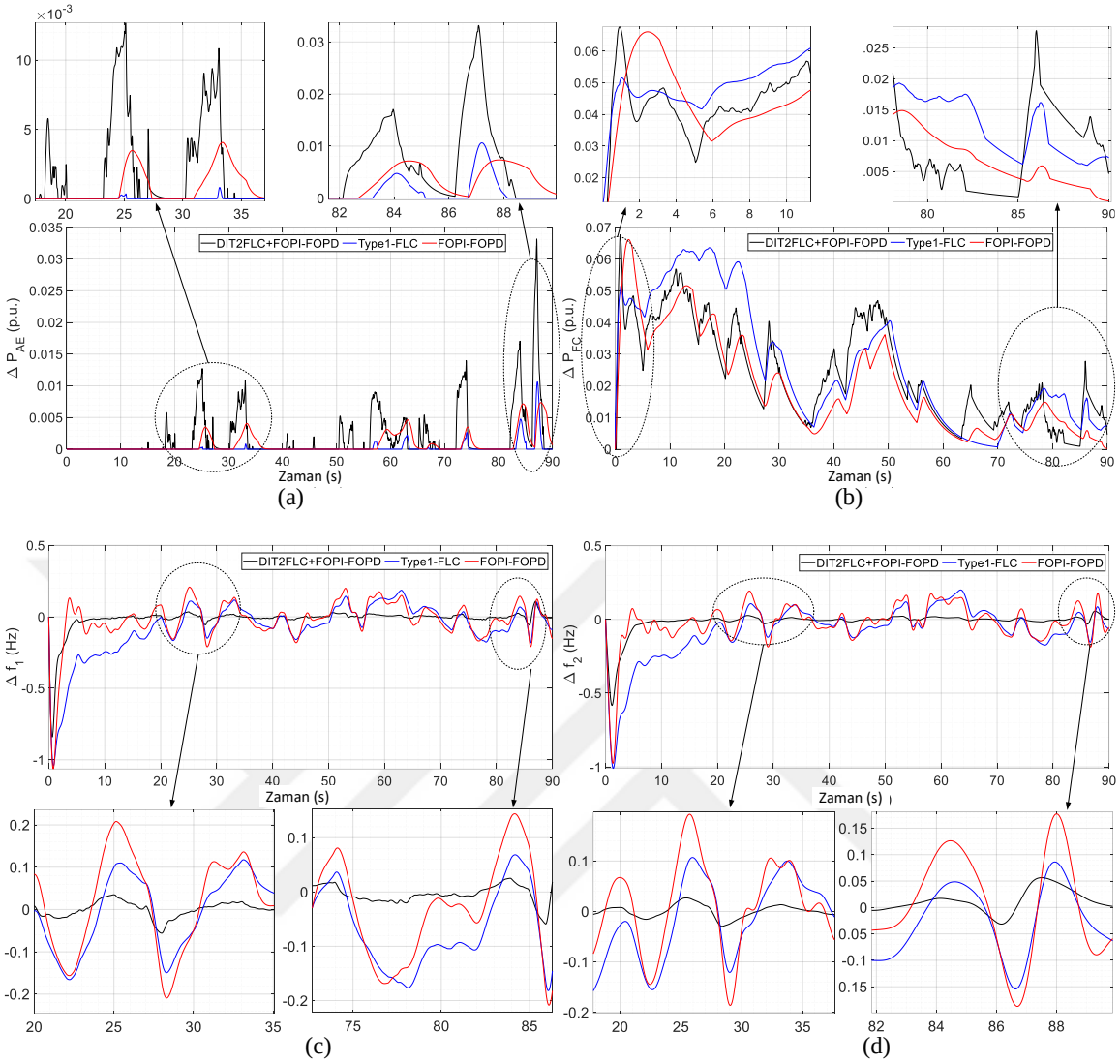
Senaryo 5: Sistem Parametrelerindeki Değişimin Değerlendirilmesi

Bu senaryoda, mikroşebeke parametrelerinde meydana gelen değişiklikler karşısında önerilen kontrol yapısının sağlamlığı analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, sistem parametreleri Tablo 5.29'da belirtildiği şekilde güncellenmiştir.

Tablo 5.29. Mikroşebeke parametre değişim oranları

Parametre	Değişim oranı	Parametre	Değişim oranı
T_{VA}	+%10	T_{BE}	-%10
M	-%25	T_{HT}	+%20
D	-%15	B_1	+%20
R	+%25	B_2	-%10

Senaryo 5, Senaryo 4 ile benzer işletme koşullarını esas almakta; ancak farklı sistem parametreleri altında gerçekleştirilen değerlendirmeleri kapsamaktadır. Bu yeni parametreler çerçevesinde mikroşebekenin YFK kontrolünü sağlayan kontrolörlerin performansı Şekil 5.42'da sunulmuştur.



Şekil 5.42. Senaryo 5 için farklı kontrol yöntemlerinin sistem performansına etkisi:(a): AE üzerindeki etkisi (b): FC üzerindeki etkisi (c): 1. bölgede frekans salınımı (d): 2. bölgede frekans salınımı

Mikroşebekenin birinci ve ikinci bölgelerine ait frekans sapmaları ise sırasıyla Şekil 5.42 (c) ve Şekil 5.42 (d)'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Frekans yanıtları, ITAE performans kriterine göre değerlendirilmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 5.30'da özetlenmiştir.

Tablo 5.30. Senaryo 5 için ITAE performans indeksine göre kontrolör karşılaştırmaları

Bölge	DIT2FLC+FOPI-FOPD	Tip-I FLC	FOPI-FOPD
1. Bölge	50,82	330,6	308,7
2. Bölge	43,74	327	298,3

Buna göre, önerilen kontrolör; birinci bölgede frekans salınımını FOPI-FOPD kontrolöre kıyasla %82,8, Tip-I FLC kontrolöre kıyasla ise %84 oranında azaltmıştır. İkinci bölgede ise bu oranlar sırasıyla %85,3 ve %86,6 olarak hesaplanmıştır.

Benzetim süresince AE ve FC birimlerinde gözlemlenen güç değişimleri sırasıyla Şekil 5.42 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu veriler, önerilen kontrolörün AE ve FC bileşenlerini frekans sapmalarını bastırma sürecinde etkin bir şekilde devreye aldığını ortaya koymaktadır.

Sonuçlar, sistem parametrelerindeki değişimlerin arz-talep dengesini olumsuz etkilediği koşullarda dahi, önerilen kontrol yapısının frekans kararlılığını yüksek düzeyde sağlayabildiğini göstermektedir.

5.4.4. Ayrık Zaman Kararlılık Analizi

Bölüm 3.2'de, sürekli zamanlı sistemlerin ayrık zamanlı biçime dönüştürülmesi, örnekleme süresi seçimi ve ayrık zaman kararlılığına ilişkin temel kavramsal çerçeve açıklanmıştır. Bu bölümde ise söz konusu teorik altyapı, Şekil 5.34'te sunulan iki bölgeli mikroşebeke modeli üzerine uygulanarak, pratik bir yaklaşımla değerlendirilmektir. Mikroşebekenin benzetim çalışmaları tabanlı işlemciler üzerinde çalıştığından, sürekli zamanlı olarak modellenen yapının ayrık zaman karşılığının kararlılık açısından güvence altına alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda, öncelikle sistemin durum uzay modeli çıkarılmış, ardından bu modelden elde edilen sistem matrisi A yardımıyla geçiş matrisi Φ hesaplanmış ve özdeğer analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizle birlikte, sistemin ayrık zaman alanındaki kararlılık durumu belirlenmiş; ayrıca seçilen örnekleme süresinin sistem performansına etkisi de değerlendirilmiştir.

Durum denklemlerinin elde edilmesi amacıyla her bir alt sistemdeki ara durum değişkenleri Şekil 5.34 üzerinde $x_1, x_2, \ldots, x_{18}$ şeklinde sistematik olarak etiketlenmiştir. Benzer şekilde girişler u_1, u_2, u_3 ile bozucu etkiler de w_1, w_2, ... ,w_4 olarak tanımlanmıştır. Sürekli zamanlı doğrusal sistemler genel olarak aşağıdaki durum uzay formunda ifade edilir:

$$\dot{x(t)} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t), \qquad y(t) = Cx(t) \tag{5.27}$$

Bu çalışmada önerilen mikroşebeke modeline ait bileşenler dikkate alınarak oluşturulan diferansiyel durum denklemleri aşağıda sunulmuştur.

$$\dot{x_1} = -\frac{D_1}{M_1} x_1 + \frac{1}{M_1}(x_2 + x_6 + x_9 - x_{10} + w_1 - w_2 - x_{18}) \tag{5.28}$$

$$\dot{x_2} = -\frac{1}{T_{BT}} x_2 + \frac{1}{T_{BT}} x_3 \tag{5.29}$$

$$\dot{x_3} = -\frac{1}{T_{BG}} x_3 + \left(\frac{1}{T_{BG}} - \frac{T_{CR}}{T_{BG} b_B}\right) x_4 + \frac{T_{CR}}{T_{BG} b_B} x_5 \tag{5.30}$$

$$\dot{x_4} = -\frac{1}{b_B} x_4 + \frac{1}{b_B} x_5 \tag{5.31}$$

$$\dot{x_5} = \frac{0,5}{Y_c}u_1 + \frac{X_c}{Y_c}\dot{u}_1 - \frac{X_c}{Y_c R_1 M_1}(w_1 + x_2 + x_6 + x_9 - x_{10} - w_2 - x_{18}) + \left(\frac{X_c D_1}{Y_c R_1 M_1} - \frac{0,5}{Y_c R_1}\right)x_1 - \frac{1}{Y_c}x_5 \quad (5.32)$$

$$\dot{x_6} = -\frac{0.5}{T_{HT}}x_6 + \left(\frac{1}{T_{HT}} + \frac{1}{T_{RH}}\right)x_7 - \left(\frac{1}{T_{RH}} - \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}}\right)x_8 - \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}}u_1 + \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}R_1}x_1 \quad (5.33)$$

$$\dot{x_7} = -\frac{1}{T_{RH}}x_7 + \left(\frac{1}{T_{RH}} - \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}}\right)x_8 + \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}}u_1 - \frac{T_{RS}}{T_{RH}T_{MG}R_1}x_1 \quad (5.34)$$

$$\dot{x_8} = \frac{0,25}{T_{MG}}u_1 - \frac{0,25}{T_{MG}R_1}x_1 - \frac{1}{T_{MG}}x_8 \quad (5.35)$$

$$\dot{x_9} = -\frac{1}{T_{FC}}x_9 + \frac{K_{FC}}{T_{FC}}u_2 \quad (5.36)$$

$$\dot{x_{10}} = -\frac{1}{T_{AE}}x_{10} - \frac{K_{AE}}{T_{AE}}u_2 \quad (5.37)$$

$$\dot{x_{11}} = -\frac{D_2}{M_2}x_{11} + \frac{1}{M_2}(w_3 + x_{12} + x_{16} + x_{18} - w_4) \quad (5.38)$$

$$\dot{x_{12}} = -\frac{1}{T_{BT}}x_{12} + \frac{1}{T_{BT}}x_{13} \quad (5.39)$$

$$\dot{x_{13}} = -\frac{1}{T_{BG}}x_{13} + \left(\frac{1}{T_{BG}} - \frac{T_{CR}}{T_{BG}b_B}\right)x_{14} + \frac{T_{CR}}{T_{BG}b_B}x_{15} \quad (5.40)$$

$$\dot{x_{14}} = -\frac{1}{b_B}x_{14} + \frac{1}{b_B}x_{15} \quad (5.41)$$

$$\dot{x_{15}} = \frac{1}{Y_c}\left(0,5u_3 - \frac{0,5}{R_2}x_{11} + X_c\dot{u}_3 + \frac{X_c D_2}{R_2 M_2}x_{11} - \frac{X_c}{R_2 M_2}(w_3 + x_{12} + x_{16} + x_{18} - w_4) - x_{15}\right) \quad (5.42)$$

$$\dot{x_{16}} = -\frac{1}{T_{BE}}x_{16} + \frac{K_{BE}}{T_{BE}}x_{17} \quad (5.43)$$

$$\dot{x_{17}} = \frac{K_{VA}}{T_{VA}}u_3 - \frac{K_{VA}}{T_{VA}R_2}x_{11} - \frac{1}{T_{VA}}x_{17} \quad (5.44)$$

$$\dot{x_{18}} = 2\pi T_{12}(x_1 - x_{11}) \quad (5.45)$$

Yukarıda elde edilen diferansiyel durum denklemlerine, Tablo 5.21'de tanımlanan sistem parametrelerinin değeri yerleştirildiğinde, mikroşebekeye ait sürekli zamanlı durum uzay modeli sabit katsayılı bir yapıya kavuşmaktadır.

Örnekleme Süresinin Belirlenmesi ve Kararlılık Değerlendirmesi

Gerçek zamanlı benzetim uygulamalarda sürekli zamanlı bir sistemin ayrık zamanlı olarak modellenebilmesi için uygun bir örnekleme süresi (Δt) seçimi kritik öneme sahiptir. Bu seçim, ayrık sistemin kararlılığını doğrudan etkileyen bir parametre olup, sistemin dinamik cevabını gerçeğe yakın ve kararlı bir şekilde taklit edebilmesi için dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çalışmada kullanılan mikroşebeke sisteminin lineerleştirilmiş haliyle elde edilen durum matrisi A sistemin çekirdek dinamik yapısını temsil eder. Kararlılık analizi yapılırken yalnızca A matrisinin

etkisi dikkate alınır. Bunun nedeni, giriş ve bozucu matrislerinin yalnızca sistemin cevabını etkileyen unsurlar olması, sistemin doğal kararlılık sınırlarını belirlememeleridir. Buna yönelik olarak homojen sistem Denklem (5.46) ile ifade edilir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \tag{5.46}$$

Bu sürekli zamanlı sistem, ayrık zamanlı hale getirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilir:

$$x[k+1] = \Phi x[k]\ ;\ \Phi = e^{A\Delta t} \tag{5.47}$$

Ayrık zamanlı sistemin kararlılığı, matrisinin tüm özdeğerlerinin birim çember içinde kalması koşuluyla sağlanır. Bu koşulun sağlanabilmesi için sürekli zamanlı sistemin özdeğerlerinin negatif gerçek kısmı olması gerekir. Ancak bununla birlikte, kararlılığı güvence altına almak için örnekleme süresinin uygun biçimde seçilmesi zorunludur. Aksi takdirde ayrıklaştırma işlemi sistemin kararsız hale gelmesine neden olabilir.

$\lambda_1 = -21{,}1976;\ \lambda_2 = -19{,}9983;\ \lambda_{3,4} = -0{,}0233 \pm j6{,}4004$

$\lambda_{5,6} = -0{,}4937 \pm j2{,}6502;\ \lambda_7 = -0{,}0348;\ \lambda_8 = -1{,}0367$

$\lambda_9 = -0{,}9633;\ \lambda_{10} = -0{,}5001;\ \lambda_{11} = -3{,}8726$

$\lambda_{12} = -4{,}1744;\ \lambda_{13} = -5{,}3503;\ \lambda_{14} = -5{,}1682$

$\lambda_{15} = -20{,}0000;\ \lambda_{16} = -5{,}0000;\ \lambda_{17} = -0{,}2500;\ \lambda_{18} = -2{,}0000$

Görüldüğü gibi tüm özdeğerlerin gerçek kısmı negatiftir ve bu da sürekli zamanlı sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, sürekli zamanlı sistemin A matrisine ait en büyük özdeğerin mutlak değeri $max(|\lambda|) = 21{,}1976$ olarak belirlenmiş ve buna göre sistemin ayrıklaştırıldıktan sonra kararlı kalabilmesi için izin verilen maksimum örnekleme süresi Denklem (5.48) ile hesaplanabilir.

$$\Delta t_{max} = \frac{2}{21{,}1976} = 0{,}0944\ \text{s} \tag{5.48}$$

Bu değer, teorik olarak sistemin ayrık zamanlı olarak kararlı kalabileceği en yüksek örnekleme süresini temsil eder. Ancak pratik uygulamalarda bu değerin bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak daha küçük bir değer kullanılması gerekir. Bu çalışmada benzetim uygulamaları için $\Delta t = 0{,}0001s$ olarak seçilmiştir. Belirlenen bu örnekleme süresi kullanılarak sistemin ayrık zamanlı hali oluşturulmuştur. Bu kapsamda, aşağıdaki ayrık zamanlı sistem matrisleri hesaplanmıştır.

$\Phi = e^{A\Delta t}$ 18x18 Durum geçiş matrisi:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0,9999 & 4,9987e-04 & \cdots & 5e-04 \\ \vdots & 0,9995 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 5,03e-5 & \cdots & \cdots & 0,9999 \end{bmatrix}$$

$\Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} B d\tau$ 18x3 Giriş etki matrisi:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -2.1739\text{e}-08 & -5.0000\text{e}-04 & 1.0472\text{e}-11 \\ 7.3307\text{e}-14 & -2.3041\text{e}-18 & 4.3985\text{e}-14 \\ 4.4162\text{e}-10 & -1.0889\text{e}-14 & 2.6497\text{e}-10 \\ 4.9965\text{e}-08 & -1.2368\text{e}-12 & 2.9979\text{e}-08 \\ 4.9998\text{e}-05 & -1.8562\text{e}-09 & 2.9999\text{e}-05 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$\Gamma_d = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} E d\tau$ 18x4 Bozucu etki matrisi:

$$\Gamma_d = \begin{bmatrix} 5.0000e-04 & -5.0000e-04 & 1.2500e-07 & -1.2500e-07 \\ -5.2135e-13 & -2.2959e-18 & -1.4948e-17 & 1.4948e-17 \\ -3.1279e-09 & -1.0889e-14 & -1.3591e-17 & 1.3591e-17 \\ -1.4985e-05 & -1.2368e-12 & 1.3971e-16 & -1.3971e-16 \\ 1.8562e-09 & -1.8562e-09 & 3.0935e-13 & -3.0935e-13 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

Ayrık Zamanlı Kararlılık Analizi ve Benzetim Güvenilirliği

Çalışma kapsamında sürekli zamanlı olarak elde edilen durum-uzay modeli, $\Delta t = 0,0001\ s$ örnekleme periyodu ile ayrık zamana dönüştürülmüş ve bu doğrultuda Φ, Γ ve Γ_d matrisleri hesaplanmıştır. Bu süreçte kullanılan Δt değeri, sistem için teorik olarak belirlenen maksimum örnekleme süresi $\Delta t_{\max} \approx 0,0944\ s$ sınırının oldukça altında olup, yüksek çözünürlükle ayrık zaman modellemesi yapılmasına olanak tanımaktadır.

Ayrık zamanlı sistemlerde kararlılık, durum geçiş matrisi olan Φ matrisinin özdeğerlerinin birim çember içerisinde ($|\lambda_i| < 1$) yer almasıyla sağlanır. Bu bağlamda, elde edilen Φ matrisinin özdeğerleri incelenmiş ve Φ matrisinin özdeğerleri aşağıda verilmiştir:

$\lambda_1 = 0,9978825;\ \lambda_2 = 0,9980022;\ \lambda_{3,4} = 0,9999975 \pm j0,0006400,$

$\lambda_{5,6} = 0,9999506 \pm j0,0002650;\ \lambda_7 = 0,9999965;\ \lambda_8 = 0,9998963$

$\lambda_9 = 0,9999037;\ \lambda_{10} = 0,9999500;\ \lambda_{11} = 0,9996128$

$\lambda_{12} = 0,9995826;\ \lambda_{13} = 0,9994651;\ \lambda_{14} = 0,9994833$

$\lambda_{15} = 0,9980020;\ \lambda_{16} = 0,9995001;\ \lambda_{17} = 0,9999750$

$\lambda_{18} = 0,9998000$

Özdeğerlerin tamamının birim çemberin içinde yer almakta ve sonuç olarak sistemin seçilen örnekleme periyodu ile sayısal olarak kararlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca özdeğerlerin

birim çembere olan uzaklıkları, sistemin geçici rejim davranışının kararlı sönümlü osilasyonlar şeklinde gerçekleşeceğini göstermektedir. Gerçek özdeğerlerin büyük çoğunluğunun $0{,}998 - 0{,}9999$ aralığında yer alması sistemin yavaş fakat istikrarlı bir şekilde dengeye ulaşacağını ortaya koymaktadır.

Bu analiz, sistemin kontrolör uygulanmadan önceki açık çevrim dinamiklerine dayanmaktadır. Kontrolörlerin sistem üzerindeki etkisi bu kararlılık analizine doğrudan dahil edilmemiştir; ancak kontrolörlerin etkinliği benzetim çalışmaları kapsamında ayrı olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, önerilen örnekleme süresi ile yapılan ayrık zaman benzetimlerin, sistemin içsel kararlılığı açısından güvenilir sonuçlar sunduğu teyit edilmiştir.

Gerçek Zamanlı Benzetim Gerekliliği Üzerine Değerlendirme

Önerilen mikroşebeke yapısının ayrık zamanlı kararlılık analizi sonucunda, sistemin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için örnekleme aralığının $\Delta t < 0{,}0944\ s$ olması gerektiği belirlenmiştir. Bu değer, sistemin ayrık zaman alanındaki kararlılığını sağlayan en büyük örnekleme süresini ifade etmekte olup, modelin dinamik karakteristiğiyle uyumludur.

Bu doğrultuda, benzetim çalışmalarında kullanılan $\Delta t = 0{,}0001\ s$ örnekleme süresi, hem kararlılık koşulunu sağlamakta hem de sistemin hızlı dinamik bileşenlerini yüksek çözünürlükte modelleyebilme olanağı tanımaktadır. Bu, teorik olarak MATLAB/Simulink tabanlı benzetimlerin, sistemin gerçek davranışını doğru bir şekilde temsil edebileceğini göstermektedir.

Ancak, örnekleme aralığının küçük seçilmesi, geleneksel yazılım platformlarında hesaplama yükünü ve benzetim süresini ciddi şekilde artırmaktadır. Bu nedenle, söz konusu modelin gerçek zamanlı çalıştırılması veya donanım tabanlı kontrolör testlerinin gerçekleştirilmesi gibi uygulamalarda, OPAL-RT gibi gerçek zamanlı simülatörlerin kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bu çalışmada, önerilen kontrol stratejisinin OPAL-RT platformu üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanması planlanmış olup, MATLAB/Simulink ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Gerçek zamanlı ortamda kullanılacak olan örnekleme adımının da $\Delta t = 0{,}0001$ s olarak belirleneceği göz önünde bulundurulduğunda, her iki platformdan elde edilecek sonuçlar arasında yüksek düzeyde benzerlik beklenmektedir. Bunun temel nedeni, seçilen örnekleme süresinin hem kararlılığı sağlıyor olması hem de fiziksel sistem davranışını yeterli çözünürlükte temsil edecek kadar küçük olmasıdır. Ancak, çok daha küçük örnekleme periyotları gerektiren sistemlerde, bilgisayar tabanlı benzetim ortamlarının işlem gücü, hata toleransı ve nümerik çözüm doğruluğu, fiziksel sistem davranışını tam olarak yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda, yüksek çözünürlükte ve senkronize veri işleme yeteneği sunan gerçek zamanlı simülatörlerin (örneğin OPAL-RT) kullanımı, sistem dinamiklerinin daha

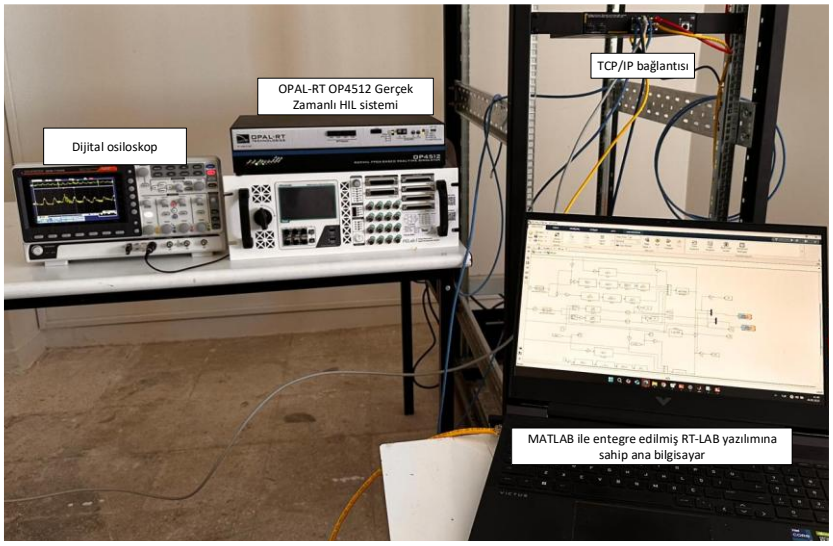
güvenilir biçimde izlenmesi ve kontrolör performansının sahaya uygulanabilir düzeyde test edilebilmesi açısından kritik önem arz etmektedir.

5.4.5. Kontrolör Tasarımının Donanım Tabanlı Doğrulaması

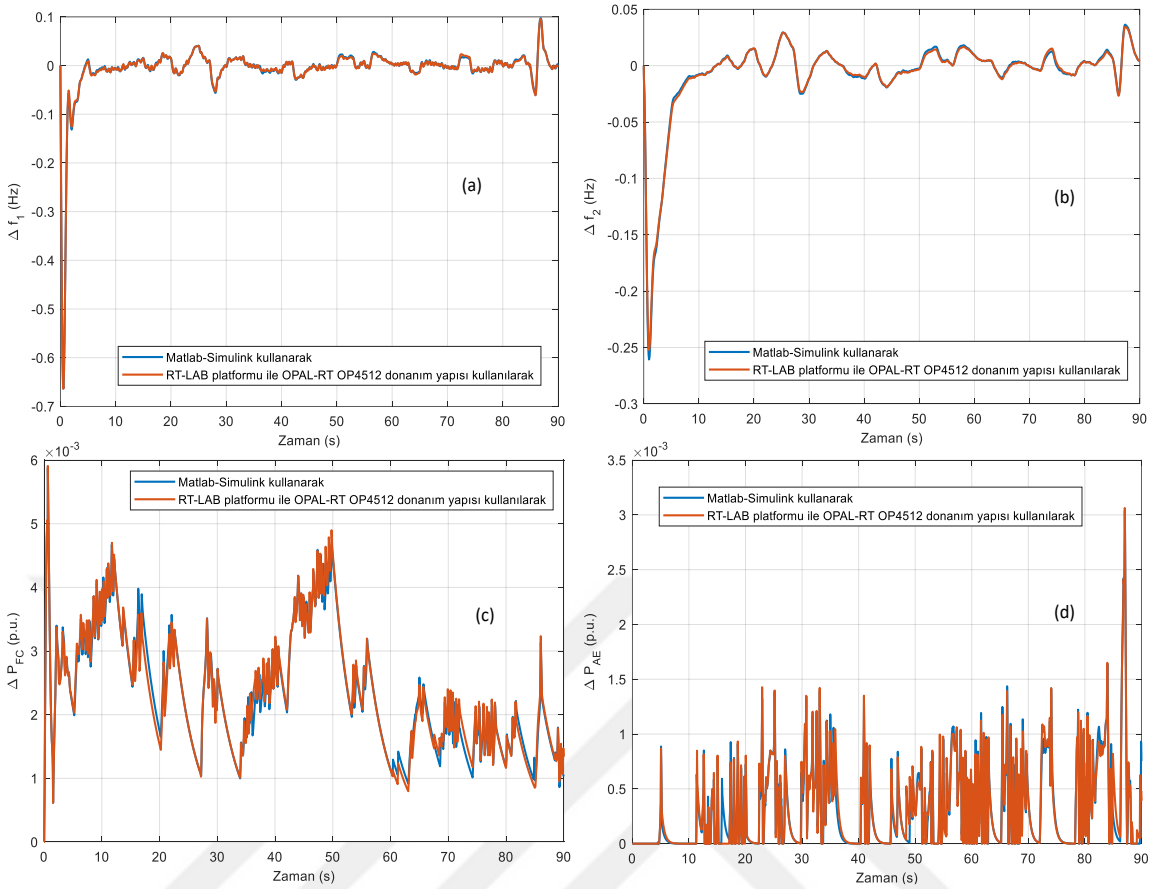
OPAL-RT OP4512 gerçek zamanlı sayısal simülatör donanımı, yüksek performanslı Intel Xeon çok çekirdekli işlemciler ile entegre edilmiş Xilinx Kintex-7 FPGA mimarisi üzerine kuruludur. Bu donanım, gerçek zamanlı paralel hesaplama yeteneği sayesinde karmaşık güç sistemlerinin zaman-aşımı olmadan benzetimini mümkün kılmaktadır. OP4512, OPAL-RT'nin RT-LAB yazılımı aracılığıyla çalıştırılmakta olup, kullanıcıların MATLAB/Simulink ortamında geliştirdikleri modellerin gerçek zamanlı olarak yürütülmesine olanak sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında Şekil 5.34'te önerilen mikroşebekenin sistem modeli MATLAB/Simulink platformunda geliştirilmiş ve gerçek zamanlı testler için RT-LAB tabanlı OPAL-RT OP4512 donanımı üzerinde uygulanmıştır. Gerçek zamanlı uygulamada kullanılan sistem modeli, MATLAB ortamında yürütülen 90 saniyelik benzetim süresi ile aynı koşullarda çalıştırılmış ve her iki platformdan elde edilen sistem yanıtları karşılaştırılmıştır.

RT-LAB üzerinden elde edilen çıkışların, MATLAB/Simulink ortamındaki benzetimlerle büyük oranda tutarlılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, geliştirilen modelin ve önerilen kontrol stratejisinin hem yazılım tabanlı hem de donanım tabanlı benzetimlerde geçerliliğini ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır [138,139]. OPAL-RT OP4512 donanımının laboratuvar kurulumuna ait görsel Şekil 5.43'te sunulmuştur. Önerilen kontrolün her iki platformdan elde edilen sistem yanıtları karşılaştırıldığında en izlenebilir fark Senaryo 1 için gözlemlenmiştir. Senaryo 1 için her iki platformdan elde edilen sistem yanıtları Şekil 5.44'te sunulmuştur.



Şekil 5.43. OPAL-RT OP4512 donanımının laboratuvar kurulumu



Şekil 5.44. Senaryo 1 için önerilen kontrolörün farklı platformlardaki sistem yanıtları:(a): 1. bölgede frekans yanıtı (b): 2. bölgede frekans yanıtı (c): FC'in güç değişimi (d): AE'nin güç değişimi

Şekil 5.44'te, Senaryo 1 kapsamında önerilen DIT2-FOPI+FOPD kontrol yapısının MATLAB/Simulink benzetimi ile OPAL-RT OP4512 donanımı üzerinden gerçekleştirilen gerçek zamanlı uygulama sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Üst grafiklerde yer alan veriler, her iki platformdan elde edilen yanıtların yüksek düzeyde örtüştüğünü açıkça göstermektedir. Şekil 5.44 (a) ve (b), sırasıyla 1. ve 2. bölgelerdeki frekans yanıtlarını göstermekte olup, frekans sapmalarının her iki ortamda da benzer şekilde sönümlendiği ve nominal değere kısa sürede ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.44 (c) ve (d), sırasıyla FC ile AE birimlerinin güç değişimlerini sunmakta ve bu bileşenlerin her iki platformda da uyumlu şekilde tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Bu tutarlılık, önerilen kontrol stratejisinin hem yazılım tabanlı benzetimlerde hem de donanım tabanlı gerçek zamanlı uygulamalarda güvenilir ve geçerli sonuçlar ürettiğini kanıtlamakta ve sistemin doğrulama sürecini başarıyla tamamladığını göstermektedir.

5.4.6. Çalışmanın Sonuçları

Bu çalışmada, farklı yenilenebilir yer aldığı çok bölgeli izole bir mikroşebeke modeli oluşturulmuş ve YFK için yeni bir kaskat kontrol yapısı önerilmiştir. Mikroşebekede PV, WTG,

BGTG, BDEG ve MHTG birimleriyle birlikte, AE ve FC destekli hidrojen tabanlı bir enerji depolama sistemi kullanılmıştır. AE birimi fazla üretimi hidrojene dönüştürmekte, FC ise bu hidrojeni kullanarak yetersiz üretim durumlarında sisteme güç sağlamaktadır.

YFK için geliştirilen DIT2FLC+FOPI-FOPD yapısı, hem değişken üretim koşullarına karşı sistem kararlılığını artırmak hem de AE ve FC'nin aktif katılımını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Kontrolör kazançlarının belirlenmesinde CIOA algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen kontrol yapısı, beş farklı senaryo kapsamında Type-I FLC ve kesir dereceli PI-PD kontrolörleri ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bulgular, önerilen kontrol yapısının, özellikle AE ve FC'nin aktif kullanımını sağlayarak frekans salınımlarını daha etkin biçimde bastırabildiğini göstermektedir. Uygulanan senaryolarda, kontrolörün her iki bölgedeki frekans sapmalarını anlamlı düzeyde azalttığı ve sistemin kararlı çalışmasına katkı sunduğu gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, izole modda çalışan mikroşebeke sistemlerinde YFK performansını artırmak amacıyla, DIT2FLC ile desteklenen dört farklı yenilikçi kaskat kontrol yapısının tasarımını, analitik değerlendirmesini ve karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Her bir kontrol yapısı, farklı mikroşebeke yapıları ve senaryo temelli çalışma koşulları altında sistem performansına etkileri açısından ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.1. başlığı altında sunulan ilk çalışmada, AE ve FC destekli izole bir mikroşebeke yapısında, PI ve PD kaskat kontrolörlerün DIT2FLC ile desteklendiği C-DIT2-FLC kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolör parametreleri, ISSA kullanılarak optimize edilmiştir. ITAE performans indeksine göre yapılan karşılaştırmalı analizler, önerilen kontrol yapısının, klasik PI–PD kontrolörü ve Tip-1 bulanık kontrolör yapısına kıyasla %59 ila %84 arasında değişen oranlarda daha üstün frekans yanıt performansı sergilediğini ortaya koymuştur.

5.2. başlığı altındaki ikinci çalışma, DIT2-FOPI+TID kontrolörü ile talep tarafı yönetimi (DRM) entegre edildiği kontrol stratejisi, iki bölgeli bir mikroşebeke yapısının YFK'sı için önerilmiştir. Dört senaryo altında yapılan analizlerde; sadece AGC ile frekans salınımlarının anlamlı ölçüde azaldığı, ancak DRM yapılarının her iki bölgede eş zamanlı olarak YF'ya dahil edilmesiyle frekans yanıtında %60'ı aşkın iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışma, DRM ve DIT2FLC ile uyarlanan kesir dereceli kontrolörlerin sistem kararlılığına katkısını net biçimde ortaya koymuştur.

5.3. başlığı altındaki üçüncü çalışma, tek bölgeli bir mikroşebekede YFKnın sağlanması amacıyla DIT2FLC-FOTID kontrol yapısını önermektedir. Kontrolör kazanç parametreleri, CIOA kullanılarak belirlenmiştir. YEK'in yüksek belirsizlik içeren üretim yapısına rağmen, önerilen kontrolör frekans salınımlarını etkili bir şekilde bastırarak sistemin dinamik kararlılığını iyileştirmiştir. Ayrıca, FDI ve DoS gibi farklı siber saldırı senaryoları altında yapılan testler, kontrol yapısının bu tür tehditler karşısında yüksek dayanıklılık sergilediğini ortaya koymuştur.

5.4. başlığı altında sunulan son çalışma, AE ve FC destekli çok bölgeli bir mikroşebekede geliştirilen DIT2FLC-FOPI+FOPD kontrol yapısının OPAL-RT platformu üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmesini kapsamaktadır. Gerçekleştirilen benzetimler sonucunda, kontrol yapısının her iki bölgede frekans sapmalarını anlamlı ölçüde azalttığı ve AE-FC destekli enerji dengelemesi sayesinde sistemin genel kararlılığına önemli katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen gerçek zamanlı bulgular, önerilen kontrol yapısının pratik uygulamalara uygunluğunu ve güvenilirliğini doğrulamaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ayrık zamanlı kararlılık analizi, mikroşebeke modelinin kararlı çalışabilmesi için örnekleme süresinin belirli sınırlar dahilinde seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Uygun seçilen örnekleme süreleri, hem sistemin hızlı dinamiklerini

yeterli çözünürlükle temsil etmekte hem de kararlılık koşullarını sağlamaktadır. Bu da MATLAB/Simulink tabanlı benzetimlerin fiziksel sistem davranışını yansıtma açısından güvenilir bir temel sunabileceğini göstermektedir. Ancak çok küçük örnekleme süreleri, yazılım tabanlı platformlarda hesaplama yükünü ve benzetim süresini artırmakta; sınırlı işlem gücü, nümerik çözüm hassasiyeti ve hata toleransı gibi faktörler nedeniyle benzetim doğruluğunu etkileyebilmektedir. Bu çerçevede, geliştirilen kontrol yapılarının donanım tabanlı benzetim ortamlarında da değerlendirilmesi, kontrol stratejilerinin fiziksel koşullara daha yakın senaryolarda gözlemlenmesine olanak tanımaktadır.

ÖNERİLER

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular, önerilen kontrol stratejilerinin mikroşebeke sistemlerinde farklı işletme koşulları altında uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koymuştur. Özellikle üretim belirsizlikleri, siber saldırılar ve büyük yük değişimleri gibi zorlu senaryolar altında, kontrol yapıların sistem kararlılığını koruyarak frekans kararlılığına anlamlı katkılar sunduğu gözlemlenmiştir.

Bu doğrultuda, gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda aşağıdaki araştırma başlıklarının ele alınması faydalı olabilir:

Talep tarafı esnekliğinin YFK'ye daha etkin şekilde entegre edilebilmesi için, zamana bağlı yük profilleriyle birlikte fiyat duyarlılığı, tüketici davranışları ve konfor kısıtlarını da içeren dinamik modeller geliştirilebilir. Bu kapsamda, öğrenmeye dayalı yaklaşımlar (örneğin pekiştirmeli öğrenme) kullanılarak, esnek yüklerin kontrol stratejilerine adaptasyonu sağlanabilir. Böylece, kontrol yapıları yalnızca fiziksel yük değişimlerine değil, aynı zamanda kullanıcı tepkilerinin zamana bağlı evrimine göre şekillendirilebilir ve sistemin kararlılığı daha yüksek düzeyde desteklenebilir.

Mikroşebekelere yönelik kontrol stratejilerinin değerlendirilmesi amacıyla, dijital ikiz modellerin oluşturulması önemli katkılar sağlayabilir. Literatürde bu alana yönelik çalışmalar henüz sınırlı düzeydedir; ancak özellikle hibrit yapılı mikroşebekelerin erken tasarım süreçlerinde dijital ikizlerin, hem zaman kazandıran hem de yüksek doğruluk sağlayan çıktılar sunduğu gözlemlenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] IEA, "World Energy Outlook 2023," 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

[2] IPCC, "Sixth Assessment Report (AR6) – Synthesis Report," 2023. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

[3] van Ruijven, E. De Cian, and I. Sue Wing, "Amplification of future energy demand growth due to climate change," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 2762, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-10399-3.

[4] Y. H. Chuang, Y.-C. Tsao, and W. Y. Chen, "Fossil fuel and renewable energy allocation policy toward carbon neutrality under climate change," *Energy Environ.*, vol. 36, no. 2, pp. 709–728, Mar. 2025, doi: 10.1177/0958305X231185911.

[5] IRENA, "Renewable Capacity Statistics 2025," 2025. [Online]. Available: https://www.irena.org/Statistics

[6] IRENA, "Shaping Sustainable International Hydrogen Value Chains," 2024. [Online]. Available: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Shaping-sustainable-international-hydrogen-value-chains

[7] S. Kaur, R. Kumar, K. Singh, and S. Singh, "Systematic review of hydrogen, biomass, biogas, and solar photovoltaics in hybrid renewable energy systems: Advancements, challenges, and future directions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 137, pp. 160–189, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.04.525.

[8] Y. Zhou and A. Gu, "Learning Curve Analysis of Wind Power and Photovoltaics Technology in US: Cost Reduction and the Importance of Research, Development and Demonstration," *Sustainability*, vol. 11, no. 8, p. 2310, Apr. 2019, doi: 10.3390/su11082310.

[9] V. Saxena *et al.*, "Navigating the complexities of distributed generation: Integration, challenges, and solutions," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3302–3322, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.017.

[10] M. R. Mojumder H., Hasanuzzaman M., and Cuce E., "Prospects and challenges of renewable energy-based microgrid system in Bangladesh: a comprehensive review," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 24, no. 7, pp. 1987–2009, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10098-022-02301-5.

[11] C Álvarez-Arroyo., S Vergine,. A. S.de la Nieta, Alvarado-Barrios, L.and G. D'Amico, "Optimising microgrid energy management: Leveraging flexible storage systems and full integration of renewable energy sources," *Renew. Energy*, vol. 229, p. 120701, Aug. 2024,

doi: 10.1016/j.renene.2024.120701.

[12] S. Shahzad, M. A. Abbasi, H. Ali, M. Iqbal, R. Munir, and H. Kilic, “Possibilities, Challenges, and Future Opportunities of Microgrids: A Review,” *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6366, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15086366.

[13] Z.-L. Yuan, D. Xu, L. Jin, and H.-Z. Wang, “Delay-Dependent Stability Analysis of Load Frequency Control for Power System With EV Aggregator,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, Oct. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.771465.

[14] I. F. Davoudkhani, P. Zare, A. Y. Abdelaziz, M. Bajaj, and M. B. Tuka, “Robust load-frequency control of islanded urban microgrid using 1PD-3DOF-PID controller including mobile EV energy storage,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 13962, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-64794-y.

[15] M. Shouran, F. Anayi, and M. Packianather, “Design of sliding mode control optimised by the Bees algorithm for LFC in the Great Britain power system,” *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 937–943, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.322.

[16] G. Zhang, I. A. Khan, A. Daraz, A. Basit, and M. I. Khan, “Load Frequency Control of Marine Microgrid System Integrated with Renewable Energy Sources,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 4, p. 844, Apr. 2023, doi: 10.3390/jmse11040844.

[17] A. K. Tudu, N. Naguru, S. H. N. Dey, and S. Paul, “Load frequency control of an isolated microgrid using optimized model predictive control by GA,” *Electr. Eng.*, vol. 106, no. 4, pp. 4171–4183, Aug. 2024, doi: 10.1007/s00202-023-02206-6.

[18] M. G. M. Almihat and J. L. Munda, “Review on recent control system strategies in Microgrid,” *Edelweiss Appl. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 5089–5111, Nov. 2024, doi: 10.55214/25768484.v8i6.3116.

[19] D. Zhao, S. Sun, A. Mohammadzadeh, and A. Mosavi, “Adaptive Intelligent Model Predictive Control for Microgrid Load Frequency,” *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11772, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811772.

[20] A. Daraz, “Optimized cascaded controller for frequency stabilization of marine microgrid system,” *Appl. Energy*, vol. 350, p. 121774, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121774.

[21] S. Oshnoei, A. Fathollahi, A. Oshnoei, and M. H. Khooban, “Microgrid Frequency Regulation Based on a Fractional Order Cascade Controller,” *Fractal Fract.*, vol. 7, no. 4, p. 343, Apr. 2023, doi: 10.3390/fractalfract7040343.

[22] P. C. Nayak, U. C. Prusty, R. C. Prusty, and S. Panda, “Imperialist competitive algorithm optimized cascade controller for load frequency control of multi-microgrid system,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 47, no. 1, pp. 5538–5560, Dec. 2025, doi: 10.1080/15567036.2021.1897710.

[23] S. Gupta, S. Mukhopadhyay, A. Banerji, P. Sanki, P. Sinha, S. K. Biswas, B. Khan, A. Ali, and P. Bokoro, “Student psychology-based optimization-tuned cascaded controller for frequency regulation of a microgrid,” Frontiers in Energy Research, vol. 12, May 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1355608.

[24] E. M. Ahmed, E. A. Mohamed, A. Elmelegi, M. Aly, and O. Elbaksawi, “Optimum Modified Fractional Order Controller for Future Electric Vehicles and Renewable Energy-Based Interconnected Power Systems,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29993–30010, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058521.

[25] M. D., J. K., P. Shah, and R. Sekhar, “Fractional order PIλDμ controller for microgrid power system using cohort intelligence optimization,” *Results Control Optim.*, vol. 11, p. 100218, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rico.2023.100218.

[26] G. Sahoo, R. K. Sahu, N. R. Samal, and S. Panda, “Analysis of type-2 fuzzy fractional-order PD-PI controller for frequency stabilisation of the micro-grid system with real-time simulation,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 41, no. 5, pp. 412–433, May 2022, doi: 10.1080/14786451.2021.1928131.

[27] S. Mishra, P. C. Nayak, R. C. Prusty, and S. Panda, “Design and Analysis of Time-Varying Derivative Fractional Order Proportional–Integral–Derivative Controller for Frequency Regulation of Shipboard Microgrid System,” *ELECTRICA*, May 2024, doi: 10.5152/electrica.2024.23055.

[28] Y. Liang, Y. He, and Y. Niu, “Microgrid Frequency Fluctuation Attenuation Using Improved Fuzzy Adaptive Damping-Based VSG Considering Dynamics and Allowable Deviation,” *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4885, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184885.

[29] B. Begum, M. A. Hossain, S. Akter, M. S. Islam, K. T. Hashan, and A. K. M. Azad, “Application of an intelligent fuzzy logic based sliding mode controller for frequency stability analysis in a deregulated power system using OPAL-RT platform,” Energy Reports, vol. 11, pp. 510–534, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.12.023.

[30] R. K. Khadanga, S. Panda, and D. Das, “Cyber-Security Attacks on Microgrid and Its Mitigation via Adaptive Fuzzy PID Controller,” *Int. J. Fuzzy Syst.*, Sep. 2024, doi: 10.1007/s40815-024-01841-w.

[31] R. Coteli, H. Acikgoz, F. Ucar, and B. Dandil, “Design and implementation of Type-2 fuzzy neural system controller for PWM rectifiers,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 32, pp. 20759–20771, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.032.

[32] H. Kuttomparambil Abdulkhader, J. Jacob, and A. T. Mathew, “Robust type-2 fuzzy fractional order PID controller for dynamic stability enhancement of power system having RES based microgrid penetration,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 110, pp. 357–371, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.027.

[33] A. Mohammadzadeh and S. Rathinasamy, “Energy management in photovoltaic battery hybrid systems: A novel type-2 fuzzy control,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 20970–20982, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.187.

[34] B. Yildirim, M. Gheisarnejad, and M. H. Khooban, “A Robust Non-Integer Controller Design for Load Frequency Control in Modern Marine Power Grids,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 6, no. 4, pp. 852–866, Aug. 2022, doi: 10.1109/TETCI.2021.3114735.

[35] S. Rawat, B. Jha, M. K. Panda, and J. Kanti, “Interval Type-2 Fuzzy Logic Control-Based Frequency Control of Hybrid Power System Using DMGS of PI Controller,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, p. 10217, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112110217.

[36] T. Aljohani, “Intelligent Type-2 Fuzzy Logic Controller for Hybrid Microgrid Energy Management with Different Modes of EVs Integration,” *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2949, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122949.

[37] M. H. Khooban and M. Gheisarnejad, “A Novel Deep Reinforcement Learning Controller Based Type-II Fuzzy System: Frequency Regulation in Microgrids,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 5, no. 4, pp. 689–699, Aug. 2021,

[38] Y. Tang, F. Li, Q. Chen, M. Li, Q. Wang, M. Ni, and G. Chen, “Frequency prediction method considering demand response aggregate characteristics and control effects,” Applied Energy, vol. 229, pp. 936–944, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.039.

[39] S. A. Hosseini, M. Toulabi, A. Ashouri-Zadeh, and A. M. Ranjbar, “Battery energy storage systems and demand response applied to power system frequency control,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 136, p. 107680, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107680.

[40] R. Khezri, A. Mahmoudi, and H. Aki, “Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111763, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111763.

[41] G. Zhang, J. Li, O. Bamisile, Y. Xing, D. Cai, and Q. Huang, “An Load Frequency Control Scheme for Multi-Area Power System Under Cyber-Attacks and Time-Varying Delays,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 2, pp. 1336–1349, Mar. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3171101.

[42] M. Bakeer, A. Bakeer, G. Magdy, and M. M. Aly, “A new cyber-security approach for load frequency control of hybrid interconnected renewable power systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 425, p. 138866, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138866.

[43] Y. Wang, C. Deng, Y. Liu, and Z. Wei, “A cyber-resilient control approach for islanded microgrids under hybrid attacks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 147, p. 108889, May 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108889.

[44] J. Heidary, S. Oshnoei, M. Gheisarnejad, M. R. Khalghani, and M. H. Khooban, "Shipboard Microgrid Frequency Control Based on Machine Learning Under Hybrid Cyberattacks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1109/TIE.2023.3303627.

[45] A. M. Tudose, I. I. Picioroaga, D. O. Sidea, and C. Bulac, "Solving Single- and Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch Problems Using an Improved Salp Swarm Algorithm," *Energies*, vol. 14, no. 5, p. 1222, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14051222.

[46] O. A. P. de Souza and L. F. F. Miguel, "CIOA: Circle-Inspired Optimization Algorithm, an algorithm for engineering optimization," *SoftwareX*, vol. 19, p. 101192, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.softx.2022.101192.

[47] J. Thapa and M. Ben-Idris, "Real-time control of active distribution network for secondary frequency control: Design and experimental validation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 233, p. 110457, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110457.

[48] M. A. Rustam, M. Y. A. Khan, T. Abbas, and B. Khan, "Distributed secondary frequency control scheme with A-symmetric time varying communication delays and switching topology," *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 9, p. 100650, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100650.

[49] A. X. R. Irudayaraj, H. Qiu, V. Veerasamy, W.-S. Tan, and H. B. Gooi, "Blockchain-based distributed frequency control of sustainable networked microgrid system with P2P trading," *Appl. Energy*, vol. 373, p. 123849, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123849.

[50] ENTSO-E, "Continental Europe Operation Handbook," 2015. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/

[51] T. Baškarad, N. Holjevac, and I. Kuzle, "A new perspective on frequency control in conventional and future interconnected power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 156, p. 109731, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109731.

[52] C. Zhong, H. Zhao, Y. Liu, and C. Liu, "Model predictive secondary frequency control of island microgrid based on two-layer moving-horizon estimation observer," *Appl. Energy*, vol. 372, p. 123721, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123721.

[53] K. Balzer, J. Lazo, and D. Watts, "Economic Model of Ancillary Services in Real Time for Frequency Control," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6378, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16176378.

[54] B. Loza, L. I. Minchala, D. Ochoa-Correa, and S. Martinez, "Grid-Friendly Integration of Wind Energy: A Review of Power Forecasting and Frequency Control Techniques," *Sustainability*, vol. 16, no. 21, p. 9535, Nov. 2024, doi: 10.3390/su16219535.

[55] M. Gautam, M. MansourLakouraj, R. Hossain, N. Bhusal, M. Benidris, and H. Livani,

"Enabling Active Distribution Systems' Participation in Tertiary Frequency Regulation Through Coalitional Game Theory-Based Reserve Allocation," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 5222–5236, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3349406.

[56] T. Bal, S. Ray, N. Sinha, R. Devarapalli, and Ł. Knypiński, "Integrating Demand Response for Enhanced Load Frequency Control in Micro-Grids with Heating, Ventilation and Air-Conditioning Systems," *Energies*, vol. 16, no. 15, p. 5767, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16155767.

[57] H. Golmohamadi, S. Golestan, R. Sinha, and B. Bak-Jensen, "Demand-Side Flexibility in Power Systems, Structure, Opportunities, and Objectives: A Review for Residential Sector," *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4670, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17184670.

[58] H. H. H. Mousa, K. Mahmoud, and M. Lehtonen, "Recent developments of demand-side management towards flexible DER-rich power systems: A systematic review," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 18, no. 13, pp. 2259–2300, Jul. 2024, doi: 10.1049/gtd2.13204.

[59] S. S. Pati, U. Subudhi, and S. Mishra, "Robust Frequency Regulation Management System in a Renewable Hybrid Energy Network with Integrated Storage Solutions," *Electricity*, vol. 6, no. 2, p. 22, May 2025, doi: 10.3390/electricity6020022.

[60] B. Yildirim, P. Razmi, A. Fathollahi, M. Gheisarnejad, and M. H. Khooban, "Neuromorphic deep learning frequency regulation in stand-alone microgrids," *Appl. Soft Comput.*, vol. 144, p. 110418, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110418.

[61] E. Rakhshani, D. Remon, A. M. Cantarellas, J. M. Garcia, and P. Rodriguez, "Virtual Synchronous Power Strategy for Multiple HVDC Interconnections of Multi-Area AGC Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 1665–1677, May 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2592971.

[62] M. Hajiakbari Fini and M. E. Hamedani Golshan, "Determining optimal virtual inertia and frequency control parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 13–22, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.007.

[63] J. A. Passos Filho, O. Ferreira Avila, and P. Oliveira La Gatta, "Comparison Between Linear and Nonlinear Governor Power Flow Formulations," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, Apr. 2020, doi: 10.1515/ijeeps-2019-0194.

[64] Y. Azelhak, L. Benaaouinate, H. Medromi, Y. Errami, T. Bouragba, and D. Voyer, "Exhaustive Comparison between Linear and Nonlinear Approaches for Grid-Side Control of Wind Energy Conversion Systems," *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 4049, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14134049.

[65] B. Mohanty, S. Panda, and P. K. Hota, "Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power

system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 77–85, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.029.

[66] A. K. Barik and D. C. Das, "Expeditious frequency control of solar photovoltaic/biogas/biodiesel generator based isolated renewable microgrid using grasshopper optimisation algorithm," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 14, pp. 1659–1667, Oct. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5196.

[67] A. K. Barik and D. C. Das, "Active power management of isolated renewable microgrid generating power from Rooftop solar arrays, sewage waters and solid urban wastes of a smart city using Salp swarm algorithm," in *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, Mar. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICSESP.2018.8376744.

[68] A. Bakeer, G. Magdy, A. Chub, and H. Bevrani, "A sophisticated modeling approach for photovoltaic systems in load frequency control," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 134, p. 107330, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107330.

[69] A. Hossam-Eldin, H. Mostafa, H. Kotb, K. M. AboRas, A. Selim, and S. Kamel, "Improving the Frequency Response of Hybrid Microgrid under Renewable Sources' Uncertainties Using a Robust LFC-Based African Vulture Optimization Algorithm," *Processes*, vol. 10, no. 11, p. 2320, Nov. 2022, doi: 10.3390/pr10112320.

[70] M. Irfan, S. Deilami, S. Huang, T. Tahir, and B. P. Veettil, "Optimizing load frequency control in microgrid with vehicle-to-grid integration in Australia: Based on an enhanced control approach," *Appl. Energy*, vol. 366, p. 123317, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123317.

[71] B. Yildirim, "Advanced controller design based on gain and phase margin for microgrid containing PV/WTG/Fuel cell/Electrolyzer/BESS," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 30, pp. 16481–16493, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.185.

[72] A. K. Barik and D. C. Das, "Optimal Load-frequency Regulation of BioRenewable Cogeneration based Interconnected Hybrid Microgrids with Demand Response Support," in *2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/INDICON45594.2018.8987124.

[73] D.J. Lee and L. Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 311–320, Mar. 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914309.

[74] H. S. Salama, G. Magdy, A. Bakeer, and I. Vokony, "Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system," *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, p. 34, Dec. 2022, doi: 10.1186/s41601-022-00258-7.

[75] G. H. Reddy, D. Bhattacharya, P. S. Bisht, A. Kulshreshtha, S. R. Gunaga, and N. Mathur, "Frequency Control of a Solar/Wind/Fuel Cell/Biogas/Biodiesel/Flywheel/Battery Storage based Microgrid under Dynamic Conditions," in *2024 International Conference on Healthcare Innovations, Software and Engineering Technologies (HISET)*, Jan. 2024, pp. 350–355. doi: 10.1109/HISET61796.2024.00104.

[76] V. Kodkin, A. Baldenkov, and A. Anikin, "A Method for Assessing the Stability of Digital Automatic Control Systems (ACS) with Discrete Elements. Hypothesis and Simulation Results," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6561, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206561.

[77] D.-T. Trinh, Y.-K. Wu, and M.H. Pham, "A Novel Load Frequency Control Strategy for a Modern Power System by Considering State-Space Modeling and Stability Analysis," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 115085–115101, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3445180.

[78] A. J. Vallarella and H. Haimovich, "On the stability of nonlinear sampled-data systems and their continuous-time limits," *ISA Trans.*, vol. 141, pp. 326–334, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.isatra.2023.06.027.

[79] P. J. D. de O. Evald, G. V. Hollweg, R. V. Tambara, and H. A. Gründling, "Lyapunov stability analysis of a robust model reference adaptive PI controller for systems with matched and unmatched dynamics," *J. Franklin Inst.*, vol. 359, no. 13, pp. 6659–6689, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jfranklin.2022.07.014.

[80] G. Pechlivanidou and N. Karampetakis, "Zero-order hold discretization of general state space systems with input delay," *IMA J. Math. Control Inf.*, vol. 39, no. 2, pp. 708–730, Jun. 2022, doi: 10.1093/imamci/dnac005.

[81] M. Shao, W. Gao, and J. Xue, "Aggressively Truncated Taylor Series Method for Accurate Computation of Exponentials of Essentially Nonnegative Matrices," *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, vol. 35, no. 2, pp. 317–338, Jan. 2014, doi: 10.1137/120894294.

[82] K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and S.-I. Niculescu, "A Renewed Look at Zeros of Sampled-Data Systems—From the Lifting Viewpoint," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 3668–3673, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.559.

[83] V. Grushkovskaya, "Asymptotic behavior of solutions of nonlinear discrete systems in critical cases," *Nonlinear Dyn.*, vol. 113, no. 2, pp. 1227–1244, Jan. 2025, doi: 10.1007/s11071-024-10295-6.

[84] G. Huang, A. Ni, W. Lu, H. Peng, and J. Wang, "Parameters Measurement of Multiple Exponentially Damped Sinusoids With Sub-Nyquist Sampling," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 68, no. 7, pp. 2710–2714, Jul. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2021.3055938.

[85] M. D. Omar Faruque *et al.*, "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 2, no. 2, pp.

63–73, Jun. 2015, doi: 10.1109/JPETS.2015.2427370.

[86] J. Ihrens, S. Möws, L. Wilkening, T. A. Kern, and C. Becker, “The Impact of Time Delays for Power Hardware-in-the-Loop Investigations,” *Energies*, vol. 14, no. 11, p. 3154, May 2021, doi: 10.3390/en14113154.

[87] A. Sharma and N. Singh, “Load frequency control of connected multi-area multi-source power systems using energy storage and lyrebird optimization algorithm tuned PID controller,” *J. Energy Storage*, vol. 100, p. 113609, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.113609.

[88] A. Kumar, S. Chanana, and A. Kumar, “Analysis of new optimization technique MGO tuned FOIPDF controller in load frequency control,” *Electr. Eng.*, May 2024, doi: 10.1007/s00202-024-02441-5.

[89] M. K. Pandey, R. N. Mahia, S. Tiwari, and O. P. Mahela, “Robust and metaheuristic load frequency control techniques for renewable energy-based power system: comprehensive review and comparative analysis,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 46, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1080/01430750.2025.2474150.

[90] Z. Qu, W. Younis, X. Liu, A. Khalique Junejo, S. Z. Almutairi, and P. Wang, “Optimized PID Controller for Load Frequency Control in Multi-Source and Dual-Area Power Systems Using PSO and GA Algorithms,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186658–186678, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3445165.

[91] M. Ahmed, G. Magdy, M. Khamies, and S. Kamel, “Modified TID controller for load frequency control of a two-area interconnected diverse-unit power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 135, p. 107528, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107528.

[92] J. Sabatier, C. Farges, and A. Oustaloup, “Fractional Order Models,” 2015, pp. 1–61. doi: 10.1007/978-94-017-9807-5_1.

[93] H. M. Moghadam, M. Gheisarnejad, Z. Esfahani, and M.-H. Khooban, “A Novel Supervised Control Strategy for Interconnected DFIG-Based Wind Turbine Systems: MiL Validations,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 5, no. 6, pp. 962–971, Dec. 2021, doi: 10.1109/TETCI.2020.3010060.

[94] M. Mosayebi, M. Gheisarnejad, and M.-H. Khooban, “An Intelligent Type-2 Fuzzy Stabilization of Multi-DC Nano Power Grids,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 5, no. 5, pp. 854–859, Oct. 2021, doi: 10.1109/TETCI.2020.2977676.

[95] A. Sarabakha, C. Fu, E. Kayacan, and T. Kumbasar, “Type-2 Fuzzy Logic Controllers Made Even Simpler: From Design to Deployment for UAVs,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 6, pp. 5069–5077, Jun. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2767546.

[96] R. Heydari, M. Gheisarnejad, M. H. Khooban, T. Dragicevic, and F. Blaabjerg, “Robust and Fast Voltage-Source-Converter (VSC) Control for Naval Shipboard Microgrids,” *IEEE*

Trans. Power Electron., vol. 34, no. 9, pp. 8299–8303, Sep. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2896244.

[97] E. H. Cui, Z. Zhang, C. J. Chen, and W. K. Wong, "Applications of nature-inspired metaheuristic algorithms for tackling optimization problems across disciplines," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 9403, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56670-6.

[98] I. A. Hodashinsky, "Methods for Improving the Efficiency of Swarm Optimization Algorithms. A Survey," *Autom. Remote Control*, vol. 82, no. 6, pp. 935–967, Jun. 2021, doi: 10.1134/S0005117921060011.

[99] B. Khan and P. Singh, "Selecting a Meta-Heuristic Technique for Smart Micro-Grid Optimization Problem: A Comprehensive Analysis," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13951–13977, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2728683.

[100] M. Azizi, U. Aickelin, H. A. Khorshidi, and M. Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, "Energy valley optimizer: a novel metaheuristic algorithm for global and engineering optimization," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 226, Jan. 2023, doi: 10.1038/s41598-022-27344-y.

[101] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 114, pp. 163–191, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.07.002.

[102] H. R. Tizhoosh, "Opposition-Based Learning: A New Scheme for Machine Intelligence," in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, vol. 1, pp. 695–701. doi: 10.1109/CIMCA.2005.1631345.

[103] S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "An islanded microgrid energy system with an innovative frequency controller integrating hydrogen-fuel cell," *Fuel*, vol. 326, p. 125005, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125005.

[104] S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. T. Özdemir, "An innovative LFC scheme for multi-area microgrid incorporating with hydrogen-based demand response mechanism," *Int. J. Hydrogen Energy*, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.278.

[105] S. Yıldız, B. Yildirim, and M. T. Özdemir, "Enhancing load frequency control and cybersecurity in renewable energy microgrids: A fuel cell-based solution with non-integer control under cyber-attack," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 75, pp. 438–449, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.145.

[106] Y. Xu, C. Li, Z. Wang, N. Zhang, and B. Peng, "Load Frequency Control of a Novel Renewable Energy Integrated Micro-Grid Containing Pumped Hydropower Energy Storage," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29067–29077, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2826015.

[107] A. Oshnoei, M. Kheradmandi, and S. M. Muyeen, “Robust Control Scheme for Distributed Battery Energy Storage Systems in Load Frequency Control,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 6, pp. 4781–4791, Nov. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2997950.

[108] M. H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, and T. Dragičević, “A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 585–598, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.10.057.

[109] A. Bagheri, A. Jabbari, and S. Mobayen, “An intelligent ABC-based terminal sliding mode controller for load-frequency control of islanded micro-grids,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, p. 102544, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102544.

[110] A. Safari, F. Babaei, and M. Farrokhifar, “A load frequency control using a PSO-based ANN for micro-grids in the presence of electric vehicles,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 42, no. 6, pp. 688–700, Apr. 2021, doi: 10.1080/01430750.2018.1563811.

[111] B. Yildirim and M. H. Khooban, “Enhancing stability region of <scp>time-delayed</scp> smart power grids by <scp>non-integer</scp> controllers,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 541–553, Jan. 2021, doi: 10.1002/er.5711.

[112] A. Rai and D. K. Das, “Ennoble class topper optimization algorithm based fuzzy PI-PD controller for micro-grid,” *Appl. Intell.*, vol. 52, no. 6, pp. 6623–6645, Apr. 2022, doi: 10.1007/s10489-021-02704-9.

[113] S. Padhy, S. Panda, and S. Mahapatra, “A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of Plug in Electric Vehicles,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 427–442, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2017.03.004.

[114] V. Veerasamy *et al.*, “A Hankel Matrix Based Reduced Order Model for Stability Analysis of Hybrid Power System Using PSO-GSA Optimized Cascade PI-PD Controller for Automatic Load Frequency Control,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 71422–71446, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987387.

[115] B. Khokhar, S. Dahiya, and K. P. Singh Parmar, “A Robust Cascade Controller for Load Frequency Control of a Standalone Microgrid Incorporating Electric Vehicles,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 48, no. 6–7, pp. 711–726, Apr. 2020, doi: 10.1080/15325008.2020.1797936.

[116] S. A. Wankhade, C. B. Kadu, and B. J. Parvat, “PI-PD Smith Predictor Based Cascade Controller Designing,” 2017, pp. 231–240. doi: 10.1007/978-981-10-1675-2_25.

[117] M. Gheisarnejad, J. Boudjadar, and M.-H. Khooban, “A New Adaptive Type-II Fuzzy-Based Deep Reinforcement Learning Control: Fuel Cell Air-Feed Sensors Control,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 20, pp. 9081–9089, Oct. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2924726.

[118] Keweenaw Research Center, “Solar Photovoltaic Performance Data for the Keweenaw,”

2021. https://www.appropedia.org/KRC_data:MOST. (accessed Aug. 12, 2021).

[119] S. Sadoudi, M. Boudour, and N. E. Y. Kouba, "Multi-microgrid intelligent load shedding for optimal power management and coordinated control with energy storage systems," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 11, pp. 15857–15878, Sep. 2021, doi: https://doi.org/10.1002/er.6819.

[120] A. K. Barik and D. C. Das, "Coordinated regulation of voltage and load frequency in demand response supported biorenewable cogeneration-based isolated hybrid microgrid with quasi-oppositional selfish herd optimisation," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12176.

[121] H. Shayeghi, A. Rahnama, and H. H. Alhelou, "Frequency control of fully-renewable interconnected microgrid using fuzzy cascade controller with demand response program considering," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6077–6094, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.09.027.

[122] Y.Q. Bao and Y. Li, "FPGA-Based Design of Grid Friendly Appliance Controller," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 924–931, Mar. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2285178.

[123] A. K. Barik and D. C. Das, "Proficient load-frequency regulation of demand response supported bio-renewable cogeneration based hybrid microgrids with quasi-oppositional selfish-herd optimisation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 13, pp. 2889–2898, Jul. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0166.

[124] NREL, "National Renewable Energy Laboratory (NREL). Wind data," 2021. https://www.nrel.gov/ (accessed Aug. 12, 2021).

[125] M. Ali, H. Kotb, M. Kareem AboRas, and H. Nabil Abbasy, "Frequency regulation of hybrid multi-area power system using wild horse optimizer based new combined Fuzzy Fractional-Order PI and TID controllers," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 12187–12210, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.06.008.

[126] H. Deng, Q. Li, Y. Cui, Y. Zhu, and W. Chen, "Nonlinear controller design based on cascade adaptive sliding mode control for PEM fuel cell air supply systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 35, pp. 19357–19369, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.180.

[127] T. Yigit and H. Celik, "Speed controlling of the PEM fuel cell powered BLDC motor with FOPI optimized by MSA," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 35097–35107, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.091.

[128] V. Suresh, N. Pachauri, and T. Vigneysh, "Decentralized control strategy for fuel cell/PV/BESS based microgrid using modified fractional order PI controller," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 5, pp. 4417–4436, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.050.

[129] R. Choudhary, J. N. Rai, and Y. Arya, “Cascade FOPI-FOPTID controller with energy storage devices for AGC performance advancement of electric power systems,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, p. 102671, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102671.

[130] A. Hassan, M. Aly, A. Elmelegi, L. Nasrat, M. Watanabe, and E. A. Mohamed, “Optimal Frequency Control of Multi-Area Hybrid Power System Using New Cascaded TID-PIλDμN Controller Incorporating Electric Vehicles,” *Fractal Fract.*, vol. 6, no. 10, p. 548, Sep. 2022, doi: 10.3390/fractalfract6100548.

[131] M. Bhuyan, D. C. Das, A. K. Barik, and S. C. Sahoo, “Performance Assessment of Novel Solar Thermal-Based Dual Hybrid Microgrid System Using CBOA Optimized Cascaded PI-TID Controller,” *IETE J. Res.*, pp. 1–18, Jun. 2022, doi: 10.1080/03772063.2022.2083026.

[132] M.-H. Khooban, T. Dragicevic, F. Blaabjerg, and M. Delimar, “Shipboard Microgrids: A Novel Approach to Load Frequency Control,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 843–852, Apr. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2763605.

[133] R. Coteli, H. Acikgoz, F. Ucar, and B. Dandil, “Design and implementation of Type-2 fuzzy neural system controller for PWM rectifiers,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 32, pp. 20759–20771, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.032.

[134] H. R. Patel, “Optimal intelligent fuzzy TID controller for an uncertain level process with actuator and system faults: Population-based metaheuristic approach,” *Franklin Open*, vol. 4, p. 100038, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fraope.2023.100038.

[135] S. Mohapatra, P. N. Panda, M. K. Khatua, ve R. C. Routray, “A Comparison between the FOTID and FOPID Controller for the Close-Loop Speed Control of a DC Motor System,” 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Applications (ICAIA) Alliance Technology Conference (ATCON-1), Apr. 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICAIA57370.2023.10169248.

[136] M. A. R. Shafei, D. K. Ibrahim, and M. Bahaa, “Application of PSO tuned fuzzy logic controller for LFC of two-area power system with redox flow battery and PV solar park,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 5, p. 101710, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.asej.2022.101710.

[137] H. Haes Alhelou, M. E. H. Golshan, and N. D. Hatziargyriou, “A Decentralized Functional Observer Based Optimal LFC Considering Unknown Inputs, Uncertainties, and Cyber-Attacks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 4408–4417, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2916558.

[138] S. Sharma, V. Verma, and R. K. Behera, “Real-Time Implementation of Shunt Active Power Filter With Reduced Sensors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 1850–1861, Mar. 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2957734.

[139] S. K. Ramoji and L. C. Saikia, “Optimal Coordinated Frequency and Voltage Control of CCGT-Thermal Plants with TIDF Controller,” *IETE J. Res.*, vol. 69, no. 7, pp. 4836–4853, Sep. 2023, doi: 10.1080/03772063.2021.1959420.

ÖZGEÇMİŞ

Süleyman YILDIZ

[redacted]

[redacted]

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID **:** 0000-0003-2325-8058
Danışman Orcid ID **:** 0000-0002-5795-2550

[redacted]

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Kullandığınız laboratuvar cihazları, bildiğiniz deney sistemleri gibi bilgiler veriniz (OPAL-RT)
- ✓ Bildiğiniz bilgisayar programlama dillerini yazınız (C-C++, MATLAP)
- ✓ Kullanabildiğiniz bilgisayar programlarını yazınız (RT-LAB, AUTOCAD, PROTEUS)

[redacted]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. S. Yıldız, B. Yildirim, and M. T. Özdemir, "Enhancing load frequency control and cybersecurity in renewable energy microgrids: A fuel cell-based solution with non-integer control under cyber-attack," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 75, pp. 438–449, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.145.
2. S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. T. Özdemir, "An innovative LFC scheme for multi-area microgrid incorporating with hydrogen-based demand response mechanism," Int. J. Hydrogen Energy, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.278.

3. S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "An islanded microgrid energy system with an innovative frequency controller integrating hydrogen-fuel cell," Fuel, vol. 326, p. 125005, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125005.

Bildiriler:

4. S. Yıldız, "Circle-Inspired Optimization Algorithm for Parameter Estimation in Photovoltaic and Fuel Cell Systems," 8th International Hydrogen Technologies Congress IHTEC2024, 2024.

5. S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "Frequency response of fuel cell-based bio-microgrid with an enhanced controller during cyber-intrusions," 7th International Hydrogen Technologies Congress IHTEC2023.

6. S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "Two-Area Interconnected Microgrid System with Improved Non-Integer Controller under Cyber Attack Propagation," 6th International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC-2022)

7. S. Yıldız, H. Gunduz, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "Two-Area Interconnected Microgrid System with Improved Non-Integer Controller", The 5th International Conference on Alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE 2021)

8. S. Yıldız, B. Yildirim, and M. Temel Özdemir, "A New Off-Grid Autonomous Energy Energy System Structure and Improved Controller", 5th International Hydrogen Technologies Congress IHTEC2021