

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN HAVAALANI
MİKRO ŞEBEKELERİNİN YÜK-FREKANS KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATİH ÇİÇEK

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Burak YILDIRIM

BİNGÖL-2026

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve rehberliğini benimle paylaşarak bana yol gösteren, her zaman desteğini ve sabrını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Burak YILDIRIM'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, tez sürecinde teknik bilgi birikimiyle, akademik desteğiyle bana katkı sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK'e de şükranlarımı arz ederim.

Bu süreçte bana her zaman güvenen, sabırla yanımda olan, dualarını esirgemeyen, moral ve motivasyon kaynağım olan aileme tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri fedakârlık ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

FATİH ÇİÇEK

Bingöl 2026

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
3. YÜK FREKANS KONTROLÜ	12
3.1. Birincil (Primer) Frekans Kontrol.....	14
3.2. İkincil (Sekonder) Frekans Kontrol.....	15
3.3. Üçüncül (Tersiyer) Frekans Kontrol.....	16
4. KONTROL YÖNTEMLERİ	18
4.1. PID Kontrolör.....	18
4.2. TİD Kontrolör.....	19
4.3. FOPID Kontrolör.....	20
4.4. Bulanık Kontrolör.....	21
4.5. Kontrolörlerin Modellenmesi.....	23
4.5.1. Performans Endeksleri ve Amaç Fonksiyonu.....	23
4.5.2. Karınca Koloni Optimizasyon (KKO) Algoritması	24
4.5.3. Klasik ve Fuzzy Kontrolör Yapıları.....	25
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
5.1. Havalimanı Mikro Şebeke (HMS) Sistemi.....	28
5.1.1. Dizel Generatör (DG) Modeli.....	29
5.1.2. Elektrikli Araç (EV) Modeli.....	30
5.1.3. Elektrikli Hava Aracı (EAC) Modeli.....	30
5.1.4. Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) Modeli	30

5.1.5. Rüzgar Türbini (WTG) Modeli.....	31
5.1.6. Fotovoltaik (PV) Panel Modeli.....	31
5.1.7. Sistem Dinamik Modeli.....	32
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34
6.1. PID Kontrolör için Analiz Sonuçları.....	36
6.1.1. Birinci Senaryo.....	36
6.1.2. İkinci Senaryo.....	38
6.1.3. Üçüncü Senaryo.....	40
6.1.4. Dördüncü Senaryo.....	42
6.2. FOPID Kontrolör için Analiz Sonuçları.....	44
6.2.1. Birinci Senaryo.....	44
6.2.2. İkinci Senaryo.....	46
6.2.3. Üçüncü Senaryo.....	49
6.2.4. Dördüncü Senaryo.....	51
6.3. TID Kontrolör için Analiz Sonuçları.....	53
6.3.1. Birinci Senaryo.....	53
6.3.2. İkinci Senaryo.....	55
6.3.3. Üçüncü Senaryo.....	58
6.3.4. Dördüncü Senaryo.....	60
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

YEK	: Yenilenebilir enerji kaynakları
YFK	: Yük frekans kontrolü
PI	: Oransal-İntegral Kontrol
PID	: Oransal-İntegral-Türev Kontrol
FOPID	Kesir Dereceli Oransal-İntegral-Türev Kontrol
TID	Eğimli-İntegral-Türev Kontrol
KKO	Karınca Koloni Optimizasyonu
EAC	: Elektrikli Hava Aracı
EV	: Elektrikli Araç
HMŞ	: Havalimanı Mikro şebeke
WTG	: Rüzgar Türbin Generatör
PV	: Fotovoltaik Panel
DG	: Dizel Generatör
BESS	: Batarya Enerji Depolama Sistemi
IAE	: Mutlak Hata İntegrali
ITAE	: Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali
ISE	: Karesel Hata İntegrali
ITSE	: Zaman Ağırlıklı Karesel Hata İntegrali
FC	: Yakıt Hücresi
DC	: Doğru akım
AGC	: Otomatik Üretim Kontrolü
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
T_d	: Generatör zaman sabiti
T_g	: Governör zaman sabiti
T_{WTG}	: WTG sisteminin zaman sabiti
T_{PV}	: PV sisteminin zaman sabiti
T_{inv}	: PV inverter sisteminin zaman sabiti

$T_{I/C}$	: PV bağlantı elemanı zaman sabiti
T_{EV}	: EV sisteminin zaman sabiti
T_{EAC}	: EAC sisteminin zaman sabiti
T_{BESS}	: BESS sisteminin zaman sabiti
D	: Sönümlleme katsayısı
M	: Atalet sabiti
R	: Hız regülasyon katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Frekans sapma büyüklüğüne göre işletme kontrol şemaları.....	13
Şekil 3.2.	Geleneksel güç sistemlerinde frekans dinamik kontrolünün zaman ölçeği.....	14
Şekil 3.3.	Governörün düşüş karakteristiği.....	15
Şekil 4.1.	PID kontrolörün yapısı.....	19
Şekil 4.2.	TID kontrolörün yapısı.....	20
Şekil 4.3.	FOPID kontrolörün yapısı.....	21
Şekil 4.4.	Fuzzy kontrol yapısı.....	22
Şekil 4.5.	KKO Algoritmasının genel yapısı.....	25
Şekil 4.6.	Bulanık PID kontrolörün blok diyagramı.....	26
Şekil 4.7.	HMS sistemi kontrol süreç diyagramı.....	27
Şekil 5.1.	HMS mimarisi	28
Şekil 5.2.	HMS'nin YFK'sı için dinamik modeli	29
Şekil 5.3.	YEK'ler için gürültü tabanlı matematiksel ve dinamik model...	31
Şekil 6.1.	PV, WTG ve yük güç değişimi.....	34
Şekil 6.2.	Senaryo 1 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi	36
Şekil 6.3.	Senaryo 2 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	38
Şekil 6.4.	Senaryo 3 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	40
Şekil 6.5.	Senaryo 4 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	42
Şekil 6.6.	Senaryo 1 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	45
Şekil 6.7.	Senaryo 2 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	47

Şekil 6.8.	Senaryo 3 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	49
Şekil 6.9.	Senaryo 4 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	51
Şekil 6.10.	Senaryo 1 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi	54
Şekil 6.11.	Senaryo 2 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	56
Şekil 6.12.	Senaryo 3 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	58
Şekil 6.13.	Senaryo 4 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi.....	60

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1.	HMS ünitelerine ait parametre değerleri.....	32
Tablo 6.1.	Senaryo 4 için kullanılan yeni parametre değerleri.....	35
Tablo 6.2.	Benzetim sonuçlarında kullanılan kontrolör parametre değerleri.....	35
Tablo 6.3.	Senaryo 1 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	37
Tablo 6.4.	Senaryo 2 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	39
Tablo 6.5.	Senaryo 3 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	41
Tablo 6.6.	Senaryo 4 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	43
Tablo 6.7.	Senaryo 1 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	45
Tablo 6.8.	Senaryo 2 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	48
Tablo 6.9.	Senaryo 3 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	50
Tablo 6.10.	Senaryo 4 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	52
Tablo 6.11.	Senaryo 1 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	54
Tablo 6.12.	Senaryo 2 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları	57
Tablo 6.13.	Senaryo 3 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	59
Tablo 6.14.	Senaryo 4 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları.....	61

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN HAVAALANI MİKRO ŞEBEKELERİNİN YÜK-FREKANS KONTROLÜ

ÖZET

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemi ve elektrikli araçlardan oluşan bir havalimanı mikro şebeke sistemin sekonder yük frekans kontrolü incelenmiştir. Bu amaçla rüzgar türbin generatörü, fotovoltaiik sistem, dizel generatör, batarya enerji depolama sistemi, elektrikli araç, elektrikli hava aracı ve yük bileşenlerinden oluşan bir izole havalimanı mikro şebeke modeli oluşturulmuştur. Modellenen havalimanı mikro şebekenin sekonder yük frekans kontrolü için kontrolör yapısı olarak klasik oransal-integral-türev, eğimli-integral-türev ve kesir dereceli oransal-integral-türev kontrolör yapıları ile bu klasik kontrolör yapılarının parametre değerlerini dinamik bir biçimde ayarlayan bulanık mantık içeren yapılar oluşturulmuştur. Kullanılan kontrolör yapılarının ilk başlangıç parametre değerlerini belirlemek için karınca koloni optimizasyon algoritmasından yararlanılmıştır. Burada karınca koloni optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonu olarak mutlak hata integrali, zaman ağırlıklı mutlak hata integral, karesel hata integrali ve zaman ağırlıklı karesel hata integrali performans indekslerini yapısında bulunduran bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

Önerilen kontrol yapılarının performanslarını değerlendirmek amacıyla havalimanı mikro şebeke sisteminde dört farklı çalışma senaryosu oluşturulmuştur. İlk senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı üretim miktarı ile yük miktarının normal işletme şartlarında olduğu varsayılmıştır. İkinci senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim miktarının fazla olduğu yük miktarının ise sabit işletme şartlarında olduğu kabul edilmiştir. Üçüncü senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretimin az olduğu ve yük miktarının fazla olduğu bir işletme senaryosu oluşturulmuştur. Son senaryoda ise havalimanı mikro şebeke modelinde sistem parametre değişimlerinin meydana geldiği bir senaryo oluşturulmuştur. Bu son senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı üretimin ve yükün normal işletme şartları altında olduğu düşünülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan üç farklı kontrolörün hem klasik hem de bulanık mantık içeren yapıları her bir senaryo için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, sistem frekans yanıtlarına ait şekiller ile performans indeks değerlerine ait tablolar sunulmuştur. Genel olarak elde edilen analiz sonuçlarına göre; üç temel kontrolörün tamamında bulanık mantık içeren kontrolör yapılarının klasik yapılara göre bütün işletme şartlarında havalimanı mikro şebeke sistemin frekans kararlılığını iyileştirdiği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havalimanı mikro şebekesi, yük-frekans kontrolü, PID kontrolör, TID kontrolör, FOPID kontrolör, bulanık mantık, karınca koloni optimizasyonu, yenilenebilir enerji kaynakları.

LOAD FREQUENCY CONTROL OF AIRPORT MICROGRIDS CONTAINING RENEWABLE ENERGY SOURCES

ABSTRACT

In this thesis, the secondary load frequency control of an airport microgrid system comprising renewable energy sources, an energy storage system, and electric vehicles was investigated. For this purpose, an isolated airport microgrid model consisting of a wind turbine generator, a photovoltaic system, a diesel generator, a battery energy storage system, electric vehicles, electric aircraft, and load components was developed. For the secondary load frequency control of the modeled airport microgrid, classical proportional-integral-derivative, tilt-integral-derivative, and fractional-order proportional-integral-derivative controller structures were established, alongside fuzzy logic-based structures that dynamically adjust the parameter values of these classical controllers. The ant colony optimization algorithm was utilized to determine the initial parameter values of the employed controller structures. Herein, an objective function incorporating the Integral of absolute error, integral of time-weighted absolute error, integral of squared error, and integral of time-weighted squared error performance indices was formulated for the ant colony optimization algorithm.

To evaluate the performance of the proposed control structures, four distinct operating scenarios were established within the airport microgrid system. In the first scenario, it was assumed that the generation from renewable energy sources and the load demand are under normal operating conditions. In the second scenario, the generation from renewable energy sources was assumed to be high while the load demand remains at constant operating conditions. The third scenario presents an operating condition characterized by low generation from renewable energy sources and high load demand. In the final scenario, parametric variations within the airport microgrid model were introduced. In this last scenario, both the generation from renewable energy sources and the load were considered to be under normal operating conditions.

Both the classical and fuzzy logic-based structures of the three different controllers utilized in this study were comparatively analyzed for each scenario. The obtained analysis results were presented through figures illustrating the system frequency responses and tables detailing the performance index values. Based on the overall analysis results, it was concluded that for all three fundamental controllers, the fuzzy logic-based structures improved the frequency stability of the airport microgrid system across all operating conditions compared to their classical counterparts.

Keywords: Airport microgrid, load frequency control, PID controller, TID controller, FOPID controller, fuzzy logic, ant colony optimization, renewable energy sources.

1. GİRİŞ

Artan ekonomik faaliyetler, enerji talebini büyük ölçüde yükseltmektedir (Sompolska-Rzechuła, Bąk, Becker, Marjak, and Perzyńska, 2024). Nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi ve altyapı gelişimi de elektrik enerjisi talebindeki artışla ilişkilendirilmektedir. Fosil yakıt rezervlerinin azalması, geleneksel enerji kaynaklarının çevresel etkileri, enerji sistemlerinin yaşlanması ve yüksek enerji tüketimi, mevcut enerji yapısının sürdürülebilirliğine ilişkin sorunlar oluşturmaktadır (Azeem et al., 2021; Babatunde, Munda, and Hamam, 2020). İklim değişikliği, enerji maliyetlerindeki yükselme ve fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi karşısında yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), enerji dönüşümünün temel unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir. YEK'lerin yaygın kullanımı; sera gazı emisyonlarının azaltılmasına, enerji üretiminden kaynaklanan atıkların düşürülmesine ve küresel enerji güvenliğinin güçlendirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Bąk, Spoz, Zioło, and Dylewski, 2021; Paramati, Sinha, and Dogan, 2017; Sompolska-Rzechuła et al., 2024). Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve su gücü, enerji sektöründe karbon arındırma hedefine ulaşılması için yenilenebilir enerjinin ana kaynakları olarak kullanılabilecek teknolojilerdir. Bununla birlikte, YEK'lerin üretim karakteristikleri; geleneksel üretim kaynaklarından farklılık göstermektedir. Senkron olmayan ve öngörülemez üretim yapıları nedeniyle mevcut güç sistemlerinde çeşitli işletme zorlukları oluşturmaktadır (Erdiwansyah et al., 2021).

Mikro şebekeler, YEK'leri ve enerji depolama sistemlerini elektrik şebekesine temiz, verimli ve ekonomik olarak entegre eden sistemlerdir. (Hernández-Mayoral et al., 2023). Mikro şebekeler, enerji depolama sistemleri ve dağıtık üretim birimleriyle birlikte çalışan birbirine bağlı yük gruplarından oluşmakta; ana şebeke ile ortak bağlantı noktası üzerinden güç alışverişi yapabilmektedir (Rajesh, Dash, Rajagopal, and Sridhar, 2017). Bu yapılar ana şebeke ile entegre çalışabildiği gibi, şebekeden bağımsız olarak ada işletiminde de faaliyet gösterebilmektedir (Lopes, Moreira, and Madureira, 2006). Hem şebekeye bağlı hem de ada işletimli çalışma yeteneği, mikro şebekelerin yerel tüketicilere enerji sağlama, güç akışını düzenleme ve YEK'lerin kullanılabilirliğini artırma potansiyelini güçlendirmektedir (Hernández-Mayoral et al., 2023; Kandari, Neeraj, and Micallef, 2022).

Ada işletimli mikro şebekelerde frekans ve gerilim kontrolü, şebekeye bağlı çalışmaya göre daha karmaşık kabul edilmektedir. Şebekeye bağlı çalışma koşullarında frekans ve gerilim, büyük ölçüde ana şebekenin çalışma ayarlarına bağlı iken, ada işletiminde mikro şebekenin kendi kaynaklarıyla frekans ve gerilim kararlılığını sağlaması gerekmektedir. YEK'lerin belirsiz ve değişken yapısı, özellikle ada işletiminde frekans sapmalarını artırabilmektedir. Modern mikro şebekelerde yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonu, değişken sistem ataleti ve sınırlı döner rezervler; geleneksel yük frekans kontrol (YFK) yaklaşımlarının kararlılık ve bozucu etkileri bastırma yeteneklerini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, kesintisiz, kaliteli ve sürdürülebilir enerji arzının sağlanabilmesi için mikro şebekelerde YFK mekanizmalarının uygun biçimde tasarlanması ve etkin şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır. (Alizadeh, Tightiz, and Azimi Nasab, 2024; Türk, Kılıç, Haydaroğlu, and Top, 2025; Yıldız, 2025; Zhang, Wang, Yu, Xu, and Fan, 2018).

Mikro şebekelerdeki YFK problemine yönelik literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda; klasik oransal-integral (Proportional Integral-PI) ve oransal-integral-türev (Proportional Integral Derivative-PID) kontrolörleri, bulanık mantık tabanlı denetleyiciler, kesir dereceli kontrolörler, uyarlamalı kontrol yapıları, model öngörülü kontrol yöntemleri ve sezgisel optimizasyon algoritmaları farklı mikro şebeke modelleri üzerinde uygulanmıştır. Son yıllarda bulanık mantık yapıları; PID, eğimli-integral-türev (Tilt Integral Derivative-TID) ve kesir dereceli PID (Fractional Order PID-FOPID) gibi kontrolörlerin parametrelerini çalışma koşullarına bağlı olarak ayarlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde karınca koloni optimizasyonu (KKO), parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma ve benzeri sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Havalimanları; haberleşme altyapıları, hava trafik kontrol sistemleri, terminal hizmetleri, güvenlik birimleri, aydınlatma sistemleri, elektrikli yer hizmetleri araçları ve gelecekte yaygınlaşması beklenen elektrikli hava araçları (Electrical Aircraft-EAC) nedeniyle yüksek enerji sürekliliği gerektiren kritik tesislerdir. Havalimanı yük profilleri, enerji sistemlerinde yalnızca toplam tüketimin değil, yükün zaman içerisindeki değişiminin de dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla havalimanları, farklı nitelikteki kritik ve kritik olmayan yüklerin birlikte bulunduğu özel enerji sistemleri olarak

değerlendirilebilir. Havacılık sektöründe elektrikli ulaşım çözümlerinin yaygınlaşması ile, havalimanı enerji altyapısının EAC ve elektrikli kara araçlarının şarj gereksinimlerini de karşılayabilecek şekilde geliştirilmesi önem kazanmıştır. EAC'lerin havalimanı altyapısına etkisini inceleyen çalışmalar, şarj sürelerinin, park pozisyonlarının, enerji gereksiniminin ve operasyonel kapasitenin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Doctor, Budd, Williams, Prescott, and Iqbal, 2022). Bu nedenle havalimanları; YEK'ler, enerji depolama sistemleri, elektrikli araçlar (Electrical Vehicle-EV), EAC'ler ve kontrol edilebilir yüklerin birlikte bulunduğu özel mikro şebeke uygulamaları olarak değerlendirilebilir (Z. Guo, Zhang, and Zhang, 2021; Zekun Guo, Li, Taylor, and Zhang, 2023).

Bu tesislerde enerji arzının güvenilir, kaliteli ve kesintisiz şekilde sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi YEK'lerin üretimindeki değişkenlik ile elektrikli ulaşım bileşenlerinin şarj ve kullanım durumlarına bağlı güç değişimleri, üretim-tüketim dengesini bozarak havalimanı mikro şebeke (HMS) frekansında sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, havalimanı mikro şebekelerinde farklı işletme koşullarına uyum sağlayabilen, frekans sapmalarını kısa sürede bastırabilen ve sistem parametrelerindeki belirsizliklere karşı dayanıklı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, rüzgar türbini (Wind Turbine Generator-WTG), fotovoltaik panel (Photovoltaic-PV), dizel generatör (Diesel Generator-DG), batarya enerji depolama sistemi (Battery Energy Storage System-BESS), EV, EAC ve yük birimlerinden oluşan izole bir HMS'nin YFK'sı incelenmiştir. HMS içerisinde DG, EV ve EAC; sekonder frekans kontrolüne katılan sevk edilebilir birimler olarak ele alınmıştır. Sistemin frekans performansını iyileştirmek amacıyla PID, TID ve FOPID kontrolörleri ile bu kontrolörlerin bulanık mantık destekli yapıları tasarlanmıştır. Kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde KKO algoritması kullanılmış ve amaç fonksiyonu olarak mutlak hata integrali (Integral of Absolute Error-IAE), zaman ağırlıklı mutlak hata integrali (Integral of Time-weighted Absolute Error-ITAE), karesel hata integrali (Integral of Squared Error-ISE) ve zaman ağırlıklı karesel hata integrali (Integral of Time-weighted Squared Error-ITSE) esas alınmıştır. Önerilen kontrol yapıları; normal işletme koşulları, yüksek yenilenebilir üretim, düşük yenilenebilir üretim ile artan yük talebi ve parametre değişimlerini içeren dört farklı

senaryo altında değerlendirilmiştir. Böylece, klasik ve bulanık mantık destekli kontrolörlerin, HMŞ'lerin YFK'sı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının temel amacı; YEK'ler ve elektrikli ulaşım bileşenlerini içeren izole bir HMŞ'nin YFK performansını iyileştirecek uygun kontrol yapılarını araştırmak ve değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda; WTG, PV, DG, BESS, EV, EAC ve yük birimlerinden oluşan bir HMŞ modeli oluşturulmuştur. HMŞ içerisindeki DG, EV ve EAC, frekans kontrolüne katılabilen sevk edilebilir kaynaklar olarak ele alınmış ve merkezi bir kontrol birimi üzerinden koordine edilmiştir. Elde edilen sonuçların, gelecekte havalimanları ve benzeri kritik tesisler için geliştirilecek yenilenebilir enerji tabanlı mikro şebeke kontrol sistemlerine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Çalışmada, HMŞ frekans performansını değerlendirmek amacıyla klasik PID, TID ve FOPID kontrolörleri kullanılmıştır. Ayrıca, kontrolör parametrelerinin çalışma koşullarına bağlı olarak dinamik biçimde ayarlanabilmesi için bu kontrolörlerin bulanık mantık destekli yapıları tasarlanmıştır. Kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde KKO algoritmasından yararlanılmıştır. Böylece hem klasik hem de bulanık mantık destekli kontrolörlerin HMŞ frekans regülasyonu üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Tez kapsamında kontrolör performansları dört farklı işletme senaryosu altında değerlendirilmiştir. İlk senaryoda yenilenebilir üretim ve yük talebinin normal çalışma koşullarında olduğu durum ele alınmıştır. İkinci senaryoda yenilenebilir enerji üretiminin arttığı koşullar incelenmiş, üçüncü senaryoda ise yenilenebilir üretimin azalması ve yük talebinin artması durumunda sistemin frekans davranışı analiz edilmiştir. Dördüncü senaryoda ise HMŞ parametrelerinde meydana gelen değişimlere karşı kontrolörlerin dayanıklılığı test edilmiştir. Kontrolörlerin başarımları; IAE, ITAE, ISE ve ITSE performans indeksleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bu tez yedi bölümden meydana gelmiştir. Giriş bölümünde YEK tabanlı bir HMŞ modelinin yapısı ve önemi hakkında bilgiler verilmiştir. Kaynak Özetleri başlıklı ikinci bölümde tez konusu ile ilgili daha önce yapılan literatürdeki çalışmalardan bazıları sunulmuştur. Tezin üçüncü bölümünde ilk olarak YFK kavramı açıklanmıştır. Devamında ise primer, sekonder ve tersiyer kontrol kavramları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde HMŞ

sisteminin YFK'sı için kullanılan kontrol yöntemlerinin detaylarına yer verilmiştir. Materyal ve Yöntem başlıklı beşinci bölümde HMS sistemi açıklanmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde ise HMS'nin YFK için kullanılan farklı kontrol yapılarına ait analiz sonuçları verilmiştir. Yedinci bölüm olan Sonuçlar ve Öneriler bölümünde ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sonraki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yakout ve arkadaşları (Yakout, Kotb, Hasanien, and Aboras, 2021), hibrit bir mikro şebekenin YFK'sı için bulanık-filtreli PID kontrolör yapısı önermiş ve denetleyici parametrelerini deniz avcısı optimizasyon algoritması ile belirlemiştir. Çalışmada, bulanık mantık yapısının klasik sabit parametrelili denetleyicilere göre daha uyarlanabilir bir kontrol davranışı sağlayabilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma, bulanık mantık ile filtreli PID yapısının birlikte kullanılmasının, yenilenebilir enerji ve depolama bileşenleri içeren mikro şebekelerde frekans performansını iyileştirmeye yönelik bir yaklaşım olabileceğini göstermektedir. Chen ve arkadaşları, çok bölgeli güç sistemlerinin YFK'sında bulanık PID kontrolör parametrelerinin iyileştirilmesi için geliştirilmiş bir KKO yaklaşımı kullanmıştır (Chen, Li, Zhang, and Li, 2020).

Khokhar ve arkadaşları (Khokhar, Dahiya, and Parmar, 2021), YEK'lerin değişken üretimi ve ada modundaki mikro şebekelerin düşük atalet karakteristiği altında YFK için hibrit bulanık PD–TID denetleyicisi geliştirmiştir. Önerilen yapıda, bulanık PD bölümünün uyarlama kabiliyeti ile TID kontrolörünün frekans regülasyonundaki dinamik özellikleri bir araya getirilmiştir. Denetleyici parametrelerinin belirlenmesinde kaotik karga arama algoritmasından yararlanılmıştır. Çalışma, özellikle yenilenebilir üretim belirsizliği ve düşük atalet koşullarında önerilen denetleyicinin klasik kontrol yapılarına alternatif oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

Rai ve Das (Rai and Das, 2022), enerji depolama sistemleri içeren bir mikro şebekenin YFK'sı için bulanık TID denetleyicisi geliştirmiştir. Çalışmada TID kontrolörünün parametrelerinin belirlenmesinde yelken balığı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu yaklaşımda bulanık mantık yapısı, değişen yük ve üretim koşullarında denetleyici parametrelerinin daha esnek biçimde düzenlenmesine katkı sağlamaktadır.

Patel ve arkadaşları (Patel, Mohanty, and Hasanien, 2020) ise hibrit mikro şebeke sisteminin frekans kararlılığı için bulanık-filtreli TID denetleyicisini kaynaklar üzerine rekabet optimizasyon yöntemi ile birleştirmiştir.

Naderipour ve arkadaşları (Naderipour, Abdul-Malek, Davoodkhani, Kamyab, and Ali, 2021), PV, WTG, DG, yakıt hücresi (fuel cell-FC) ve enerji depolama bileşenlerini içeren ada modlu mikro şebekede birleşik bir bulanık mantık ve kesirli dereceli kontrolör kullanmıştır. Çalışmada, parametre ayarlamaları için balina optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Önerilen yapının klasik PID denetleyicisine göre frekans sapması ve cevap hızı bakımından daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Singh ve Arya (K. Singh and Arya, 2023) yaptıkları çalışmada, düşük eylemsizlik ve birincil frekans kontrolü eksikliği yaşayan bağımsız bir mikro şebekede, değişken gelgit türbinleri kullanarak YFK sağlamayı amaçlamaktadır. Gelgit türbinlerinin kinetik enerjisini frekans dalgalanmalarını dengelemek üzere kullanan ve parametreleri Jaya algoritması ile optimize edilen kademeli kesirli dereceli bulanık PID-integral çift türevli denetleyici önerilmiştir.

Ortega Alba ve Manana (Ortega Alba and Manana, 2017), havalimanlarındaki enerji talep modellerini inceleyerek bu tesislerin farklı işlevsel alanlardan oluşan karmaşık enerji tüketim yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada, terminal binaları, havalimanı operasyonları ve yardımcı tesislerin enerji talebi birlikte değerlendirilmiştir.

Sreenath ve arkadaşları (Sreenath, Sudhakar, A.F., Solomin, and Kirpichnikova, 2020), Malezya'daki bir havalimanı için PV enerji sistemini; parlama etkisi, tasarım özellikleri ve performans değerlendirmesi bakımından incelemiştir. Çalışma, havalimanı ortamında PV sistemlerinin teknik olarak uygulanabilirliğini değerlendirirken, uçuş emniyeti açısından önemli olan yansıma ve parlama etkilerini de dikkate almıştır.

Sreenath ve arkadaşları (Sreenath, Sudhakar, and Yusop, 2020) diğer bir çalışmada, havalimanı sınırları içerisindeki PV sistemleri için olası riskleri belirlemiş ve bu risklerin gerçekleşme olasılıklarını değerlendirmiştir. Bu iki çalışma, havalimanlarında yenilenebilir enerji entegrasyonunun yalnızca enerji üretim kapasitesi ile değil, operasyonel güvenlik ve uçuş emniyeti koşullarıyla birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

EAC'lerin gelişimi, havalimanı enerji altyapısının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Trainelli ve arkadaşları (Trainelli, Salucci, Riboldi, Rolando, and Bigoni, 2021), elektrikli havacılığı desteklemek üzere havalimanı altyapısının boyutlandırılması ve işletilmesi problemini incelemiştir. Çalışmada, EAC'lerin operasyonları için gerekli olan şarj altyapısının boyutu ve işletme koşulları ele alınmıştır.

Wang ve arkadaşları (Wang, Atkin, Bazmohammadi, Bozhko, and Guerrero, 2021), EAC'ler için batarya sistemlerini planlamak ve talep tarafında esnekliği kullanarak operasyonel gereksinimleri karşılamak için model öngörücü kontrol tabanlı bir operasyon yönetim stratejisi önermiştir.

Alruwaili ve Cipcigan (Alruwaili and Cipcigan, 2022), PV sistem, BESS ve DG'den oluşan şebekeye bağlı bir HMS'yi incelemiştir. Çalışmada, farklı şebeke kesintisi senaryoları altında havalimanının enerji dayanıklılığını artırmak amacıyla teknik ve ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır. Mikro şebeke bileşenlerinin boyutlandırılması ile güç sevk planının belirlenmesinde değiştirilmiş karma tam sayılı doğrusal programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışma, HMS'lerde yenilenebilir enerji ve depolama bileşenlerinin yalnızca maliyet azaltma amacıyla değil, kesintiler karşısında enerji arz sürekliliğinin sağlanması için de kullanılabileceğini göstermektedir.

Lei ve arkadaşları (Lei, Du, Li, and Gao, 2022), EAC'ler için HMS'lerde enerji yönetimini gerçek zamanlı benzetim yaklaşımıyla ele almıştır. Çalışmada, EAC yükleri ile mikro şebeke kaynaklarının koordineli işletilmesine yönelik güç planlama problemi incelenmiştir.

Tang ve arkadaşları (Z. Tang, Liu, Shen, and Zeng, 2022), düşük karbonlu havalimanı odaklı bir mikro şebekede heterojen enerji depolama sistemi için zaman çizelgeleme stratejisi geliştirmiştir. Çalışmada, havalimanlarında yardımcı güç ünitesi kullanımından kaynaklanan fosil yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmiştir. Farklı depolama teknolojilerinin birlikte kullanılmasıyla enerji aktarımının zaman içerisinde düzenlenmesi ve düşük karbonlu işletmenin desteklenmesi amaçlanmıştır.

Minja ve Mushi (Minja and Mushi, 2023), Tanzanya'daki Mwanza Uluslararası Havalimanı için PV, WTG, DG ve BESS bileşenlerini içeren hibrit yenilenebilir enerji sistemini tasarlamış ve benzetim yoluyla değerlendirmiştir. Çalışmada, farklı hibrit enerji sistemi konfigürasyonları teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Havalimanının yük ihtiyacını karşılamaya yönelik uygun PV-BESS-DG bileşiminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Van Oosterom ve Mitici (van Oosterom and Mitici, 2023), Norveç'teki kısa menzilli elektrikli uçuş uygulaması için batarya şarj ve batarya değiştirme altyapısının optimizasyonunu incelemiştir. Çalışmada, hava yolu işletmesinin batarya değiştirme yaklaşımı kullanması durumunda şarj gücü ve yedek batarya kapasitesi gibi altyapı kararları ele alınmıştır. EAC'ler için şarj veya batarya değiştirme tercihlerinin, havalimanı enerji altyapısının boyutlandırılması üzerinde doğrudan etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Goh ve arkadaşları (Goh et al., 2024), havalimanlarının 2050 yılına kadar karbon nötr çalışmasına katkı sunmak amacıyla atık, rüzgâr ve güneş enerjisi bileşenlerini içeren uyarlamalı bir enerji yönetim stratejisi geliştirmiştir. Çalışmada, güneş ve rüzgâr enerjisi, atıktan enerji üretimi, batarya depolama sistemi ve hidrojen depolama sistemi birlikte değerlendirilmiştir. Kopenhag Havalimanı için gerçekleştirilen örnek uygulamada, günlük işletme koşullarına göre enerji kaynaklarını planlanmak için model öngörülü kontrol yaklaşımından yararlanılmıştır.

Verdugo ve arkadaşları (Verdugo, Cañizares, and Pirnia, 2025), EAC şarjı için hangar ölçeğinde termo-elektrik mikro şebeke ve enerji yönetim modelini incelemiştir. Önerilen enerji yönetim sisteminin matematiksel modeli, Kanada'nın Ontario eyaletindeki Waterloo Wellington Uçuş Merkezi'nde yer alan bir hangar için geliştirilen mikro şebeke modeline uygulanmıştır. Çalışma sonucunda önerilen mikro şebeke modeli ve enerji yönetim sisteminin, işletme maliyetleri ve CO₂ emisyonları açısından önemli faydalar sağlayabileceği gösterilmiştir.

Buvarp ve arkadaşları (Buvarp, Syrén, Lindberg, Oliveira, and Leijon, 2026), İsveç'teki Norrköping Havalimanı için EAC şarjını destekleyen bir mikro şebeke tasarımı sunmuştur. Önerilen yapıda; PV üretim sistemi, BESS, ana şebeke bağlantısı ve EAC'ler için 2 MW

doğru akım (DC) hızlı şarj birimi yer almaktadır. Çalışmada, mikro şebekenin yıl boyunca güvenilir çalışma kapasitesi ve ana şebekeye bağımlılığı azaltma potansiyeli benzetim yoluyla değerlendirilmiştir.

HMS'lerde frekans kontrolü üzerine yapılan doğrudan çalışmalar ise daha sınırlı olmakla birlikte son yıllarda artış göstermektedir. Shayeghi ve arkadaşları (Shayeghi, Davoudkhani, and Bizon, 2024), elektrikli hava aracı enerji depolama sistemi ve talep tarafı katılımını içeren ada modlu HMS için öz-uyarlamalı bulanık denetleyici geliştirmiştir. Çalışma, yenilenebilir üretimdeki değişkenlik, elektrikli hava aracı depolama birimleri ve talep tarafı katılımının aynı sistem içerisinde frekans kontrolüne etkisini ele almıştır.

Singh ve arkadaşları (S. Singh, Singh, Mathur, et al., 2025), yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu bir HMS için IAE esaslı PID kontrol yaklaşımını incelemiştir. Singh ve arkadaşları tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise HMS'de frekans kontrolü için ISE kriteri kullanılarak PID kontrolörü tasarlanmıştır (S. Singh, Singh, and Mathur, 2025).

Raslan ve arkadaşları (Raslan et al., 2025) yaptıkları çalışmada, modern HMS'lerde dayanıklı frekans kontrolü için bozucu gözlemci destekli kesir dereceli kontrol yaklaşımını değerlendirmişlerdir.

Haydaroğlu (Haydaroğlu, 2025) çalışmasında HMS sisteminin YFK'sını incelemiştir. Bu çalışma, enerji verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için YEK'lerin ve hidrojen enerjisinin bir HMS modeline entegrasyonunu araştırmaktadır. Enerji taleplerini düzenlemek için yeni bir iki serbestlik dereceli PID kontrolör tasarlanmış ve parametreleri kaos tabanlı kan emici sülük optimizasyonu algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Sistem, dört kontrolör ve dört optimizasyon algoritması kullanılarak beş senaryo altında değerlendirilmiştir.

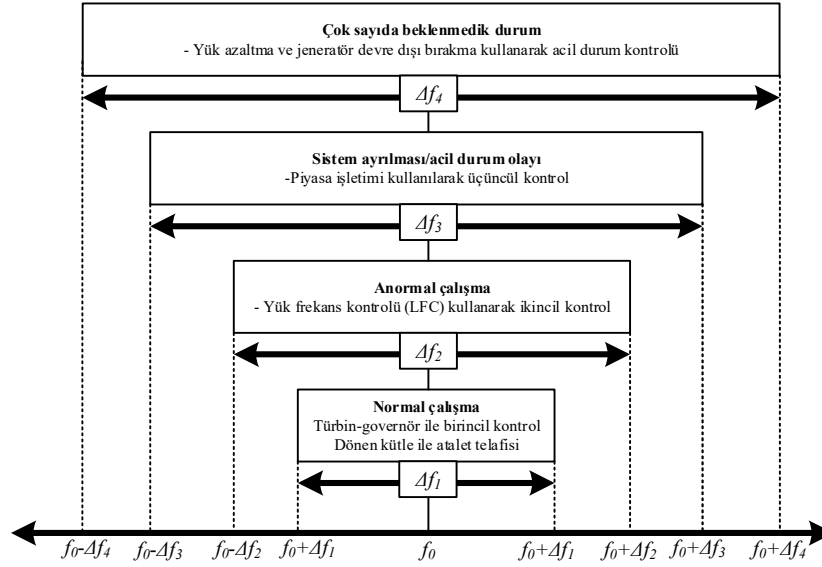
Varshney ve arkadaşları (Varshney, Patnana, and Singh, 2025), ada modunda çalışan bir HMS'nin frekans düzenlemesini, reaksiyon eğrisi tabanlı birinci dereceden zaman gecikmeli model yardımıyla incelemiştir. Çalışmada, set noktası izleme ve yük bozucu bastırma amaçları için iki farklı PID denetleyicisi tasarlanmış ve frekans cevapları

karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, set noktası izleme amacıyla tasarlanan PID kontrolörünün daha iyi geçici rejim davranışı ve daha düşük hata ölçütleri sağladığını rapor etmiştir.

3. YÜK FREKANS KONTROLÜ

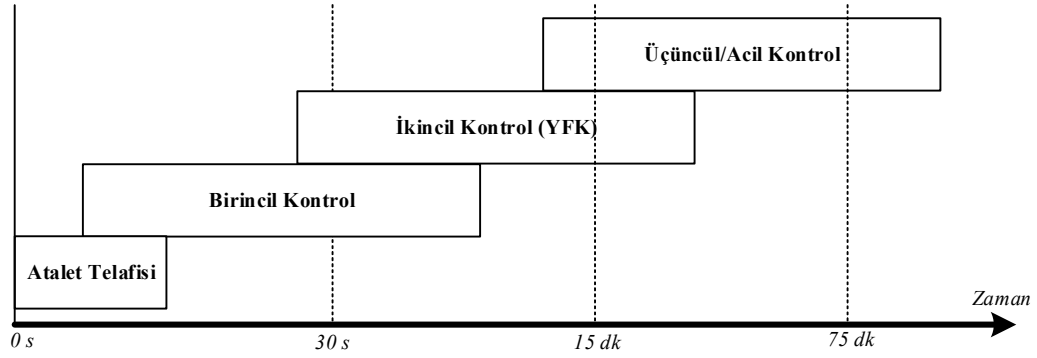
Frekans sapması, elektrik yükü ile bağlı generatörler tarafından sağlanan güç arasındaki dengesizliğin doğrudan bir sonucudur. Bu nedenle, üretim ve yük dengesizliğini göstermek için yararlı bir gösterge sağlar. Kalıcı olarak normalden sapsmış bir frekans sapması; ekipmanlara zarar vererek, yük performansını düşürerek, iletim hatlarını aşırı yükleyerek ve koruma cihazlarını tetikleyerek güç sistemi işletimini, güvenliğini ve verimliliğini doğrudan etkiler. Elektrik şebekesinde üretilen frekans, generatörün dönüş hızıyla orantılı olduğundan frekans kontrolü problemi doğrudan türbin-generator ünitesinin hız kontrolü problemine dönüştürülebilir. Bu problem; makine hızını algılayan, yük değişimini takip eden ve mekanik güç çıkışını değiştirmek üzere giriş valfini ayarlayan bir kontrol mekanizması eklenerek aşılr (Bevrani, 2014).

Frekans salınımı (sapma) bölgesine bağlı olarak, sistem frekansını düzenlemek için atalet gücü kompanzasyonu adı verilen doğal tepki, birincil (primer) kontrol, ikincil (sekonder) kontrol, üçüncül (tersiyer) kontrol ve acil durum kontrolü gerekebilir. Şekil 3.1'de, f_0 nominal frekanstır (örneğin, 50 Hz veya 60 Hz). Δf_1 , Δf_2 , Δf_3 ve Δf_4 , izin verilen frekans çalışma standartlarına göre çeşitli çalışma koşulları altında frekans salınım bölgelerini ortaya koymaktadır (Bevrani, 2014). Normal çalışma sırasında küçük frekans salınımları, atalet kompanzasyonu ve birincil kontrol ile azaltılabilir. Daha büyük frekans sapmalarında ise ikincil kontrol devreye girerek sistemi nominal değere geri döndürebilir. Önemli bir yük-üretim uyumsuzluğu durumunda oluşan hızlı frekans değişimlerini düzeltmede, ikincil kontrol yetersiz olabilir. Bu gibi durumlarda; kademeli arızalar, yük veya şebeke ayrılma olayları ve ek üretim olayları riskini azaltmak için üçüncül kontrolün, acil durum kontrolünün (örneğin düşük frekanslı yük azaltma) ve koruma şemalarının olağandışı işlemlerinin etkinleştirilmesi gerekir (Kerdphol, Rahman, Watanabe, and Mitani, 2021; Kundur, 1994).



Şekil 3.1. Frekans sapma büyüklüğüne göre işletme kontrol şemaları

Bir bozulma veya arızadan sonra dönen ünitelerdeki atalet güç kompanzasyonu, ilk frekans sapmasını durdurmak için 10 saniyeden daha kısa sürede tepki verir. Daha sonra türbin ünitesindeki birincil kontrol döngüsü yaklaşık 3 saniye içerisinde devreye girmekte ve 10 saniye içerisinde sisteme tam olarak aktarılmaktadır. Bu hizmet, gerektiğinde 20-40 saniyeye kadar sürdürülmektedir (Bevrani, 2014). Sistem kararlı hale gelir gelmez, sistem frekansı sabit bir değere geri döner, ancak generatör düşüşü orantılı bir etki yarattığı için geri dönen frekans nominal değerden farklı olabilir. Bu durumda, atalet kompanzasyonu ve birincil kontrol zaman ölçeklerini takiben ikincil kontrol etkinleştirilir ve bir bozulmadan sonra 30 dakikaya kadar etkinleştirilebilir. Bu kontrol, kontrol gücünün dağıtımıyla nominal frekansı ve değiştirilen gücü yeniden kurabilir. Bazı kritik arızalarda veya olaylarda, sistem frekansı hızla düşerek belirleyici bir değere ulaşırsa, frekansı geri kazanmak için üçüncül ve acil durum kontrollerine önemli ölçüde ihtiyaç duyulur. Bu tür önlemler alınmazsa, generatörler devre dışı kalarak zincirleme arızalara ve geniş alanlı elektrik kesintilerine yol açabilir. Üçüncül kontrol; olası tıkanıklıkları yönetmek, ikincil kontrol rezervini geri kazanmak ve ikincil kontrol rezervi yetersiz olduğunda frekansı ve bağlantı hattı gücünü sabit değerlerine geri döndürmek için uygulanır. Bu hizmet, genellikle gücün bağlanması veya kesilmesi, frekans kontrolüne katılan ünitelerden çıkışın yeniden konumlandırılması ve yük/talep tarafı düzenlemesi ile manuel frekans kontrolü olarak adlandırılır (Kerdphol et al., 2021).



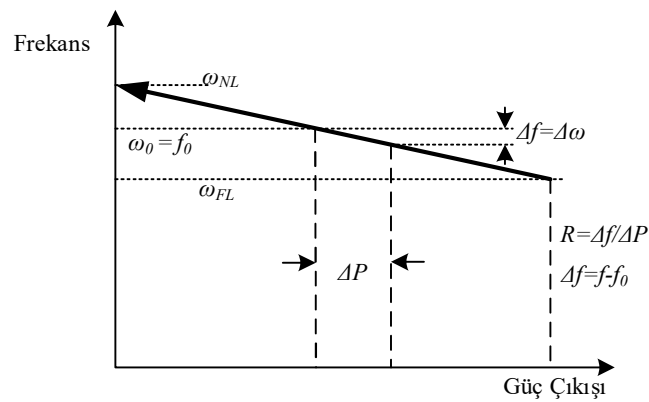
Şekil 3.2. Geleneksel güç sistemlerinde frekans dinamik kontrolünün zaman ölçeği

3.1. Birincil (Primer) Frekans Kontrol

Birincil frekans kontrolü, yük ve üretim arasındaki dengeyi hızla yeniden sağlamak ve frekans değişimlerine karşı koymak için üretim ünitelerinin aktif güç üretimini ve kontrol edilebilir yüklerin tüketimini, ayarlayan yerel otomatik bir kontroldür (Ingleson and Allen, 2010; Kundur, 1994). Özellikle, büyük üretim veya yük kesintilerinin ardından frekansı stabilize etmek için tasarlanmıştır. Bu nedenle, güç sisteminin kararlılığı için vazgeçilmezdir. Senkron bölgede bulunan ve hız regülatörü ile donatılmış tüm generatörler bu kontrolü otomatik olarak gerçekleştirir. Birincil kontrolün sağlanması bazı kısıtlamalara tabidir. Frekans düşüşüne yanıt olarak çıkışlarını artıran bazı üretim üniteleri, bu yanıt süresiz olarak sürdüremez. Bu nedenle, katkıları tükenmeden önce yerine konmalıdır (Rebours, Kirschen, Trotignon, and Rossignol, 2007).

Birincil frekans kontrolü, frekans bozulmasından sonraki ilk tepki katmanıdır. Büyük Britanya'da frekans tipik olarak $\pm 0,015$ Hz olarak ayarlanan bir ölü bandın ötesine saptığında, senkron generatörlerin hız regülatörleri tarafından otomatik olarak tetiklenir. Tepkinin 10 saniye içinde tam çıkışa ulaşması ve 30 saniyeye kadar sürdürülmesi gerekmektedir. Avrupa'da, tepki teslim süresi tipik olarak $\pm 0,02$ Hz ölü bant ile 0-30 saniye iken, Kuzey Amerika'da genellikle $\pm 0,017$ - $0,036$ Hz ölü bantlarla 0-16 saniye olarak ayarlanır. Daha önce vurgulandığı gibi, birincil tepkinin amacı, ilk frekans sapmasını kontrol altına almak ve onu yarı kararlı bir değerde stabilize ederek, yük atılmasını veya generatörün devre dışı kalmasını tetikleyebilecek daha fazla düşüşü veya yükselişi önlemektir (Han, 2025).

Birincil tepki tipik olarak Şekil 3.3'te gösterilen bir kontrol şeması ile gerçekleştirilir. Düşük frekans olayları sırasında, yani sistem talebi üretimden daha büyük olduğunda, bir generatörün güç çıkışı P , sistem frekansı f (dolayısıyla rotor hızı ω) azaldıkça artacaktır. Buna karşılık, generatör, sistem üretimi ve talebini yeniden dengelemek için yüksek frekans olayları sırasında aktif gücünü azaltacaktır. Çoklu generatör sistemlerinde, düşüş kontrolü orantılı yük paylaşımını sağlar, yani daha büyük kapasiteli generatörler yükün daha büyük bir payını alacaktır (Anderson and Fouad, 2003)[57]. Yeterli rezerv mevcutsa, katılan tüm generatörlerden gelen toplam çıkış değişikliği, sistemdeki aktif güç dengesizliğini telafi edecektir (Han, 2025).



Şekil 3.3 Governörün düşüş karakteristiği

3.2. İkincil (Sekonder) Frekans Kontrol

İkincil frekans kontrolü, bir dengesizliğin ardından frekansı ve diğer sistemlerle olan etkileşimleri hedef değerlerine geri döndürmek için üretim ünitelerinin aktif güç üretimini ayarlayan merkezi otomatik bir kontroldür (Jaleeli, VanSlyck, Ewart, Fink, and Hoffmann, 1992). Başka bir deyişle, birincil kontrol frekans sapmalarını sınırlarken ve durdururken, ikincil kontrol frekansı hedef değerine geri getirir. Avrupa elektrik iletim sistemi koordinasyon birliği içinde, ikincil frekans kontrolüne YFK denirken, Kuzey Amerika'da otomatik üretim kontrolü (Automatic Generation Control-AGC) terimi tercih edilir (Rebours et al., 2007).

İkincil frekans tepkisi, birincil kontrolün sistem frekansını yeni bir değerde stabilize etmesinden sonra çalışan ikinci frekans kontrol katmanını temsil eder. Yalnızca birincil

kontrol çalışıyorsa, sistem yükündeki bir değişiklik, regülatör düşüş ayarı ve yükün frekans duyarlılığı tarafından belirlenen kararlı durum frekans sapmasına neden olur. Frekans duyarlı modda çalışan tüm üretim üniteleri, yük değişiminin nerede meydana geldiğine bakmaksızın, toplam üretim değişikliğine katkıda bulunur. İkincil frekans kontrolünün temel amacı, şebeke frekansını nominal değerine geri döndürmek ve kontrollü alanlar arasında planlanmış güç alışverişini sürdürmektir. İkincil kontrol, seçilen üretim ünitelerinin yük referans ayar noktalarını, AGC aracılığıyla otomatik olarak veya operatörler tarafından manuel olarak ayarlayarak, kararlı durum frekans sapmasını ortadan kaldırır, böylece üretim nominal frekansta sistem yüküyle tam olarak eşleşir. Büyük Britanya’da, ikincil yanıtın 30 saniye içinde tam teslimata ulaşması ve 30 dakikaya kadar sürdürülmesi gerekmektedir. Büyük Britanya ve Avrupa arasında ikincil kontrol konusunda temel fark, Büyük Britanya’da AGC’nin uygulanmamasıdır. Büyük Britanya’da, ikincil yanıt sistem operatörü tarafından görevlendirilen sözleşmeli sağlayıcılar aracılığıyla, piyasa tabanlı tedarik ve planlanmış kontrol eylemlerine dayanarak sağlanır. Avrupa’da, ikincil yanıt, birkaç dakika içinde etkinleştirilen ve yaklaşık 15 dakika boyunca tam çıkışı koruyan AGC aracılığıyla frekans restorasyon rezervi olarak sağlanır. Amerika Birleşik Devletlerindeki Kuzey Amerika Elektrik Güvenilirlik Kurumu ikincil kontrolü dakikalar ölçeğinde dengeleme hizmetleri olarak tanımlar. Ancak hidroelektrik üretimi ve hızlı elektrik depolama gibi bazı kaynaklar daha hızlı yanıt verebilir. İkincil kontrolün bir diğer amacı, sistem frekansını ve bölgeler arasındaki planlanmış güç alışverişlerini geri yükleyecek şekilde, üretimdeki gerekli değişikliği üniteler arasında yeniden dağıtmaktır. Birincil frekans yanıtının aksine, ikincil yanıt sistem operatörü tarafından merkezi olarak koordine edilir ve iletişim altyapılarına dayanır. Yenilenebilir enerjinin artan payı, sistem dengelemesinde değişkenliği ve belirsizliği artırarak ikincil kontrolde daha sık AGC ayar noktası ayarlamalarına neden olur (Ela and O’Malley, 2012; Han, 2025).

3.3. Üçüncül (Tersiyer) Frekans Kontrol

Üçüncül kontrol, birincil ve ikincil frekans kontrolüne ek olarak ve onlardan daha yavaş bir şekilde gerçekleştirilir. Üçüncül kontrolün görevi, belirli bir güç sisteminin organizasyonel yapısına ve enerji santrallerinin bu yapıdaki rolüne bağlıdır. Dikey olarak entegre endüstri yapısında, sistem operatörü, şebeke kısıtlamalarına tabi olarak santrallerin

işletme maliyetini en aza indiren ekonomik dağıtım veya daha genel olarak optimal güç akışı temelinde bireysel enerji santrallerinin çalışma noktalarını belirler. Bu nedenle, üçüncül kontrol, genel talebin güç alışverişi programıyla birlikte karşılanmasını sağlayacak şekilde, bireysel üretim ünitelerindeki güç referans değerlerini optimal dağıtım tarafından hesaplanan değerlere ayarlar.

Dünyanın birçok yerinde, elektrik tedarik sistemleri serbestleştirilmiş ve özel mülkiyete ait enerji santralleri sistem operatörü tarafından doğrudan kontrol edilmemektedir. Ekonomik dağıtım daha sonra bir enerji piyasası aracılığıyla gerçekleştirilir. Mevcut piyasa yapısına bağlı olarak, enerji santralleri ya fiyatlarını merkezi bir havuza teklif eder ya da bireysel müşterilere elektrik sağlayan şirketlerle doğrudan ikili sözleşmeler düzenler. Sistem operatörünün temel görevi, şebeke kısıtlamalarının karşılanmasını sağlamak ve gerekli birincil ve ikincil rezerv miktarını bireysel enerji santrallerinden temin etmek için sunulan teklifleri veya sözleşmeleri ayarlamaktır. Bu tür bir piyasa yapısında, üçüncül kontrolün görevi, aşağıdakileri sağlamak için bireysel türbin regülatörlerinin ayar noktalarını manuel veya otomatik olarak ayarlamaktır:

- Birincil kontrolde yer alan ünitelerde yeterli dönen rezerv.
- İkincil kontrolde yer alan ünitelerin optimum dağıtımı.
- Belirli bir döngüde ikincil kontrolün bant genişliğinin geri kazanılması.

Üçüncül kontrol, bir alandaki bireysel ünitelerin yüklenmesini düzelten ikincil kontrole göre denetleyicidir. Üçüncül kontrol aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir:

- Bireysel ünitelerde üretilen gücün referans değerinin otomatik olarak değiştirilmesi.
- Üçüncül kontrolün rezervinde bulunan ünitelerin otomatik veya manuel olarak bağlanması veya bağlantısının kesilmesi.

Üçüncül kontrolün rezervi, bir talep yapıldıktan sonra on beş dakika içinde manuel veya otomatik olarak bağlanabilen ünitelerden oluşur. Rezerv, ikincil kontrolün bant genişliğinin geri kazanılacağı şekilde kullanılmalıdır (Machowski, Bialek, and Bumby, 2008).

4. KONTROL YÖNTEMLERİ

Bu bölümde havalimanı mikro şebeke sisteminde YFK işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılan kontrol yapıları açıklanmaktadır. YFK için literatürde en yaygın kullanılan 3 temel kontrol yapısı kullanılmıştır. Bunlar PID, TID ve FOPID kontrolör yapılarıdır. Bu kontrol yapılarının temel parametre değerlerinin belirlenmesi için KKO algoritması kullanılmış ve amaç fonksiyonu olarak IAE, ITAE, ISE ve ITSE performans indekslerinden yararlanılmıştır. Ayrıca klasik kontrol yapılarının sahip olduğu sabit parametre değerlerinin dinamik olarak ayarlanması için bulanık kontrol yapısı dahil edilmiştir. Bu bölümde bir HMS'nin YFK'sı için kullanılan bütün yapılar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. PID Kontrolör

PID kontrolörleri uzun zamandır endüstriyel kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. PID kontrolörlerinin kökeni 1890'lardaki regülatör tasarımına dayanmaktadır. 1989'da yapılan bir araştırmaya göre, proses endüstrilerinin %90'ında bunlar kullanılmaktadır. Bunun temel nedeni, çalışma kolaylığı, tasarım kolaylığı, düşük maliyet ve çoğu doğrusal sistem için etkili olmalarıdır (Bansal, Sharma, and Shreeraman, 2012; Stuart Bennett, 1993; K. S. Tang, Kim Fung Man, Guanrong Chen, and Kwong, 2001).

PID kontrol, adını üç terimin (oransal-integral-türevsel) baş harflerinin birleşiminden alır. Bu terimlerin her biri, giriş ve çıkış arasındaki hata değerine (E) bağlıdır. PID kontrolörüne ait denklem, Denklem 4.1'de verilmiştir.

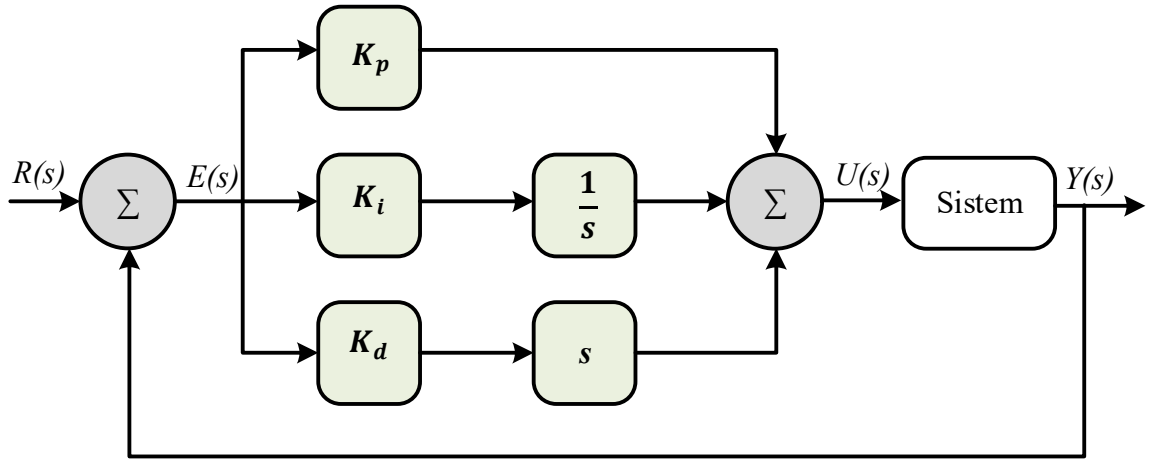
$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.1)$$

Burada K_p , K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türev parametreleridir. Bu terimler sistemin tepki türünü belirler. PID kontrolörde bu terimlerin etkileri şu şekilde açıklanabilir.

Oransal Terim: Kapalı döngü zaman sabiti oransal terimle birlikte azaldığı için tepkiyi hızlandırır, ancak çıkış girişe orantılı olduğundan sistemin derecesini değiştirmez. Oransal terim, kararlı durum hatasını veya sapmayı en aza indirir ancak ortadan kaldırmaz.

İntegral Terim: Bu terim, sistemin türünü ve derecesini 1 artırarak sapmayı ortadan kaldırır. Ayrıca sistemin tepki hızını artırır ancak sürekli salınımlar söz konusudur.

Türevsel Terim: Bu terim öncelikle sistemin salınımlı tepkisini azaltır. Ne sistemin türünü ve derecesini değiştirir ne de sapmayı etkiler. Bu terimlerin oransallık sabitlerindeki bir değişiklik, sistemin tepki türünü değiştirir. Bu nedenle, PID oransallık sabitlerindeki varyasyonu olan PID ayarı son derece önemlidir. Bir PID kontrolör şeması Şekil 4.1’de verilmiştir (Bansal et al., 2012; HEKİMOĞLU, 2019; Paz, 2001).

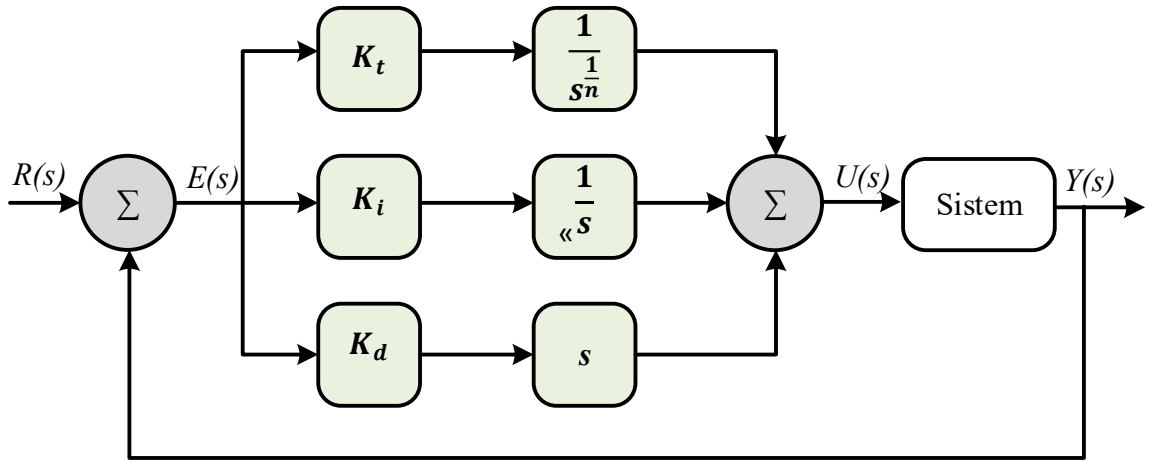


Şekil 4.1. PID kontrolörün yapısı

4.2. TID Kontrolör

TID kontrolör (Patent No. US-PATENT-APPL-SN-023253, 1994), kesirli dereceli hesaplamadan kaynaklanan bir tür kesirli dereceli kontrolördür. Kesirli mertebeli hesaplama, entegrasyon ve türev alma mertebelerinin mutlaka tam sayı olmadığı genelleştirilmiş bir klasik hesaplamadır. Kesirli mertebeli türevlerin izleri sistem kontrolünde bulunabilir (Topno and Chanana, 2015). PID’de kullanılan klasik oransal kazancın aksine, TID kontrolörü oransal terimde, genellikle eğim operatörü olarak adlandırılan ve matematiksel olarak $\frac{K_t}{s^a}E(s)$ şeklinde temsil edilen kesirli dereceli bir operatör kullanır. Bu da zaman alanında $K_t D^{-a}e(t)$ ’ye karşılık gelir. Burada K_t eğim

kazancı, $e(t)$ hata ve $a \in (0,1)$ eğim üssüdür. a değeri sistem kutuplarının matematiksel denklem düzleminin kararlı bölgesinde olmasını sağlamak için 0 ile 1 arasında seçilir. Parametre matematiksel denklemi, geleneksel PID kontrolörüne ek bir serbestlik derecesi getirerek düzenlemeyi, kararlılığı ve sağlamlığı artırır (Monje, Chen, Vinagre, Xue, and Feliu, 2010; Naorem, Das, and Roy, 2025). TID kontrol şemasının bir gösterimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. TID kontrol cihazının transfer fonksiyonu Denklem 4.2’de verilir (Andic, Turkey, and Ozturk, 2025; Maji et al., 2025; Znati, Ferfra, Bouaddi, and Chehaibi, 2025):



Şekil 4.2. TID kontrolörün yapısı

$$G_{TID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_t}{\frac{1}{s^n}} + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.2)$$

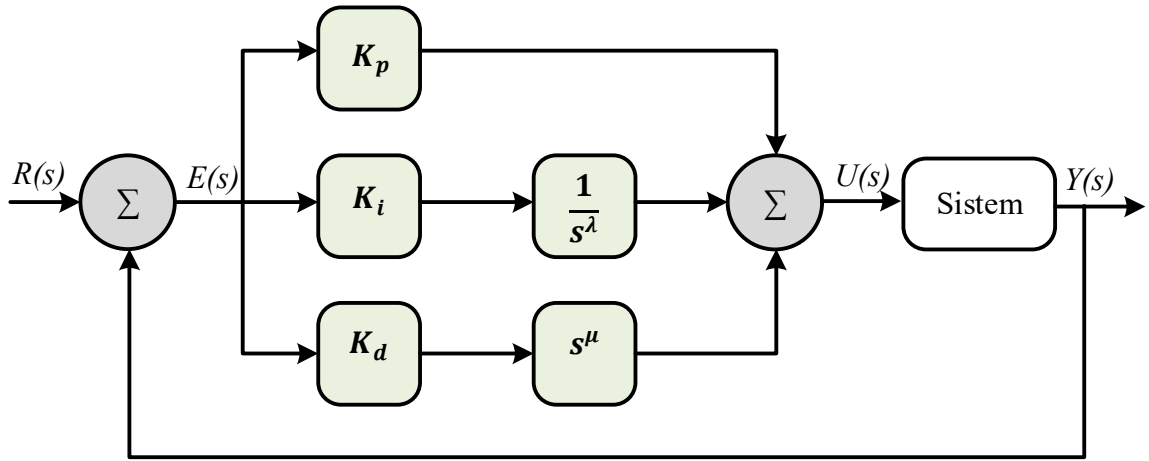
4.3. FOPID Kontrolör

FOPID kontrolü, kesirli mertebeli hesaplama teorisinin prensiplerine dayanan bir yöntemdir (Ma et al., 2025). Son yıllarda, FOPID'ler geleneksel PID kontrolörlerine kıyasla gelişmiş uyarlanabilirlikleri nedeniyle önemli bir ilgi görmüştür. PID kontrolörleri üç kontrol edilebilir parametreye (K_p , K_i , K_d) dayanırken, FOPID'ler iki ek parametre daha ekleyerek toplam parametre sayısını beşe çıkarır (K_p , K_i , K_d , λ , μ) (Abdelfattah, Aseeri, and Abd Elaziz, 2024; Naderipour et al., 2021). FOPID, standart PID kontrolörüne göre üç parametreye ek olarak iki parametreye daha sahip olduğu için sistemlerin dinamiklerine

daha fazla esneklik kazandırır. Bir FOPID kontrol cihazının transfer fonksiyonu Denklem 4.3'te verilmiştir (Kumar, Tyagi, and Kumar, 2017; ÖZTÜRK, YILDIRIM, and DOĞAN, 2022):

$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (4.3)$$

Burada K_p , K_i , K_d , kontrolörün oransal, integral ve türevsel kazançlarıdır; λ ve μ ise sırasıyla integral ve diferansiyelin tam sayı olmayan dereceleridir. FOPID kontrolörünün yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir (Debbarma, Saikia, and Sinha, 2013; Sondhi and Hote, 2014).

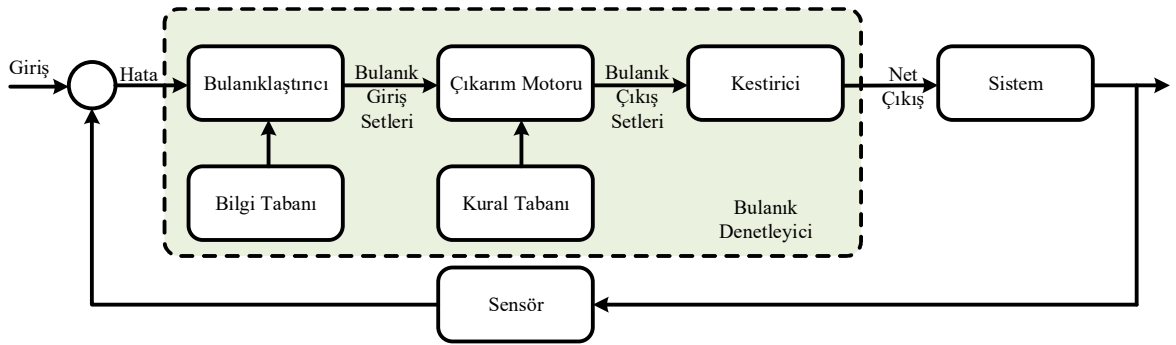


Şekil 4.3. FOPID kontrolörün yapısı

4.4. Bulanık Kontrol

Bulanık mantık, bilginin işleyişi ve temsiline belirsizlikle başa çıkmanın bir yolu olarak ortaya çıkmıştır (Carrillo-Perez et al., 2022; Zadeh, 1965). İkili değerler (doğru veya yanlış) üzerinde çalışan klasik mantığın aksine, bulanık mantık, 0 ile 1 arasında bir süreklilik üzerinde değerleri temsil eden doğruluk derecelerini içerir. Bu, elemanların bir üyelik fonksiyonu tarafından tanımlanan çeşitli derecelerde bir kümeye ait olabileceği bulanık küme teorisi ile mümkün kılınır. Bulanık kümeler, katı sınırlar uygulamak yerine, üyelik durumları arasında kademeli bir geçişe izin verir ve bu da onları kesin olmayan verilere sahip karmaşık sistemlerin modellenmesi için özellikle uygun hale getirir (Stavrinidis, Zacharia, and Xidias, 2025).

Bulanık mantık fikri, 1965 yılında Kaliforniya Üniversitesi Berkeley'den Profesör L. A. Zadeh tarafından bulunmuştur (Zadeh, 1965). Bu fikir, Londra Üniversitesi'nde profesör olan Dr. E. H. Mamdani'nin 1974 yılında otomatik bir buhar motorunu kontrol etmek için bulanık mantığı pratik bir uygulamada kullanmasına kadar pek tanınmadı (Mamdani and Assilian, 1975). Daha sonra, 1976 yılında Danimarka'daki Blue Circle Cement ve SIRA, çimento fırınlarını kontrol etmek için endüstriyel bir uygulama geliştirdi (Holmblad and Ostergaard, 1981). Bu sistem 1982 yılında faaliyete geçti. 1980'lerden bu yana, endüstriyel üretim, otomatik kontrol, otomobil üretimi, bankalar, hastaneler, kütüphaneler ve akademik eğitim dahil olmak üzere giderek daha fazla bulanık uygulama rapor edildi. Bulanık mantık teknikleri, günümüz toplumunun her alanında yaygın olarak uygulanmaktadır (Bai and Wang, n.d.).



Şekil 4.4. Fuzzy kontrol yapısı

Bulanık mantık sistemlerinin genel yapısı dört temel bileşenden oluşur: bulanıklaştırıcı (fuzzifier), kural tabanı ve bilgi tabanı (üyelik fonksiyonları dâhil), çıkarım motoru (inference engine) ve kesinleştirici (defuzzifier). Bu bileşenler birlikte çalışarak giriş verilerini değerlendirir, bulanık kuralları uygular ve sistemin nihai çıktısını üretir. Şekil 4.3'te söz konusu yapının blok diyagramı gösterilmektedir. Sisteme uygulanan giriş değeri — örneğin bir sensörden elde edilen hata sinyali — ilk olarak bulanıklaştırma aşamasında değerlendirilir ve uygun üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık kümelerle dönüştürülür. Ardından bu bulanıklaştırılmış veriler, denetleyici içerisinde bulunan bilgi tabanı ve kural tabanı yardımıyla çıkarım motoruna aktarılır. Çıkarım motoru, tanımlanan bulanık mantık kurallarını kullanarak girişlere karşılık gelen bulanık çıkış kümesini oluşturur. Elde edilen bulanık çıkışlar daha sonra kesinleştirme aşamasından geçirilerek tek bir kesin sayısal

değere çevrilir. Böylece sistem, insan uzmanların karar verme yaklaşımına benzer şekilde giriş bilgilerini yorumlayıp uygun kontrol sinyali üretir. Bulanık kontrol yapısında bilgi tabanı; sisteme ait uzman bilgisini, parametreleri ve üyelik fonksiyonlarını içerirken, kural tabanı ise genellikle “Eğer ... ise ...” biçiminde ifade edilen bulanık mantık kurallarından meydana gelir (Yıldız, 2025).

4.5. Kontrolörlerin Modellenmesi

Bu tez çalışmasında önerilen havalimanı mikro şebeke için sekonder YFK sisteminde kontrolör yapısı olarak PID, TID ve FOPID kontrol yapıları kullanılmıştır. Bu temel kontrol yapılarının kontrolör parametre değerlerini ayarlamak için KKO optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon algoritmasında amaç fonksiyonu olarak IAE, ITAE, ISE ve ITSE performans ölçütleri kullanılmıştır. Havalimanı mikro şebeke sistemi çok sayıda doğrusal olmayan eleman içerdiğinden, sabit kazançlarla çalışan klasik kontrolörlerin yalnızca hata sinyaline dayalı yapısı bu tür karmaşık sistemlerde yeterli performansı sağlamakta başarısız olabilmektedir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, sabit kazançlar yerine zamanla değişebilen (dinamik) kazanç yapıları kullanılabilir. Bu doğrultuda, başlangıç parametreleri belirlenmiş klasik PID, TID ve FOPID kontrolörlerin dinamik davranışlarını geliştirmek için bulanık mantık tabanlı bir kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Böylece, bulanık kontrol sistemi klasik kontrolör parametrelerini anlık olarak ayarlayarak sistem performansının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu bölüme ait detaylar aşağıda açıklanmıştır.

4.5.1. Performans Endeksleri ve Amaç Fonksiyonu

Güç ve mikro şebeke sistemlerinde kullanılan kontrolör yapılarının tasarım aşamalarında ve performanslarının değerlendirilmesinde belirli indeksler kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan performans indeksleri IAE, ITAE, ISE ve ITSE indeksleridir. Bu indeksler, sistemde kontrol edilen değişkenin zamana göre farklı kombinasyonlarına göre elde edilir. Bu indekslere ait denklemler sırasıyla Denklem 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de verilmiştir (Kılıç and Özdemir, 2019).

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (4.4)$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt \quad (4.5)$$

$$ITSE = \int_0^T t \cdot e^2(t)dt \quad (4.6)$$

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |e(t)|dt \quad (4.7)$$

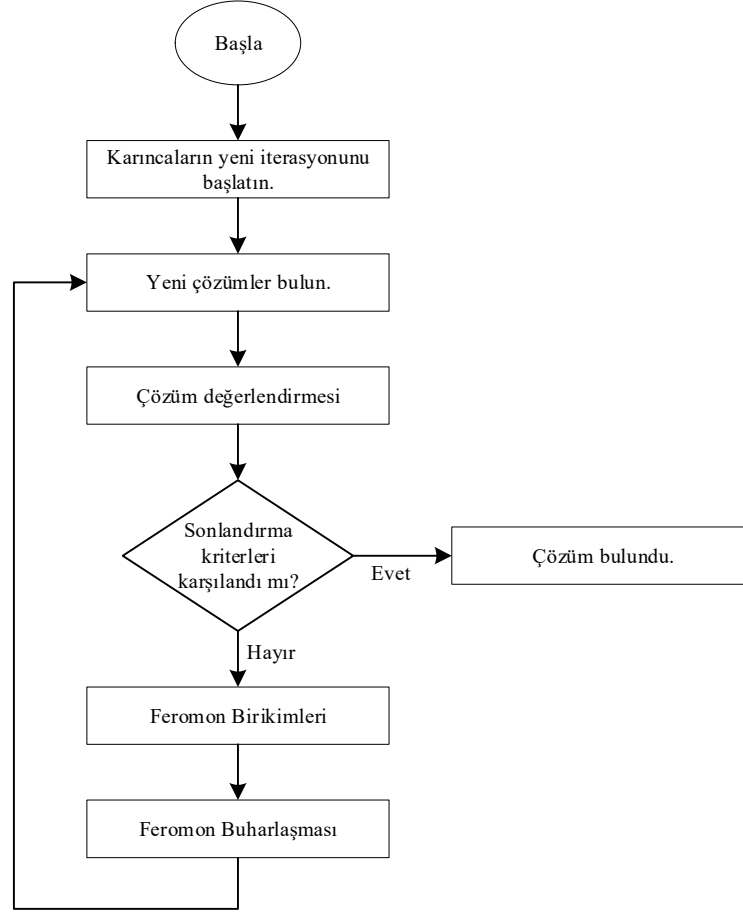
Bu fonksiyonlar, sistemde zamanla meydana gelen hatanın seviyesini temsil eder. Optimizasyon sürecinde bu değerlerin minimize edilmesi, kontrolör parametrelerinin hatayı en aza indirecek şekilde ayarlanması anlamına gelir. Bu nedenle, uygun bir amaç fonksiyonunun seçimi kontrolör ayarları açısından kritik bir rol oynar. Bu tez çalışmasında amaç fonksiyonu IAE, ITAE, ISE ve ITSE indeksleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan amaç fonksiyonu Denklem 4.8’de verilmiştir.

$$J = 10xIAE + 1000xISE + 1000xITSE + ITAE \quad (4.8)$$

4.5.2. Karınca Koloni Optimizasyon (KKO) Algoritması

Bu hızlı ve basit sezgisel optimizasyon algoritması ilk olarak 1992 yılında Dorigo tarafından sunulmuştur. KKO, karıncaların yiyecek ararken sergiledikleri davranışlardan esinlenmiştir. Her bir karınca yürürken yola feromon adı verilen bir kimyasal bırakır. Karıncalar yoldaki feromon yoğunluğuna göre yön tercihi yaptıklarından bir süre sonra yiyecek ile karınca yuvası arasındaki en kısa yol karıncalar tarafından belirlenmiş olur (Colson, Nehrir, and Wang, 2009; Dorigo, Maniezzo, and Colorni, 1996; Esmat, Magdy, ElKhattam, and ElBakly, 2013). Ayırık bir optimizasyon probleminin optimal çözümünü bulma süreci, KKO parametrelerinin başlatılmasıyla başlar. Daha sonra, belirli bir karınca için olasılık dağılımına dayalı olarak eksiksiz bir yol bulunmalıdır. Ardından, feromon miktarının yerel olarak güncellenmesi uygulanır. Tüm karıncalar tüm düğümleri ziyaret ettiğinde, optimal yol uzunluğu değerlendirilir ve feromon güncellenir. Optimal koşula ulaşıldığında süreç tamamlanır (Raya-Armenta et al., 2021; Yun, Jeong, and Kim, 2013).

Şekil 4.5., KKO algoritmasının akış şemasını göstermektedir (YILDIRIM, OZDEMIR, and EKE, 2019) .

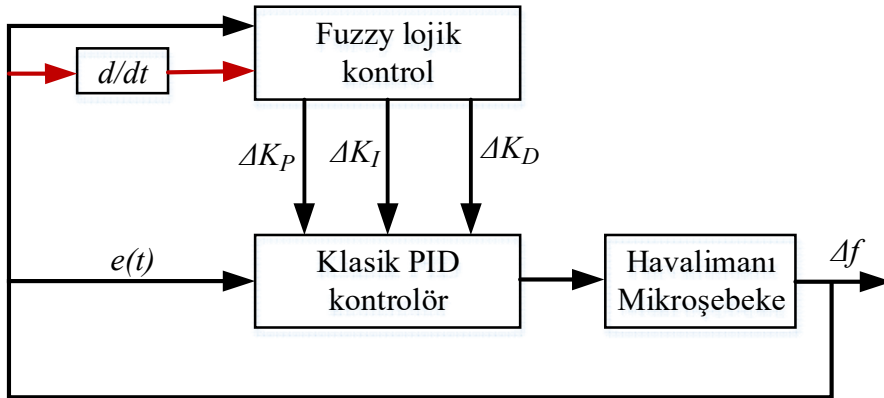


Şekil 4.5. KKO Algoritmasının genel yapısı

4.5.3. Klasik ve Fuzzy Kontrolör Yapıları

Kural tabanlı bulanık küme yaklaşımı, sistem tasarımında daha esnek bir yapı sunarken gözlemlerin kolay anlaşılabilir dilsel ifadelerle temsil edilmesine de imkân tanır. Özellikle giriş ve çıkışları arasında doğrusal bir ilişki bulunmayan sistemlerde, bulanık mantık tabanlı kapalı çevrim kontrol yöntemleri, kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Buna karşılık, klasik kontrolörler; sabit kazanç değerleri kullanarak hata sinyaliyle dayalı bir çalışma prensibi benimser. Bu durum, doğrusal olmayan ve karmaşık yapıya sahip sistemlerde istenen performansın elde edilmesini zorlaştırır.

Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, sabit kazançlar yerine değişken (dinamik) kazançların kullanılması önerilebilir. Klasik kontrol yapısındaki sabit kazançların dinamik biçimde güncellenmesi, sistem performansını artırarak yük değişimleri ve dış bozucular karşısında çıkışın daha hızlı kararlı hale gelmesini sağlar. Bu doğrultuda, bu çalışmada klasik PID, TID ve FOPID denetleyici ile bulanık mantık yapısının entegre edildiği bir yaklaşım sunulmuştur. Bulanık PID, Bulanık TID ve Bulanık FOPID olarak adlandırılan bu yapılar, klasik PID, klasik TID ve klasik FOPID kontrolör ile kural tabanlı bulanık denetimin birleşiminden oluşmaktadır. Bu yöntemde, bulanık mantık denetleyicisi, sistem hatası ve hata türevi bilgilerini kullanarak klasik PID için P, I ve D terimlerine ait ölçekleme katsayılarını belirleyecek şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen bu katsayılar sayesinde kontrolör kazançları her örnekleme anında güncellenir. Tipik bir Bulanık PID kontrol yapısının genel çerçevesi Şekil 4.6.'da sunulmaktadır. Benzer çalışma mantığı TID ve FOPID kontrol yapıları içinde uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Bulanık PID kontrolörün blok diyagramı

Önerilen denetim yapısında bulanık mantık denetleyicisi, sistem hatası ve hatanın değişim hızını giriş olarak alır. Bu bilgiler doğrultusunda, PID kontrolör örneği için, oransal, integral ve türev bileşenlerine ait ölçekleme katsayıları belirlenir. Elde edilen katsayılar, klasik PID denetleyicisinin kazanç parametrelerini güncellemek amacıyla kullanılır. Bu nedenle, PID denetleyicisine ait K_P , K_I ve K_D nihai kazanç değerleri aşağıda verilen ifadeler yardımıyla hesaplanmaktadır.

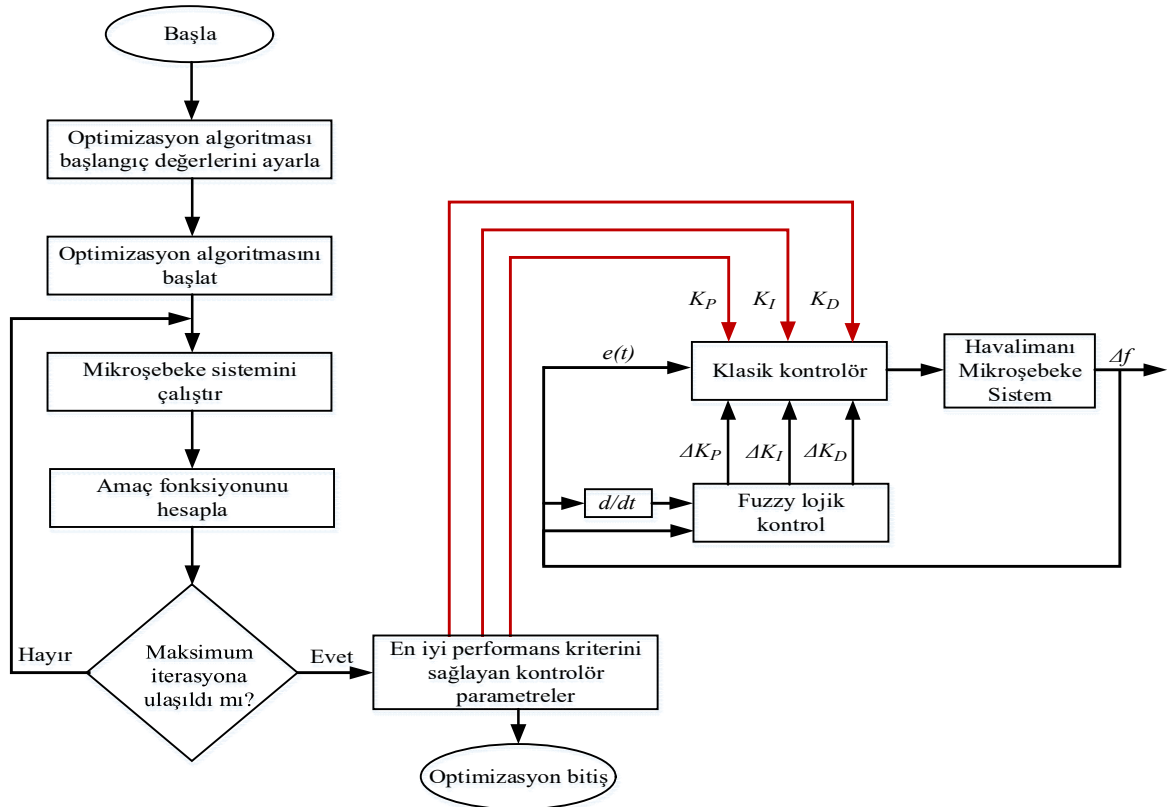
$$k_p = K_p + \Delta K_p$$

$$k_I = K_I + \Delta K_I$$

$$k_D = K_D + \Delta K_D$$

Burada K_p , K_I ve K_D klasik PID kontrolörün başlangıç değerleridir. ΔK_p , ΔK_I ve ΔK_D ise fuzzy lojik kontrol tarafından hesaplanan ölçeklendirme faktörleridir (Al-Dhaifallah, Kanagaraj, and Nisar, 2018; DOĞAN, 2022). Yukarıda PID kontrolör örneği ile açıklanan süreçler TID ve FOPID kontrolör yapıları için de geçerlidir.

Şekil 4.7’de havalimanı mikro şebeke sistemi için kullanılan kontrolörlerin parametre değerlerinin optimizasyon algoritmaları ile belirlenmesi ve dinamik olarak parametre değerlerinin fuzzy lojik kontrolör ile değiştirilmesine ilişkin süreç akış diyagramı gösterilmiştir. Şekilde örnek olarak PID kontrol yapısı için gerçekleşen süreçlere ait parametre sembolleri kullanılmıştır. Aynı süreçler ayrıca TID ve FOPID kontrol yapıları içinde geçerlidir.

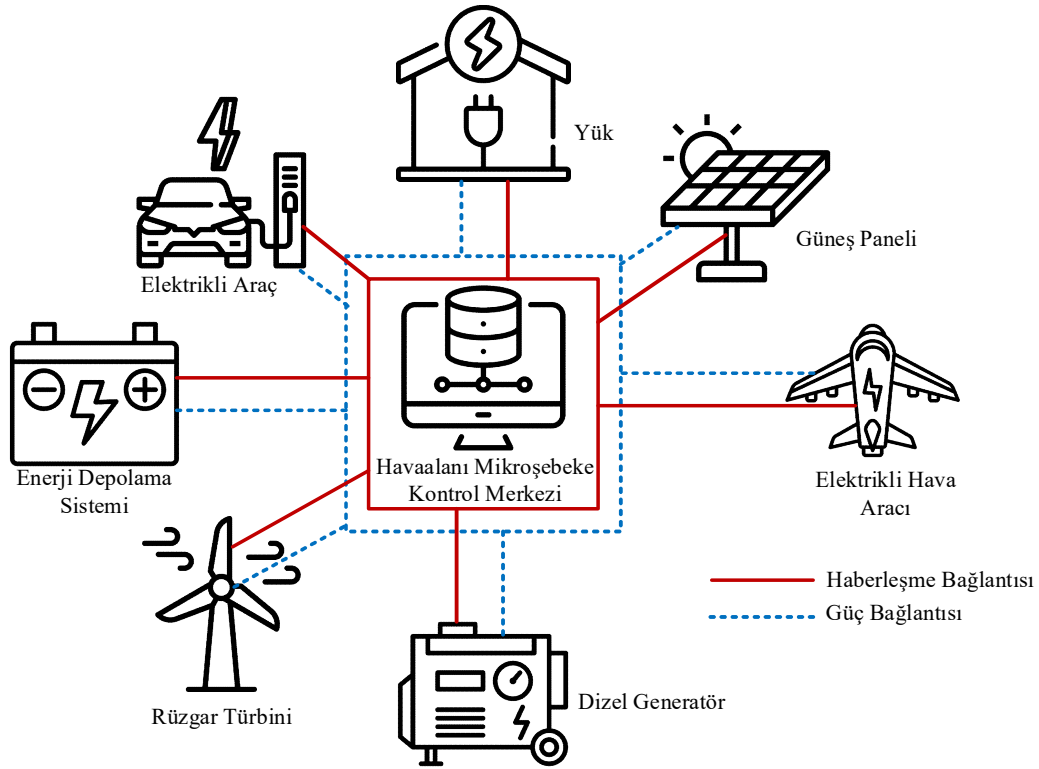


Şekil 4.7. HMS sistemi kontrol süreç diyagramı

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

5.1. Havalimanı Mikro Şebeke (HMS) Sistemi

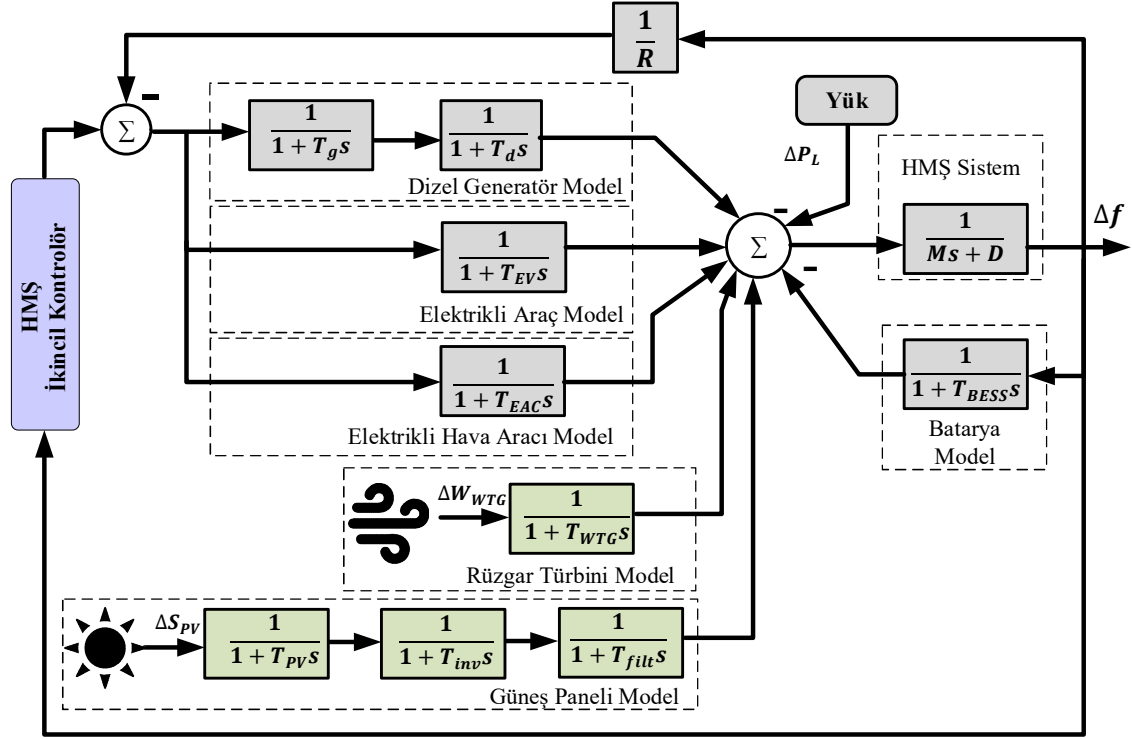
Bu tez çalışmasında incelenilen HMS'nin şematik gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu mikro şebeke, uygun güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla uygun baralara bağlanan WTG, PV, DG, BESS, EV ve EAC gibi çeşitli üretim kaynaklarından ve yük ünitelerinden oluşmaktadır. HMS'nin tüm farklı ünitelerinin kontrolü, HMS kontrol merkezi tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu merkezin ana görevi, farklı çalışma koşulları altında tesisteki üniteleri kontrol etmek ve komut vermektir.



Şekil 5.1. HMS mimarisi

İzole edilmiş bir HMS'nin matematiksel modeli ile dinamik tepki modeli Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Önerilen model, sevk edilemeyen üniteler olarak bir WTG, bir PV dizisi ve bir BESS ünitesi ile sevk edilebilir üniteler olarak geleneksel bir DG, bir EAC modeli ve

EV modelini içermektedir. Sevk edilebilir üniteler, merkezi bir kontrolör tarafından kontrol edilen ve YFK'ya katılan ünitelerdir. HMS'yi meydana getiren her birimin matematiksel modeli aşağıda açıklanmıştır (Shayeghi et al., 2024).



Şekil 5.2. HMS'nin YFK'sı için dinamik modeli

5.1.1. Dizel Generatör (DG) Modeli

DG'ler hızlı tepki ve düşük bakım özelliklerine sahiptir. DG'ler, YEK'lerin gücündeki değişikliklerle karşılaştıklarında çıkış gücünü düzenlemek için yakıt tüketimini ayarlarlar. Generatör ve governor elemanlarının dinamikleri dikkate alındığında, DG ünitesi Denklem 5.1'de verilen transfer fonksiyonu ile temsil edilmektedir (Haydaroğlu, 2025; B. Yildirim, Gheisarnejad, and Khooban, 2021; Burak Yildirim, 2020).

$$G_{DG} = \left(\frac{1}{1+T_{ds}} \right) \left(\frac{1}{1+T_g s} \right) \quad (5.1)$$

Burada T_g ve T_d sırasıyla governor ve generatörün zaman sabitlerini ifade etmektedir.

5.1.2. Elektrikli Araç (EV) Modeli

Son zamanlarda, dizel araçların yerini alan EV'lerin sayısında dikkat çekici bir artış görülmektedir. Bu değişim büyük ölçüde dizel araçların neden olduğu çevresel zararlardan kaynaklanmaktadır. Mikro şebekelerde, EV'lerin şarj ve deşarjı, özellikle YFK için önemlidir. Havalimanında park eden EV'ler bir enerji depolama elemanı olarak ayarlanır. EV'nin matematiksel modeli birinci derece transfer fonksiyonu olarak Denklem 5.2'de verilmiştir (Haydaroğlu, 2025; S. Singh, Singh, Mathur, et al., 2025).

$$G_{EV} = \left(\frac{1}{1+T_{EV}s} \right) \quad (5.2)$$

Burada EV için zaman sabiti T_{EV} olarak gösterilmiştir.

5.1.3. Elektrikli Hava Aracı (EAC) Modeli

Önerilen HMŞ sisteminde uygun EAC'ler bir enerji depolama elemanı olarak ayarlanır. EAC'nin modeli birinci derece transfer fonksiyonu olarak Denklem 5.3'te verilmiştir (S. Singh, Singh, Mathur, et al., 2025).

$$G_{EAC} = \left(\frac{1}{1+T_{EAC}s} \right) \quad (5.3)$$

Burada EAC için zaman sabiti T_{EAC} olarak gösterilmiştir.

5.1.4. Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) Modeli

BESS ünitesi, HMŞ sistemlerinde kritik yüklerin anlık enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmıştır. BESS cihazının geçici tepkisiyle oluşturulan transfer fonksiyonu, Denklem 5.4'te verilmiştir [31,44].

$$G_{BESS} = \frac{1}{1+T_{BESS}s} \quad (5.4)$$

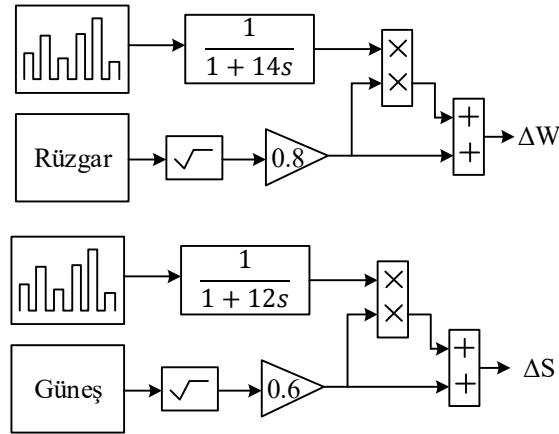
Burada T_{BESS} , BESS'in zaman sabitini temsil eder.

5.1.5. Rüzgar Türbini (WTG) Modeli

WTG sistemi, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. WTG sisteminin dinamik davranışı ise birinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile modellenebilir (Denklem 5.5). Şekil 5.3, WTG bileşenini içeren YEK sisteminin giriş miktarlarını göstermektedir. Bu şekil, rüzgar türbini sistemi için rüzgar üretimini göstermektedir (Haydaroğlu, 2025; S. Singh, Singh, Mathur, et al., 2025).

$$G_{WTG} = \frac{1}{1+T_{WTG}s} \quad (5.5)$$

Burada T_{WTG} sistemin zaman sabitini temsil etmektedir (Yıldız, 2025).



Şekil 5.3. YEK'ler için gürültü tabanlı matematiksel ve dinamik model

5.1.6. Fotovoltaik (PV) Panel Modeli

PV ünitesi, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren panel dizilerinden oluşmaktadır. PV panel, invertör ve bağlantı elemanlarının dinamikleri göz önünde bulundurulduğunda, PV sistemleri Denklem 5.6'da verilen transfer fonksiyonu ile temsil edilmektedir (Yıldız, 2025)

$$G_{PV} = \left(\frac{1}{1+T_{PV}s} \right) \left(\frac{1}{1+T_{inv}s} \right) \left(\frac{1}{1+T_{I/C}s} \right) \quad (5.6)$$

Burada, T_{PV} , T_{inv} ve $T_{I/C}$ sırasıyla PV panelin, inverterin ve bağlantı cihazının zaman sabitlerini ifade etmektedir. Şekil 5.3, PV bileşenini içeren YEK sisteminin giriş miktarlarını göstermektedir. Bu şekil, PV sistemi için radyasyon üretimini göstermektedir (Haydaroglu, 2025; S. Singh, Singh, Mathur, et al., 2025)

5.1.7. Sistem Dinamik Modeli

HMŞ için net güç değişimi Denklem 5.7 ile verilebilir. Denklemden gösterilen P_{PV} , P_{WTG} , P_{DG} , P_{EV} , P_{EAC} , P_{BESS} , ve P_L , sırasıyla PV, WTG, DG, EV, EAC, BESS ve yüklerin gücünü temsil etmektedir (Yıldız, Gunduz, Yildirim, and Özdemir, 2023).

$$\Delta P_e = P_{WTG} + P_{PV} + P_{DG} + P_{EV} + P_{AC} - P_L - P_{BESS} \quad (5.7)$$

Tüm HMŞ sisteminin eşdeğer generatör dinamik modeli Denklem 5.8’de verilmiştir.

$$\frac{\Delta f}{\Delta P_e} = \frac{1}{D+sM} \quad (5.8)$$

Burada M ifadesi eşdeğer atalet sabitini, D ise sönümlenme sabitini ifade etmektedir.

HMŞ sistemini oluşturan ünitelerin dinamik modellerine ait parametre değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. HMŞ ünitelerine ait parametre değerleri.

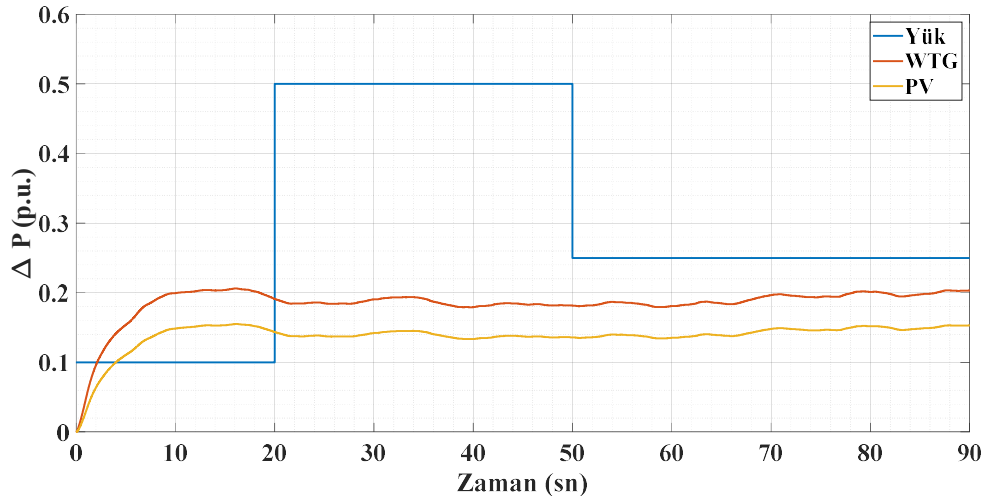
Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
T_d	0,1	T_{PV}	1,8
T_g	0,08	$T_{I/C}$	0,004
T_{EV}	0,1	T_{inv}	0,04
T_{EAC}	1	M	0,2
T_{BESS}	0,1	D	0,012
T_{WTG}	1,5	R	3

HMṠ sisteminde DG, EAC ve EV üniteleri sekonder YFK'ya katılan üniteleri oluşturmaktadır. Bu üniteler, merkezi bir kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Bu tez çalışmasında HMṠ'nin sekonder YFK sisteminde kontrolör yapısı olarak PID, TID ve FOPID kontrol yapıları kullanılmıştır. Bu temel kontrol yapılarının kontrolör parametre değerlerini ayarlamak için KKO algoritması kullanılmıştır. HMṠ yapısında birçok doğrusal olmayan bileşen bulunmaktadır. Klasik kontrolörler; sabit kazanç değerlerini kullanarak hata sinyaline dayalı bir çalışma prensibi benimsedikleri için, doğrusal olmayan ve karmaşık yapıya sahip sistemlerde istenen performansı sergileyemezler. Bu zorluğun üstesinden gelmek için sabit kazançlar yerine değişken (dinamik) kazançlar kullanılabilir. Bu nedenle, temel kontrol parametre değerleri belirlenen klasik PID, TID ve FOPID kontrolör yapılarının dinamik yanıtlarını iyileştirmek için bulanık kontrol yapısı kontrol sisteminde klasik kontrolörlerin parametrelerini dinamik olarak ayarlamak için kullanılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen HMŞ modeli için benzetim sonuçları, farklı çalışma senaryoları altında elde edilmiştir. Oluşturulan senaryolarda, her bir kontrolör yapısı ile bunların bulanık mantık tabanlı kontrolör yapıları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan senaryolar şunlardır:

Senaryo 1’de, YEK’lere dayalı üretim ile yük talebi normal olarak düşünülmüştür. Bu senaryo için; WTG, PV ve yüke bağlı üretilen ve tüketilen güç miktarları Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. PV, WTG ve yük güç değişimi

Senaryo 2’de; YEK’lere dayalı üretimin yüksek, yük talebinin ise normal olduğu bir senaryo oluşturulmuştur. Bu amaçla Şekil 6.1’de verilen WTG ve PV güç değişimleri sırasıyla 2 ve 1.75 katsayılarıyla çarpılırken yük değişimi aynı alınmıştır.

Senaryo 3'te; YEK'lere dayalı üretimin düşük, yük talebinin ise yüksek olduğu bir senaryo oluşturulmuştur. Bu amaçla Şekil 6.1'de verilen WTG ve PV güç değişimleri 0.5 katsayısıyla çarpılırken yük değişimi 1.5 ile çarpılmıştır.

İncelenen HMS'deki sistem parametre değişimlerine karşı PID, TID ve FOPID kontrolör yapılarının dayanma kapasitesini değerlendirmek için dördüncü bir senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoda; PV, WTG ve yükün güç değişimleri senaryo 1 ile aynı alınmıştır. HMS'nin değişen parametre değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Senaryo 4 için kullanılan yeni parametre değerleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
T_d	0,05	T_{BESS}	0,075
T_g	0,12	M	0,25
T_{EV}	0,05	D	0,008
T_{EAC}	0,75	R	4

Benzetim çalışmalarında kullanılan üç temel kontrolör yapısına ait parametre değerleri ise Tablo 6.2'de verilmiştir.

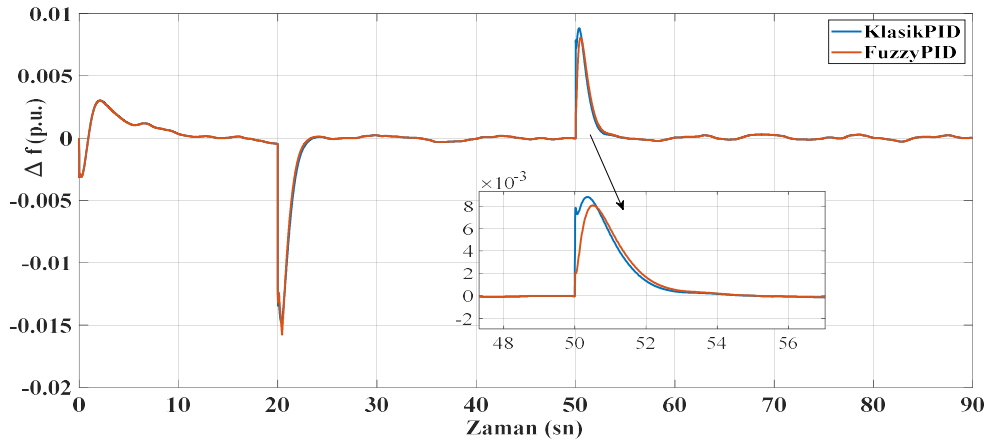
Tablo 6.2. Benzetim sonuçlarında kullanılan kontrolör parametre değerleri

Parametre	PID	TID	FOPID
K_p	8,18181818	-	9,49494949
K_i	7,37373737	8,08080808	9,39393939
K_d	2,27272727	3,73737374	1,16161616
K_t	-	8,78787879	-
n	-	2	-
λ	-	-	1,27272727
μ	-	-	0,98181818

6.1. PID Kontrolör için Analiz Sonuçları

6.1.1. Birinci Senaryo

Şekil 6.2’de; Senaryo 1 için YFK’da kullanılan hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör yapılarına ait elde edilen frekans değişimleri gösterilmiştir. Senaryo 1 için HMŞ modelinde YEK’lere bağlı üretimin ve yükün normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Şekil 6.2 incelendiğinde, hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolörler için HMŞ’nin kararlılığını koruduğu görülecektir. Şekilde verilen yakın görüntüden görüleceği üzere fuzzy PID kontrolörün kullanıldığı durumdaki frekans yanıtının tepe değerinin klasik PID kontrolörün kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, fuzzy PID kontrolör yapısının klasik PID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik yanıtında bir iyileşme sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.2. Senaryo 1 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

HMŞ güç sisteminde Senaryo 1 için YFK’da klasik PID ve fuzzy PID kontrolör yapılarının kullanılması durumunda frekans yanıtlarına ait elde edilen performans indeks değerleri Tablo 6.3’te gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere klasik PID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0542411 olarak elde edilirken fuzzy PID kontrolör kullanılması durumunda ise 0,0527536 olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle fuzzy PID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değerinde sistemde %2,74 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. Benzer şekilde ITAE performans

indeks değerleri incelendiğinde, fuzzy PID kontrolör yapısının klasik PID kontrolörü göre %2,62'lik bir iyileşme sağladığı görülecektir.

Tablo 6.3. Senaryo 1 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

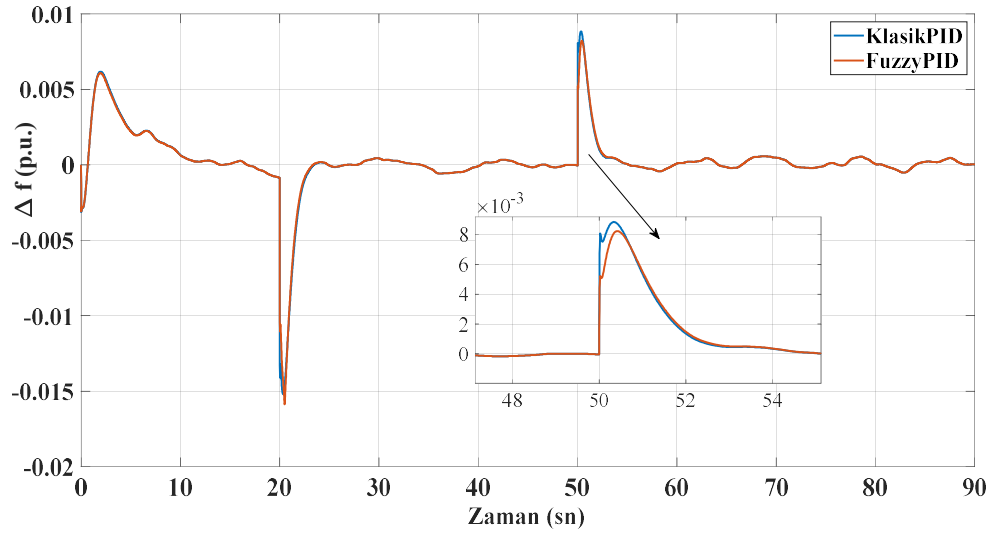
Kontrolör	Klasik PID	Fuzzy PID
IAE	0,054241114532290	0,052753603037073
ISE	2,998269362235590e-04	2,808894012550183e-04
ITAE	1,482532111361316	1,443758166245081
ITSE	0,007819318206338	0,007134481724970

Senaryo 1 şartlarında HMS sistemin YFK yapısında, klasik PID ile fuzzy PID kontrolörlerin kullandığı durumlar için elde edilen ISE hata performans indeks değerleri sırasıyla $2,998269 \times 10^{-4}$ ve $2,808894 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere fuzzy PID kontrolörün ikincil YFK yapısında kullanılması sonucunda ISE performans indeks değerinde %6,32 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Benzer şekilde klasik PID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ITSE değeri 0,0078193 olarak elde edilirken fuzzy PID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ise indeks değeri 0,0071345 olarak elde edilmiştir. Bu düşüş oransal olarak yaklaşık %8,76 değerine karşılık gelmektedir. Elde edilen değerlerden de görüldüğü üzere HMS güç sisteminde klasik PID kontrolör yapısı yerine bulanık mantık içeren PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, dört ayrı performans indeksinde de azalma sağlanmıştır. ISE ve ITSE performans indeks değerleri büyük hata değerlerine daha duyarlıdır. Senaryo 1 için elde edilen ISE ve ITSE performans indeks değerlerine göre, fuzzy PID kontrolörün özellikle büyük genlikli geçici rejim hatalarını klasik PID kontrolöre göre daha etkili biçimde sönümlendirdiği söylenebilir.

Senaryo 1 işletme şartlarına ait sonuçlar bütüncül olarak incelendiği zaman, hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör yapılarının sistem frekans kararlılığını genel olarak korudukları görülmüştür. Ancak fuzzy yapısının, kontrolör parametre değerlerini dinamik olarak ayarlaması sonucu, fuzzy PID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha düşük değerler elde edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak; Senaryo 1 işletme şartlarında önerilen HMS modeli için YFK yapısında, fuzzy PID kontrolörün klasik PID yerine kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

6.1.2. İkinci Senaryo

Senaryo 2 için klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının önerilen HMŞ için YFK'da kullanılması durumlarında elde edilen frekans değişimleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Senaryo 2'de, HMŞ'de YEK'lere bağlı üretimin fazla olduğu ve yük miktarının ise normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Bu senaryoda tasarlanan üretim miktarının ayarlanması için Senaryo 1'e ait WTG ve PV güç değişim değerleri sırasıyla 2 ve 1,75 katsayıları ile çarpılmıştır. Şekil 6.3'te Senaryo 2 için verilen frekans değişiminden görüleceği üzere hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolörler sistemin kararlılığını korumaktadır. Ayrıca şekilde verilen görüntü detayı incelendiği zaman fuzzy PID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda frekans değişiminin maksimum aşma değeri, klasik PID kontrolöre göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu yakın görüntü, fuzzy PID kontrolör yapısının klasik PID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik davranışında olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3. Senaryo 2 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Tablo 6.4'te Senaryo 2 için HMŞ güç sisteminin YFK yapısında klasik PID ve fuzzy PID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarında elde edilen performans indeks değerleri sunulmuştur. Tabloya göre, IAE performans indeksine ait değer klasik PID kontrolör kullanılması durumu için 0,0756733 olarak ölçülmüştür. Bu değer YFK yapısında fuzzy

PID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0737964 olarak elde edilmiştir. Elde edilen iki değer karşılaştırıldığında HMŞ YFK yapısında fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması sonucunda IAE performans indeks değerinde %2,48 oranında bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Tablodaki ITAE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda elde edilen değer 1,9533969 iken fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise 1,9112820 olmuştur. Bu değerler sistemin ITAE değerinde %2,16 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Tablo 6.4. Senaryo 2 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

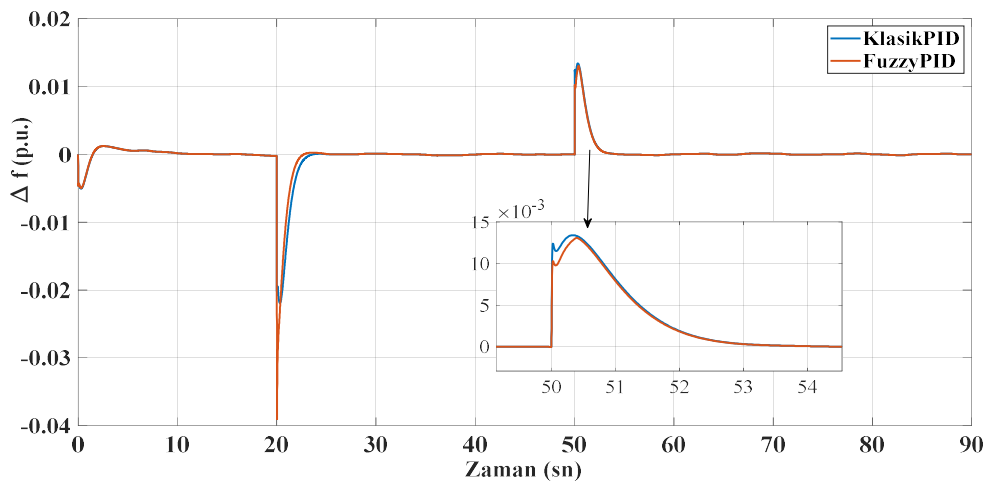
Kontrolör	Klasik PID	Fuzzy PID
IAE	0,075673250886958	0,073796360835907
ISE	3,923604690229599e-04	3,639114967128820e-04
ITAE	1,953396904411933	1,911282037282619
ITSE	0,008582494899719	0,007820300857647

Tablodaki ISE performans indeks değerleri incelendiği zaman önerilen HMŞ'nin YFK yapısında, klasik PID kontrolörün kullanılması durumunda ISE değeri $3,923605 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda YFK yapısında fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise bu değer $3,639115 \times 10^{-4}$ olmaktadır. Bu değerler fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ISE performans indeks değerinde %7,25 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, klasik PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0085825 olan indeks değerinin fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi halinde 0,0078203 değerine düştüğü görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy PID kontrolörün kullanılması sonucu, HMŞ güç sisteminde Senaryo 2 çalışma durumu için ITSE performans indeks değerinde %8,88 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlikli değişimlere olan duyarlılığı dikkate alındığında; YEK'lere bağlı üretimin arttığı şartlarda fuzzy PID kontrolör yapısının HMŞ güç sistemindeki büyük genlikli frekans saptmalarını daha etkili bir şekilde sönümlendireceği söylenebilir.

Senaryo 2 için HMŞ güç sisteminin YFK'sında elde edilen tüm sonuçlar birlikte incelendiğinde hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolörler sistemin frekans kararlılığını korumaktadırlar. Ancak fuzzy PID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha iyi yanıtlar sergilemiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerindeki belirgin düşüş, fuzzy PID kontrolör yapısının yüksek genlikli frekans değişimlerini daha başarılı bir şekilde sönümlediğini göstermektedir.

6.1.3. Üçüncü Senaryo

Senaryo 3 için, önerilen HMŞ'nin YFK'sında klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarına ilişkin elde edilen frekans yanıtları Şekil 6.4'te verilmiştir. Bu senaryoda HMŞ'de YEK'lere bağlı üretimin düşük, yük miktarının ise normal işletme değerlerine göre daha fazla olduğu varsayılmıştır. Bu amaca yönelik olarak WTG ve PV sistemlerine ait güç değişimleri 0,5 katsayısı ile çarpılırken yük değişimi 1,5 ile çarpılmıştır. Şekilde görülen frekans yanıtlarından hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolörün sistem kararlılığını korumada başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda şekilde gösterilen yakın görüntüden, fuzzy PID kontrolörün frekans değişiminin maksimum aşma değeri klasik PID kontrolöre göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistemin dinamik davranışında, fuzzy PID kontrolörün daha iyi performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 6.4. Senaryo 3 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Senaryo 3 için PID kontrolör yapılarının performans indeks değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, bütün performans indeks değerleri için fuzzy PID kontrolöre ait değerler klasik PID kontrolör değerlerine göre daha düşük olduğu görülecektir. Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK yapısında klasik PID kontrolör yapısı kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0591692 olarak elde edilirken fuzzy PID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0544783 olarak gerçekleşmiştir. Diğer bir ifadeyle fuzzy PID kontrolörün kullanılması durumunda IAE değerinde yaklaşık olarak %7,93 oranında bir iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri, klasik PID kontrolör yapısı kullanılması durumunda 1,6975115 olarak elde edilirken fuzzy PID kontrolör yapısı kullanıldığı zaman 1,5733880'e gerilemektedir. Oransal olarak ifade edilirse ITAE değerinde yaklaşık %7,31 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir. ITAE performans indeks değerinin kalıcı ve uzun süren hatalara karşı duyarlı olduğu dikkate alındığında, elde edilen sonuçlar bulanık mantık içeren kontrolör yapısının, frekans değişiminin zaman boyunca oluşturduğu toplam etkiyi başarılı bir şekilde sönümlediğini göstermektedir.

Tablo 6.5. Senaryo 3 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik PID	Fuzzy PID
IAE	0,059169185813868	0,054478302259113
ISE	6,150098366896945e-04	6,016429926669125e-04
ITAE	1,697511526606510	1,573387956759260
ITSE	0,017082186723830	0,016255091583776

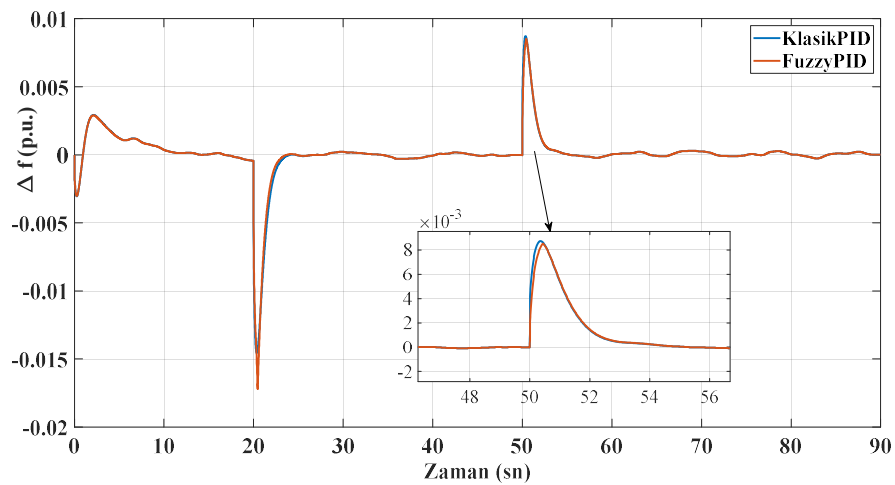
Benzer şekilde klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapıları için ISE performans indeks değerleri sırasıyla $6,150098 \times 10^{-4}$ ve $6,016430 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu düşüş yaklaşık olarak %2,17 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Tabloda verilen ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik PID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda 0,0170822 olarak hesaplanan değer fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0162551'e düşmektedir. Diğer bir ifadeyle fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, ITSE değerinde yaklaşık olarak %4,84 oranında bir iyileşme gerçekleşmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlik sapmalarına olan duyarlılığı göz önüne alınırsa, fuzzy PID kontrolör yapısının düşük YEK

üretimi ve yüksek yük talebi işletme şartlarında HMŞ güç sisteminde büyük genlikli frekans sapmalarını daha iyi sönümlediği sonucuna ulaşılmaktadır.

HMŞ güç sistemi YFK yapısı için Senaryo 3'e ait tüm sonuçlar genel olarak ele alındığı zaman hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör yapıları, sistemin frekans kararlılığını koruyabilmişlerdir. Ayrıca fuzzy PID kontrolör yapısı kullanılması halinde daha düşük performans indeks değerleri elde edilmiştir. Burada hem ITAE hem de ITSE performans indeks değerlerindeki belirgin düşüş, sistemde meydana gelen uzun süreli ve kalıcı frekans hataları ile büyük genlikli frekans hatalarını fuzzy PID kontrolörün daha iyi sönümlendirdiğini göstermektedir.

6.1.4. Dördüncü Senaryo

Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK'sı için oluşturulan Senaryo 4 koşulları altında, klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının kullanılmasına ilişkin frekans değişimleri Şekil 6.5'te sunulmuştur. Bu senaryo için HMŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği varsayılmıştır. Bu senaryonun amacı; HMŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği zaman, klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının frekans kontrolündeki başarılarını karşılaştırmaktır. Senaryo 4 için YEK üretim miktarları ile yük talep miktarları, Senaryo 1'deki değerler ile aynı tutulmuştur. Şekil 6.5 incelendiğinde hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör yapılarının HMŞ güç sisteminin frekans kararlılığını korudukları görülecektir.



Şekil 6.5. Senaryo 4 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK'sında kullanılan Klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının Senaryo 4 altındaki performans indeks değerleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Tablodaki veriler, fuzzy PID kontrolör yapısının bütün performans indeks ölçütlerinde daha düşük değerler verdiğini göstermektedir. IAE performans indeks değeri klasik PID kontrolör için 0,0537115 olarak gerçekleşirken fuzzy PID kontrolör yapısı kullanılması durumunda ise 0,0520324 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda IAE performans indeksi açısından sistemde %3,13 oranında bir iyileşme gerçekleşeceğine işaret etmektedir. ITAE performans indeks değerleri incelenirse, klasik PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda elde edilen değer 1,4677412 iken fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda 1,4227988 olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi ile sistemde %3,06 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Hem IAE hem de ITAE performans indeks değerlerindeki bu azalmalar, fuzzy PID kontrolör yapısının Senaryo 4 şartları altında HMŞ güç sistemindeki frekans değişimlerinin toplam etkisini klasik PID'ye göre daha düşük seviyede tuttuğuna işaret etmektedir.

Tablo 6.6. Senaryo 4 için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik PID	Fuzzy PID
IAE	0,053711498051114	0,052032405661820
ISE	2,857941122058192e-04	2,779164264635155e-04
ITAE	1,467741217417846	1,422798764458337
ITSE	0,007459600078491	0,007131575620294

Tabloda yer alan ISE performans indeks değeri, klasik PID kontrolör yapısının YFK yapısında tercih edilmesi durumunda $2,857941 \times 10^{-4}$ olarak görülürken fuzzy PID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda bu değer $2,779164 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Elde edilen bu iki değer, fuzzy PID kontrolör yapısının ISE performans indeksi açısından %2,76 oranında bir gelişme sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik PID kontrolörün kullanılması durumunda 0,0074596 olan indeks değeri fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0071316 olarak elde edilmiştir. ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, HMŞ güç sistemi YFK yapısında fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda yaklaşık olarak %4,40 oranında bir azalma meydana

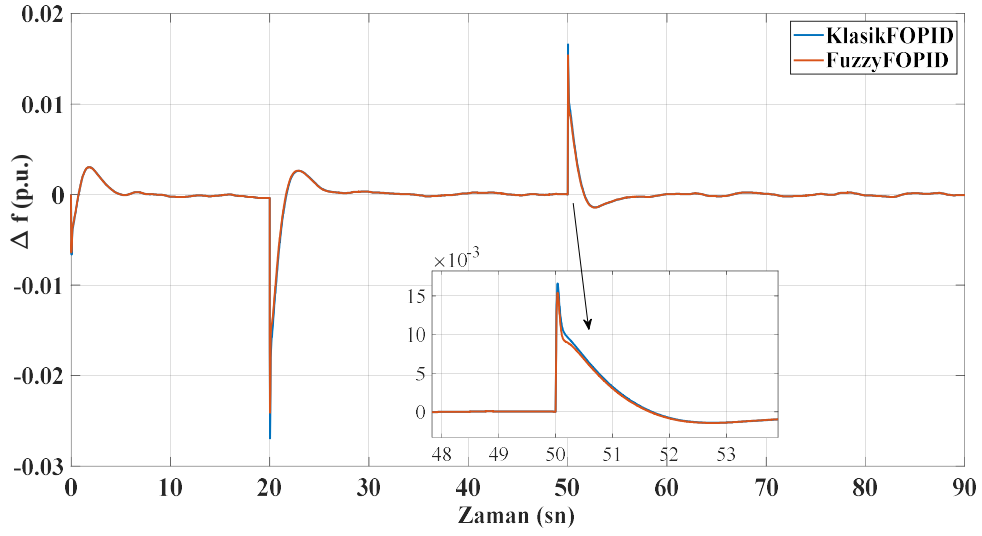
geldiği görülmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinde meydana gelen azalmalar, fuzzy PID kontrolör yapısının sistemde meydana gelecek frekans sapmalarının maksimum aşma miktarlarını klasik PID kontrolör yapısına göre daha etkili bastırdığını göstermektedir.

Senaryo 4 için belirlenen çalışma şartlarında, HMŞ güç sistemi YFK'sı için elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör yapılarının sistemin frekans kararlılığını koruduğu söylenebilir. Elde edilen performans indeks değerleri incelendiğinde ise fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması durumunda daha düşük değerler elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Burada IAE ile ITAE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy PID kontrolör kullanılması sonucu frekans değişimlerindeki sürekli hataların daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir. Benzer şekilde ISE ile ITSE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy PID kontrolörün frekans sapmalarındaki büyük genlikli aşimleri daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir.

6.2. FOPID Kontrolör için Analiz Sonuçları

6.2.1. Birinci Senaryo

Şekil 6.6'da; Senaryo 1 için YFK'da kullanılan hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolör yapılarına ait elde edilen frekans değişimleri gösterilmiştir. Senaryo 1 için HMŞ modelinde YEK'lere bağlı üretimin ve yükün normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Şekil 6.6 incelendiğinde, hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolörler için HMŞ'nin kararlılığını koruduğu görülecektir. Şekilde verilen yakın görüntüden görüleceği üzere fuzzy FOPID kontrolörün kullanıldığı durumdaki frekans yanıtının tepe değerinin klasik FOPID kontrolörün kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, fuzzy FOPID kontrolör yapısının klasik FOPID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik yanıtında bir iyileşme sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.6. Senaryo 1 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

HMŞ güç sisteminde Senaryo 1 için YFK’da klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolör yapılarının kullanılması durumunda frekans yanıtlarına ait elde edilen performans indeks değerleri Tablo 6.7’de gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere klasik FOPID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0512060 olarak elde edilirken fuzzy FOPID kontrolör kullanılması durumunda ise 0,0492421 olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle fuzzy FOPID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değerinde sistemde %3,84 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. Benzer şekilde HMŞ sistemin YFK yapısında klasik FOPID kontrolör kullanılması durumunda ITAE performans indeks değerleri 1,5365872 olarak elde edilirken fuzzy FOPID kontrolör yapısı kullanılması durumunda ise 1,4808625 değeri elde edilmiştir. ITAE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, fuzzy FOPID kontrolör yapısının klasik FOPID kontrolörü göre %3,63’lük bir iyileşme sağladığı görülecektir.

Tablo 6.7. Senaryo 1 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik FOPID	Fuzzy FOPID
IAE	0,051206040587442	0,049242071047861
ISE	2,878646521393105e-04	2,472511522810176e-04
ITAE	1,536587239118036	1,480862477701823
ITSE	0,007660754900901	0,006589143374797

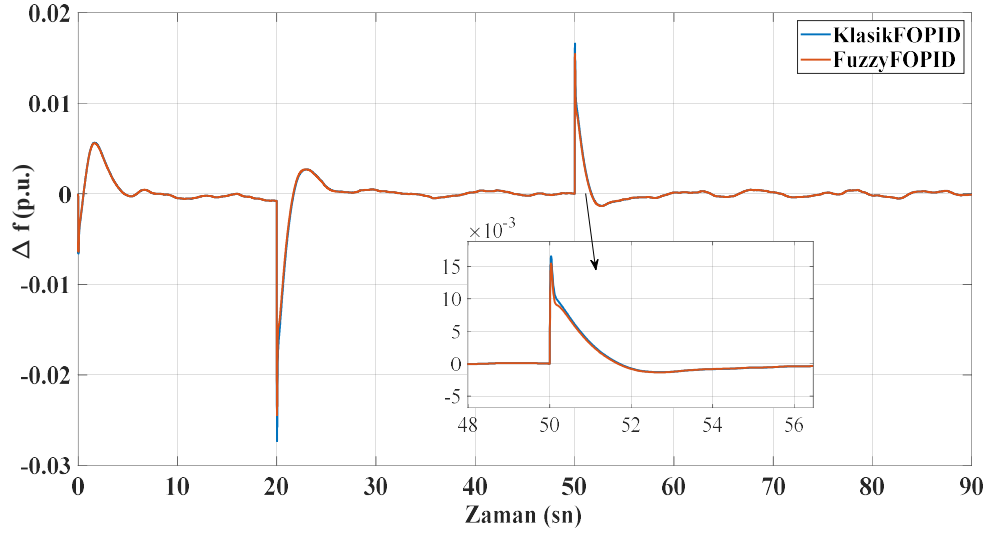
Senaryo 1 şartlarında HMŞ sistemin YFK yapısında, klasik FOPID ile fuzzy FOPID kontrolörlerin kullandığı durumlar için elde edilen ISE hata performans indeks değerleri sırasıyla $2,878647 \times 10^{-4}$ ve $2,472512 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere fuzzy FOPID kontrolörün ikincil YFK yapısında kullanılması sonucunda ISE performans indeks değerinde %14,11 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Benzer şekilde klasik FOPID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ITSE değeri 0,0076608 olarak elde edilirken fuzzy FOPID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ise indeks değeri 0,0065891 olarak elde edilmiştir. Bu düşüş oransal olarak yaklaşık %13,99 değerine karşılık gelmektedir. Elde edilen değerlerden de görüldüğü üzere HMŞ güç sisteminde klasik FOPID kontrolör yapısı yerine bulanık mantık içeren FOPID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, dört ayrı performans indeksinde de azalma sağlanmıştır. ISE ve ITSE performans indeks değerleri büyük hata değerlerine daha duyarlıdır. Senaryo 1 için elde edilen ISE ve ITSE performans indeks değerlerine göre, fuzzy FOPID kontrolörün özellikle büyük genlikli geçici rejim hatalarını klasik FOPID kontrolöre göre daha etkili biçimde sönümlendirdiği söylenebilir.

Senaryo 1 işletme şartlarına ait sonuçlar bütüncül olarak incelendiği zaman, hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolör yapılarının sistem frekans kararlılığını genel olarak korudukları görülmüştür. Ancak fuzzy yapısının, kontrolör parametre değerlerini dinamik olarak ayarlaması sonucu, fuzzy FOPID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha düşük değerler elde edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak; Senaryo 1 işletme şartlarında önerilen HMŞ modeli için YFK yapısında, fuzzy FOPID kontrolörün klasik PID yerine kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

6.2.2. İkinci Senaryo

Senaryo 2 için klasik FOPID ile fuzzy FOPID kontrolör yapılarının önerilen HMŞ için YFK'da kullanılması durumlarında elde edilen frekans değişimleri Şekil 6.7'de verilmiştir. Senaryo 2'de, HMŞ'de YEK'lere bağlı üretimin fazla olduğu ve yük miktarının ise normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Bu senaryoda tasarlanan üretim miktarının ayarlanması için Senaryo 1'e ait WTG ve PV güç değişim değerleri sırasıyla 2 ve 1,75 katsayıları ile çarpılmıştır. Şekil 6.7'de Senaryo 2 için verilen frekans değişiminden görüleceği üzere hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolörler sistemin

kararlılığını korumaktadır. Ayrıca şekilde verilen görüntü detayı incelendiği zaman fuzzy FOPID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda frekans değişiminin maksimum aşma değeri, klasik FOPID kontrolöre göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu yakın görüntü, fuzzy FOPID kontrolör yapısının klasik FOPID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik davranışında olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 6.7. Senaryo 2 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Tablo 6.8’de Senaryo 2 için HMŞ güç sisteminin YFK yapısında klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarında elde edilen performans indeks değerleri sunulmuştur. Tabloya göre, IAE performans indeksine ait değer klasik FOPID kontrolör kullanılması durumu için 0,0644218 olarak ölçülmüştür. Bu değer YFK yapısında fuzzy FOPID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0622587 olarak elde edilmiştir. Elde edilen iki değer karşılaştırıldığında HMŞ YFK yapısında fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması sonucunda IAE performans indeks değerinde %3,36 oranında bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Tablodaki ITAE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda elde edilen değer 1,9120226 iken fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise 1,8539163 olmuştur. Bu değerler sistemin ITAE değerinde %3,04 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Tablo 6.8. Senaryo 2 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

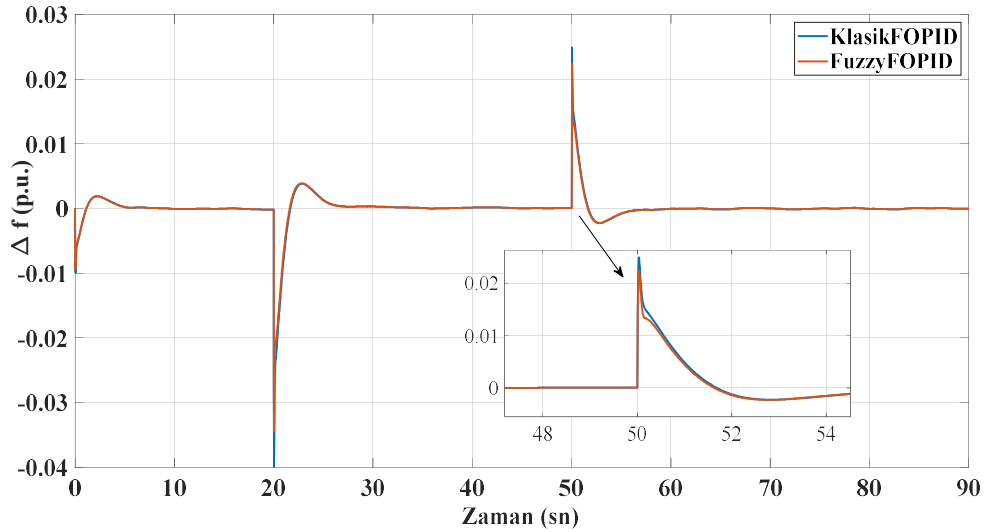
Kontrolör	Klasik FOPID	Fuzzy FOPID
IAE	0,064421763568273	0,062258688413949
ISE	3,347118171331573e-04	2,910210694062733e-04
ITAE	1,912022597250277	1,853916307261953
ITSE	0,008045243157128	0,006929302056673

Tablodaki ISE performans indeks değerleri incelendiği zaman önerilen HMŞ'nin YFK yapısında, klasik FOPID kontrolörün kullanılması durumunda ISE değeri $3,347118 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda YFK yapısında fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise bu değer $2,910211 \times 10^{-4}$ olmaktadır. Bu değerler fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ISE performans indeks değerinde %13,05 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, klasik FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0080452 olan indeks değerinin fuzzy FOPID kontrolör yapısının tercih edilmesi halinde 0,0069293 değerine düştüğü görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy FOPID kontrolörün kullanılması sonucu, HMŞ güç sisteminde Senaryo 2 çalışma durumu için ITSE performans indeks değerinde %13,87 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlikli değişimlere olan duyarlılığı dikkate alındığında; YEK'lere bağlı üretimin arttığı şartlarda fuzzy FOPID kontrolör yapısının HMŞ güç sistemindeki büyük genlikli frekans sapmalarını daha etkili bir şekilde sönümlendireceği söylenebilir.

Senaryo 2 için HMŞ güç sisteminin YFK'sında elde edilen tüm sonuçlar birlikte incelendiğinde hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolörler sistemin frekans kararlılığını korumaktadırlar. Ancak fuzzy FOPID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha iyi yanıtlar sergilemiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerindeki belirgin düşüş, fuzzy FOPID kontrolör yapısının yüksek genlikli frekans değişimlerini daha başarılı bir şekilde sönümlendiğini göstermektedir.

6.2.3. Üçüncü Senaryo

Senaryo 3 için, önerilen HMS'nin YFK'sında klasik FOPID ile fuzzy FOPID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarına ilişkin elde edilen frekans yanıtları Şekil 6.8'de verilmiştir. Bu senaryoda HMS'de YEK'lere bağlı üretimin düşük, yük miktarının ise normal işletme değerlerine göre daha fazla olduğu varsayılmıştır. Bu amaca yönelik olarak WTG ve PV sistemlerine ait güç değişimleri 0,5 katsayısı ile çarpılırken yük değişimi 1,5 ile çarpılmıştır. Şekilde görülen frekans yanıtlarından hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolörün sistem kararlılığını korumada başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda şekilde gösterilen yakın görüntüden, fuzzy FOPID kontrolörün frekans değişiminin maksimum aşma değeri klasik FOPID kontrolöre göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistemin dinamik davranışında, fuzzy FOPID kontrolörün daha iyi performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 6.8. Senaryo 3 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Senaryo 3 için FOPID kontrolör yapılarının performans indeks değerleri Tablo 6.9'da verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, bütün performans indeks değerleri için fuzzy FOPID kontrolöre ait değerler klasik FOPID kontrolör değerlerine göre daha düşük olduğu görülecektir. Önerilen HMS güç sisteminin YFK yapısında klasik FOPID kontrolör yapısı kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0645144 olarak elde edilirken fuzzy FOPID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0607613 olarak gerçekleşmiştir.

Diğer bir ifadeyle fuzzy FOPID kontrolörün kullanılması durumunda IAE değerinde yaklaşık olarak %5,82 oranında bir iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri, klasik FOPID kontrolör yapısı kullanılması durumunda 1,9322641 olarak elde edilirken fuzzy FOPID kontrolör yapısı kullanıldığı zaman 1,8241717 gerilemektedir. Oransal olarak ifade edilirse ITAE değerinde yaklaşık %5,59 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir. ITAE performans indeks değerinin kalıcı ve uzun süren hatalara karşı duyarlı olduğu dikkate alındığında, elde edilen sonuçlar bulanık mantık içeren kontrolör yapısının, frekans değişiminin zaman boyunca oluşturduğu toplam etkiyi başarılı bir şekilde sönümlediğini göstermektedir.

Tablo 6.9. Senaryo 3 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik FOPID	Fuzzy FOPID
IAE	0,064514402662796	0,060761253725523
ISE	6,083045125937185e-04	4,951067979538130e-04
ITAE	1,932264128599856	1,824171676151198
ITSE	0,016825686932834	0,013802374773899

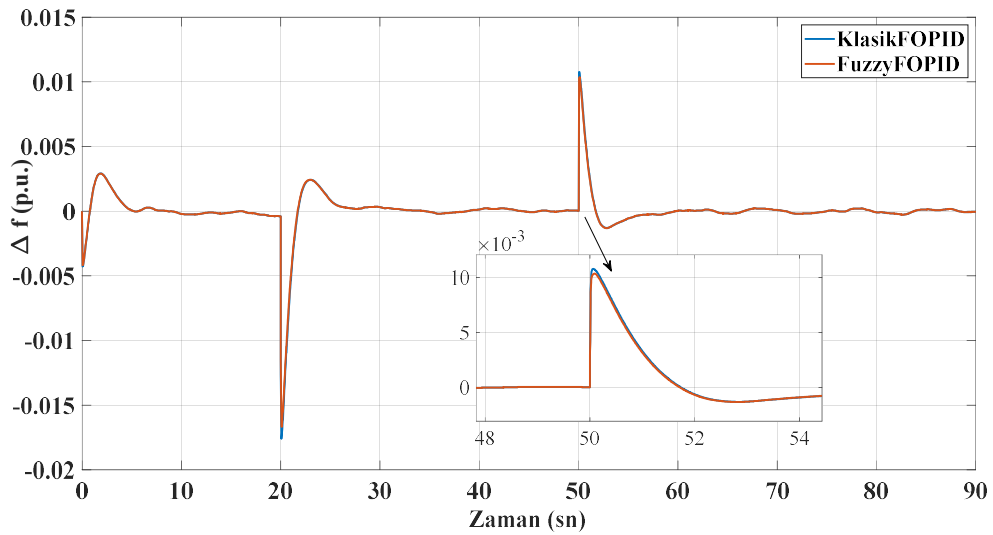
Benzer şekilde klasik FOPID ile fuzzy FOPID kontrolör yapıları için ISE performans indeks değerleri sırasıyla $6,083045 \times 10^{-4}$ ve $4,951068 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu düşüş yaklaşık olarak %18,61 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Tabloda verilen ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik FOPID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda 0,0168257 olarak hesaplanan değer fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0138024 düşmektedir. Diğer bir ifadeyle fuzzy FOPID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, ITSE değerinde yaklaşık olarak %17,97 oranında bir iyileşme gerçekleşmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlik sapmalarına olan duyarlılığı göz önüne alınırsa, fuzzy FOPID kontrolör yapısının düşük YEK üretimi ve yüksek yük talebi işletme şartlarında HMŞ güç sisteminde büyük genlikli frekans sapmalarını daha iyi sönümlediği sonucuna ulaşılmaktadır.

HMŞ güç sistemi YFK yapısı için Senaryo 3'e ait tüm sonuçlar genel olarak ele alındığı zaman hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolör yapıları, sistemin frekans kararlılığını koruyabilmişlerdir. Ayrıca fuzzy FOPID kontrolör yapısı kullanılması halinde

daha düşük performans indeks değeri elde edilmiştir. Burada hem ITAE hem de ITSE performans indeks değerlerindeki belirgin düşüş, sistemde meydana gelen uzun süreli ve kalıcı frekans hataları ile büyük genlikli frekans hatalarını fuzzy FOPID kontrolörün daha iyi sönümlendirdiğini göstermektedir.

6.2.4. Dördüncü Senaryo

Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK'sı için oluşturulan Senaryo 4 koşulları altında, klasik PID ile fuzzy FOPID kontrolör yapılarının kullanılmasına ilişkin frekans değişimleri Şekil 6.9'da sunulmuştur. Bu senaryo için HMŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği varsayılmıştır. Bu senaryonun amacı; HMŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği zaman, klasik FOPID ile fuzzy FOPID kontrolör yapılarının frekans kontrolündeki başarılarını karşılaştırmaktır. Senaryo 4 için YEK üretim miktarları ile yük talep miktarları, Senaryo 1'deki değerler ile aynı tutulmuştur. Şekil 6.9 incelendiğinde hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolör yapılarının HMŞ güç sisteminin frekans kararlılığını korudukları görülecektir.



Şekil 6.9. Senaryo 4 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK'sında kullanılan Klasik PID ile fuzzy PID kontrolör yapılarının Senaryo 4 altındaki performans indeks değeri Tablo 6.10'da verilmiştir. Tablodaki veriler, fuzzy PID kontrolör yapısının bütün performans indeks ölçütlerinde

daha düşük değerler verdiğini göstermektedir. IAE performans indeks değeri klasik PID kontrolör için 0,0496900 olarak gerçekleşirken fuzzy PID kontrolör yapısı kullanılması durumunda ise 0,0485583 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda IAE performans indeksi açısından sistemde %2,28 oranında bir iyileşme gerçekleşeceğine işaret etmektedir. ITAE performans indeks değerleri incelenirse, klasik PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda elde edilen değer 1,4884610 iken fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda 1,4569341 olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy PID kontrolör yapısının tercih edilmesi ile sistemde %2,12 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Hem IAE hem de ITAE performans indeks değerlerindeki bu azalmalar, fuzzy PID kontrolör yapısının Senaryo 4 şartları altında HMŞ güç sistemindeki frekans değişimlerinin toplam etkisini klasik PID'ye göre daha düşük seviyede tuttuğuna işaret etmektedir.

Tablo 6.10. Senaryo 4 için klasik FOPID ve fuzzy FOPID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik FOPID	Fuzzy FOPID
IAE	0,049690003152837	0,048558337178404
ISE	2,560766918675028e-04	2,366900041154257e-04
ITAE	1,488461039153858	1,456934147612842
ITSE	0,006808448382264	0,006302590395006

Tabloda yer alan ISE performans indeks değeri, klasik FOPID kontrolör yapısının YFK yapısında tercih edilmesi durumunda $2,560767 \times 10^{-4}$ olarak görülürken fuzzy FOPID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda bu değer $2,366900 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Elde edilen bu iki değer, fuzzy FOPID kontrolör yapısının ISE performans indeksi açısından %7,57 oranında bir gelişme sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik FOPID kontrolörün kullanılması durumunda 0,0068084 olan indeks değeri fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0063026 olarak elde edilmiştir. ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, HMŞ güç sistemi YFK yapısında fuzzy FOPID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda yaklaşık olarak %7,43 oranında bir azalma meydana geldiği görülmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinde meydana gelen azalmalar, fuzzy FOPID kontrolör yapısının sistemde meydana gelecek frekans

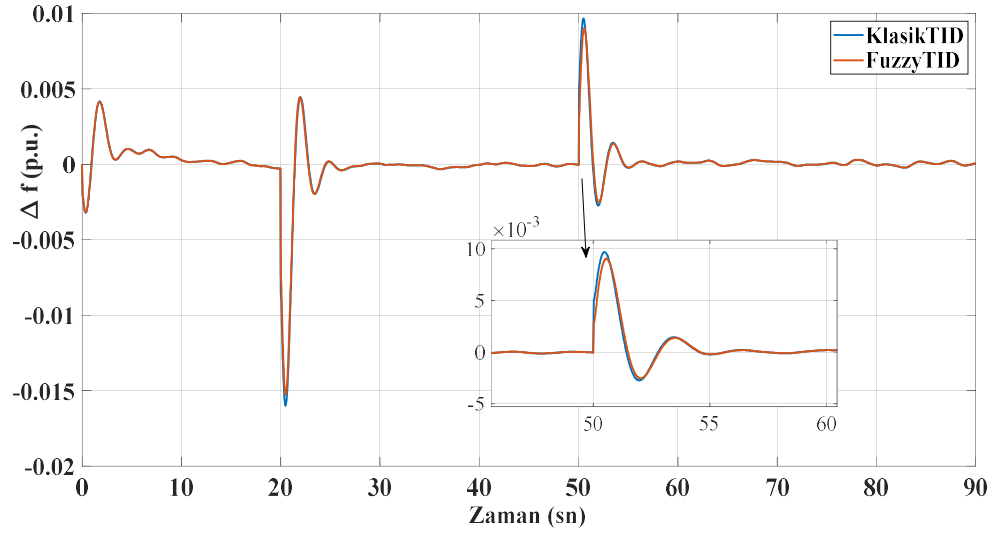
sapmalarının maksimum aşma miktarlarını klasik FOPID kontrolör yapısına göre daha etkili bastırdığını göstermektedir.

Senaryo 4 için belirlenen çalışma şartlarında, HMS güç sistemi YFK'sı için elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hem klasik FOPID hem de fuzzy FOPID kontrolör yapılarının sistemin frekans kararlılığını koruduğu söylenebilir. Elde edilen performans indeks değerleri incelendiğinde ise fuzzy FOPID kontrolör yapısının kullanılması durumunda daha düşük değerler elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Burada IAE ile ITAE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy FOPID kontrolör kullanılması sonucu frekans değişimlerindeki sürekli hataların daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir. Benzer şekilde ISE ile ITSE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy FOPID kontrolörün frekans sapmalarındaki büyük genlikli aşimleri daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir.

6.3. TID Kontrolör için Analiz Sonuçları

6.3.1. Birinci Senaryo

Şekil 6.10'da; Senaryo 1 için YFK'da kullanılan hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolör yapılarına ait elde edilen frekans değişimleri gösterilmiştir. Senaryo 1 için HMS modelinde YEK'lere bağlı üretimin ve yükün normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Şekil 6.10 incelendiğinde, hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolörler için HMS'nin kararlılığını koruduğu görülecektir. Şekilde verilen yakın görüntüden görüleceği üzere fuzzy TID kontrolörün kullanıldığı durumdaki frekans yanıtının tepe değerinin klasik TID kontrolörün kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, fuzzy TID kontrolör yapısının klasik TID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik yanıtında bir iyileşme sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.10. Senaryo 1 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

HMŞ güç sisteminde Senaryo 1 için YFK’da klasik TID ve fuzzy TID kontrolör yapılarının kullanılması durumunda frekans yanıtlarına ait elde edilen performans indeks değerleri Tablo 6.11’de gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere klasik TID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0537786 olarak elde edilirken fuzzy TID kontrolör kullanılması durumunda ise 0,0519223 olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle fuzzy PID kontrolör kullanılması durumunda IAE performans indeks değerinde sistemde %3,45 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. Benzer şekilde klasik TID kontrolör kullanılması durumunda ITAE performans indeks değerleri 1,5318234 olarak elde edilirken fuzzy TID kontrolör kullanılması durumunda ise 1,4704446 olarak elde edilmiştir. Bu değerler fuzzy TID kontrolör yapısının klasik TID kontrolörü göre %4,01’lik bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

Tablo 6.11. Senaryo 1 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik TID	Fuzzy TID
IAE	0,053778592920975	0,051922310034534
ISE	3,069617523410388e-04	2,761467192843594e-04
ITAE	1,531823408529146	1,470444606116027
ITSE	0,008156583557689	0,007238373241426

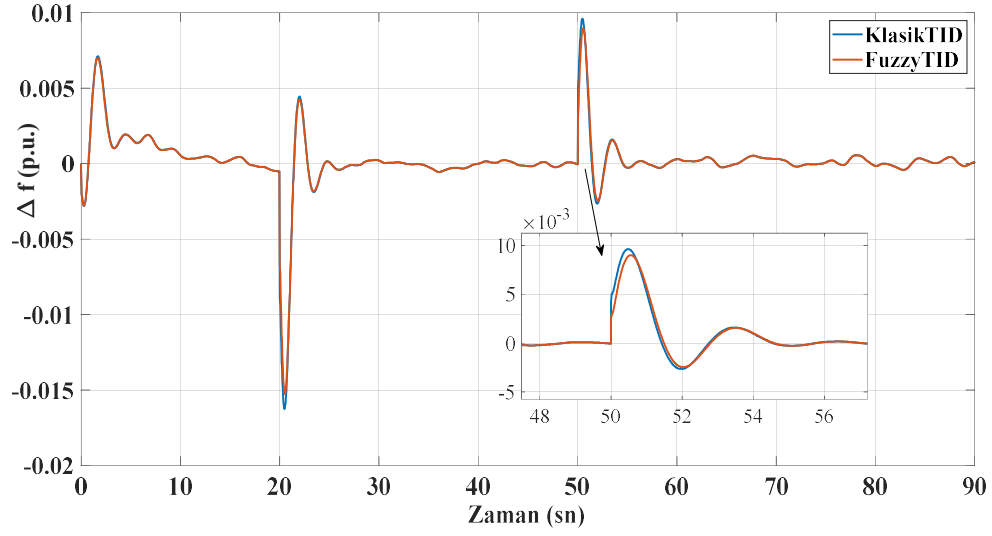
Senaryo 1 şartlarında HMS sistemin YFK yapısında, klasik TID ile fuzzy TID kontrolörlerin kullandığı durumlar için elde edilen ISE hata performans indeks değerleri sırasıyla $3,069618 \times 10^{-4}$ ve $2,761467 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere fuzzy TID kontrolörün ikincil YFK yapısında kullanılması sonucunda ISE performans indeks değerinde %10,04 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Benzer şekilde klasik TID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ITSE değeri 0,0081566 olarak elde edilirken fuzzy TID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda ise indeks değeri 0,0072384 olarak elde edilmiştir. Bu düşüş oransal olarak yaklaşık %11,26 değerine karşılık gelmektedir. Elde edilen değerlerden de görüldüğü üzere HMS güç sisteminde klasik TID kontrolör yapısı yerine bulanık mantık içeren TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, dört ayrı performans indeksinde de azalma sağlanmıştır. ISE ve ITSE performans indeks değerleri büyük hata değerlerine daha duyarlıdır. Senaryo 1 için elde edilen ISE ve ITSE performans indeks değerlerine göre, fuzzy TID kontrolörün özellikle büyük genlikli geçici rejim hatalarını klasik TID kontrolöre göre daha etkili biçimde sönümlendirdiği söylenebilir.

Senaryo 1 işletme şartlarına ait sonuçlar bütüncül olarak incelendiği zaman, hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolör yapılarının sistem frekans kararlılığını genel olarak korudukları görülmüştür. Ancak fuzzy yapısının, kontrolör parametre değerlerini dinamik olarak ayarlaması sonucu, fuzzy TID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha düşük değerler elde edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak; Senaryo 1 işletme şartlarında önerilen HMS modeli için YFK yapısında, fuzzy TID kontrolörün klasik TID yerine kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

6.3.2. İkinci Senaryo

Senaryo 2 için klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapılarının önerilen HMS için YFK'da kullanılması durumlarında elde edilen frekans değişimleri Şekil 6.11'de verilmiştir. Senaryo 2'de, HMS'de YEK'lere bağlı üretimin fazla olduğu ve yük miktarının ise normal işletme değerlerinde olduğu düşünülmüştür. Bu senaryoda tasarlanan üretim miktarının ayarlanması için Senaryo 1'e ait WTG ve PV güç değişim değerleri sırasıyla 2 ve 1,75 katsayıları ile çarpılmıştır. Şekil 6.11'de Senaryo 2 için verilen frekans değişiminden görüleceği üzere hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolörler sistemin kararlılığını

korumaktadır. Ayrıca şekilde verilen görüntü detayı incelendiği zaman fuzzy TID kontrolörün YFK yapısında kullanılması durumunda frekans değişiminin maksimum aşma değeri, klasik TID kontrolöre göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu yakın görüntü, fuzzy TID kontrolör yapısının klasik TID kontrolör yapısına göre sistemin dinamik davranışında olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 6.11. Senaryo 2 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Tablo 6.12’de Senaryo 2 için HMŞ güç sisteminin YFK yapısında klasik TID ve fuzzy TID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarında elde edilen performans indeks değerleri sunulmuştur. Tabloya göre, IAE performans indeksine ait değer klasik TID kontrolör kullanılması durumu için 0,0688027 olarak ölçülmüştür. Bu değer YFK yapısında fuzzy TID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0665278 olarak elde edilmiştir. Elde edilen iki değer karşılaştırıldığında HMŞ YFK yapısında fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması sonucunda IAE performans indeks değerinde %3,31 oranında bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Tablodaki ITAE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda elde edilen değer 1,8752570 iken fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise 1,8124132 olmuştur. Bu değerler sistemin ITAE değerinde %3,35 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Tablo 6.12. Senaryo 2 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

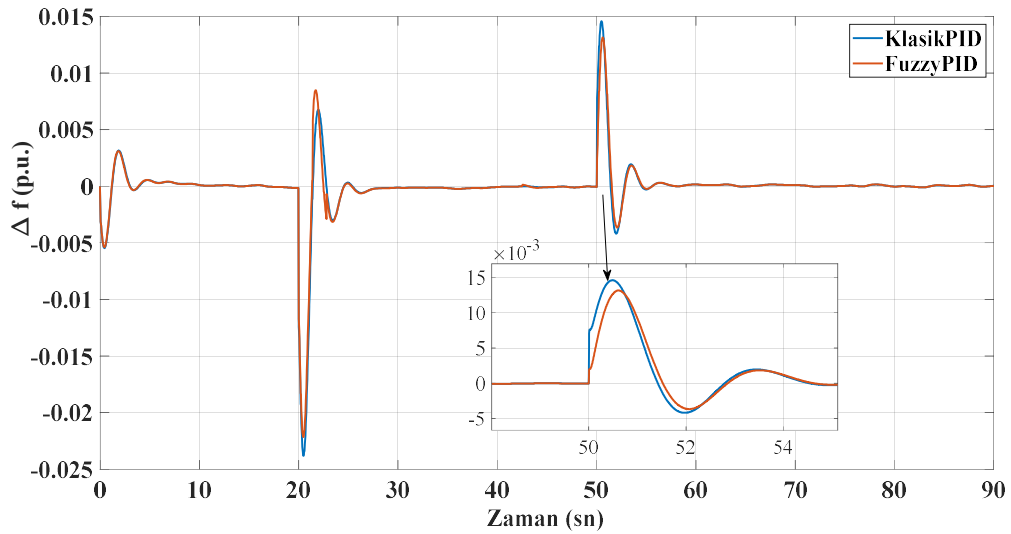
Kontrolör	Klasik TID	Fuzzy TID
IAE	0,068802736006466	0,066527805995839
ISE	3,609687730543974e-04	3,218890921836129e-04
ITAE	1,875257017015688	1,812413172747259
ITSE	0,008513480578767	0,007474613721811

Tablodaki ISE performans indeks değerleri incelendiği zaman önerilen HMS'nin YFK yapısında, klasik TID kontrolörün kullanılması durumunda ISE değeri $3,609688 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda YFK yapısında fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ise bu değer $3,218891 \times 10^{-4}$ olmaktadır. Bu değerler fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda ISE performans indeks değerinde %10,83 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, klasik TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0085135 olan indeks değerinin fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi halinde 0,0074746 değerine düştüğü görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy TID kontrolörün kullanılması sonucu, HMS güç sisteminde Senaryo 2 çalışma durumu için ITSE performans indeks değerinde %12,20 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlikli değişimlere olan duyarlılığı dikkate alındığında; YEK'lere bağlı üretimin arttığı şartlarda fuzzy TID kontrolör yapısının HMS güç sistemindeki büyük genlikli frekans sapmalarını daha etkili bir şekilde söndümlendireceği söylenebilir.

Senaryo 2 için HMS güç sisteminin YFK'sında elde edilen tüm sonuçlar birlikte incelendiğinde hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolörler sistemin frekans kararlılığını korumaktadırlar. Ancak fuzzy TID kontrolör yapısı bütün performans indeks değerlerinde daha iyi yanıtlar sergilemiştir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerindeki belirgin düşüş, fuzzy TID kontrolör yapısının yüksek genlikli frekans değişimlerini daha başarılı bir şekilde söndümlendiğini göstermektedir.

6.3.3. Üçüncü Senaryo

Senaryo 3 için, önerilen HMŞ'nin YFK'sında klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapılarının kullanılması durumlarına ilişkin elde edilen frekans yanıtları Şekil 6.12'de verilmiştir. Bu senaryoda HMŞ'de YEK'lere bağlı üretimin düşük, yük miktarının ise normal işletme değerlerine göre daha fazla olduğu varsayılmıştır. Bu amaca yönelik olarak WTG ve PV sistemlerine ait güç değişimleri 0,5 katsayısı ile çarpılırken yük değişimi 1,5 ile çarpılmıştır. Şekilde görülen frekans yanıtlarından hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolörün sistem kararlılığını korumada başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda şekilde gösterilen yakın görüntüden, fuzzy TID kontrolörün frekans değişiminin maksimum aşma değeri klasik TID kontrolöre göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistemin dinamik davranışında, fuzzy TID kontrolörün daha iyi performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 6.12. Senaryo 3 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Senaryo 3 için TID kontrolör yapılarının performans indeks değerleri Tablo 6.13'te verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, bütün performans indeks değerleri için fuzzy TID kontrolöre ait değerler klasik TID kontrolör değerlerine göre daha düşük olduğu görülecektir. Önerilen HMŞ güç sisteminin YFK yapısında klasik TID kontrolör yapısı kullanılması durumunda IAE performans indeks değeri 0,0667752 olarak elde edilirken fuzzy TID kontrolörün kullanılması durumunda ise 0,0635731 olarak gerçekleşmiştir.

Diğer bir ifadeyle fuzzy TID kontrolörün kullanılması durumunda IAE değerinde yaklaşık olarak %4,80 oranında bir iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri, klasik TID kontrolör yapısı kullanılması durumunda 1,9635302 olarak elde edilirken fuzzy TID kontrolör yapısı kullanıldığı zaman 1,8473995'e gerilemektedir. Oransal olarak ifade edilirse ITAE değerinde yaklaşık %5,91 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir. ITAE performans indeks değerinin kalıcı ve uzun süren hatalara karşı duyarlı olduğu dikkate alındığında, elde edilen sonuçlar bulanık mantık içeren kontrolör yapısının, frekans değişiminin zaman boyunca oluşturduğu toplam etkiyi başarılı bir şekilde sönümlediğini göstermektedir.

Tablo 6.13. Senaryo 3 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik TID	Fuzzy TID
IAE	0,066775227905469	0,063573123723795
ISE	6,525498535993375e-04	5,614166891883344e-04
ITAE	1,963530221241422	1,847399498447078
ITSE	0,018074258309658	0,015189985719381

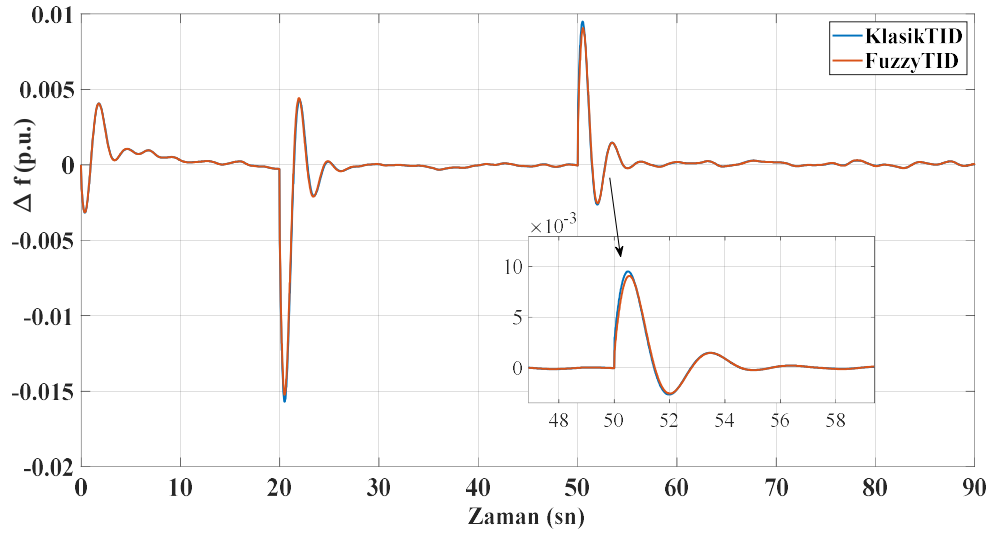
Benzer şekilde klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapıları için ISE performans indeks değerleri sırasıyla $6,525499 \times 10^{-4}$ ve $5,614167 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Bu düşüş yaklaşık olarak %13,97 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Tabloda verilen ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik TID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda 0,0180743 olarak hesaplanan değer fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0151900 düşmektedir. Diğer bir ifadeyle fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda, ITSE değerinde yaklaşık olarak %15,96 oranında bir iyileşme gerçekleşmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinin büyük genlik sapmalarına olan duyarlılığı göz önüne alınırsa, fuzzy TID kontrolör yapısının düşük YEK üretimi ve yüksek yük talebi işletme şartlarında HMŞ güç sisteminde büyük genlikli frekans sapmalarını daha iyi sönümlediği sonucuna ulaşılmaktadır.

HMŞ güç sistemi YFK yapısı için Senaryo 3'e ait tüm sonuçlar genel olarak ele alındığı zaman hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolör yapıları, sistemin frekans kararlılığını koruyabilmişlerdir. Ayrıca fuzzy TID kontrolör yapısı kullanılması halinde daha düşük performans indeks değerleri elde edilmiştir. Burada hem ITAE hem de ITSE performans

indeks değerlerindeki belirgin düşüş, sistemde meydana gelen uzun süreli ve kalıcı frekans hataları ile büyük genlikli frekans hatalarını fuzzy TID kontrolörün daha iyi sönümlendirdiğini göstermektedir.

6.3.4. Dördüncü Senaryo

Önerilen HŞ güç sisteminin YFK'sı için oluşturulan Senaryo 4 koşulları altında, klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapılarının kullanılmasına ilişkin frekans değişimleri Şekil 6.13'te sunulmuştur. Bu senaryo için HŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği varsayılmıştır. Bu senaryonun amacı; HŞ güç sisteminde parametre değişimi meydana geldiği zaman, klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapılarının frekans kontrolündeki başarılarını karşılaştırmaktır. Senaryo 4 için YEK üretim miktarları ile yük talep miktarları, Senaryo 1'deki değerler ile aynı tutulmuştur. Şekil 6.13 incelendiğinde hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolör yapılarının HŞ güç sisteminin frekans kararlılığını korudukları görülecektir.



Şekil 6.13. Senaryo 4 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait frekansın zamana göre değişimi

Önerilen HŞ güç sisteminin YFK'sında kullanılan Klasik TID ile fuzzy TID kontrolör yapılarının Senaryo 4 altındaki performans indeks değerleri Tablo 6.14'te verilmiştir. Tablodaki veriler, fuzzy TID kontrolör yapısının bütün performans indeks ölçütlerinde daha düşük değerler verdiğini göstermektedir. IAE performans indeks değeri klasik TID

kontrolör için 0,0529364 olarak gerçekleştirirken fuzzy TID kontrolör yapısı kullanılması durumunda ise 0,0517101 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda IAE performans indeksi açısından sistemde %2,32 oranında bir iyileşme gerçekleşeceğine işaret etmektedir. ITAE performans indeks değerleri incelenirse, klasik TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda elde edilen değer 1,5025361 iken fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda 1,4669369 olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi ile sistemde %2,37 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Hem IAE hem de ITAE performans indeks değerlerindeki bu azalmalar, fuzzy TID kontrolör yapısının Senaryo 4 şartları altında HMŞ güç sistemindeki frekans değişimlerinin toplam etkisini klasik TID göre daha düşük seviyede tuttuğuna işaret etmektedir.

Tablo 6.14. Senaryo 4 için klasik TID ve fuzzy TID kontrolörlere ait performans indeksleri sonuçları

Kontrolör	Klasik TID	Fuzzy TID
IAE	0,052936425995356	0,051710133626812
ISE	2,934313603383006e-04	2,714957786877253e-04
ITAE	1,502536135906400	1,466936886309717
ITSE	0,007799065947700	0,007154992423519

Tabloda yer alan ISE performans indeks değeri, klasik TID kontrolör yapısının YFK yapısında tercih edilmesi durumunda $2,934314 \times 10^{-4}$ olarak görülürken fuzzy TID kontrolör yapısının YFK yapısında kullanılması durumunda bu değer $2,714958 \times 10^{-4}$ olduğu görülmektedir. Elde edilen bu iki değer, fuzzy TID kontrolör yapısının ISE performans indeksi açısından %7,48 oranında bir gelişme sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde ITSE performans indeks değerleri incelendiğinde, klasik TID kontrolörün kullanılması durumunda 0,0077991 olan indeks değeri fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda 0,0071550 olarak elde edilmiştir. ITSE performans indeks değerleri karşılaştırıldığında, HMŞ güç sistemi YFK yapısında fuzzy TID kontrolör yapısının tercih edilmesi durumunda yaklaşık olarak %8,26 oranında bir azalma meydana geldiği görülmektedir. ISE ve ITSE performans indeks değerlerinde meydana gelen azalmalar, fuzzy TID kontrolör yapısının sistemde meydana gelecek frekans sapmalarının maksimum aşma miktarlarını klasik TID kontrolör yapısına göre daha etkili bastırdığını göstermektedir.

Senaryo 4 için belirlenen çalışma şartlarında, HMS güç sistemi YFK'sı için elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hem klasik TID hem de fuzzy TID kontrolör yapılarının sistemin frekans kararlılığını koruduğu söylenebilir. Elde edilen performans indeks değerleri incelendiğinde ise fuzzy TID kontrolör yapısının kullanılması durumunda daha düşük değerler elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Burada IAE ile ITAE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy TID kontrolör kullanılması sonucu frekans değişimlerindeki sürekli hataların daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir. Benzer şekilde ISE ile ITSE performans indeks değerlerindeki düşüş, fuzzy TID kontrolörün frekans sapmalarındaki büyük genlikli aşırımları daha iyi sönümlendirildiğine işaret etmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, WTG, PV, DG, BESS, EV, EAC ve yük birimlerinden oluşan izole bir HMŞ'nin ikincil YFK yapısı incelenmiştir. HMŞ sisteminin ikincil YFK'sı için klasik PID, TID ve FOPID kontrolörler ile bu kontrolörlerin bulanık mantık içeren yapıları tasarlanmıştır. Klasik kontrolör parametrelerinin başlangıç değerleri KKO algoritması ile belirlenmiştir. Ayrıca bu klasik kontrolörlerin parametrelerini, çalışma koşullarına bağlı olarak dinamik biçimde ayarlamak için bulanık mantık içeren yapısı kullanılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan tüm kontrolör yapılarının HMŞ güç sisteminde performanslarını değerlendirmek amacıyla dört farklı çalışma senaryosu belirlenmiştir. Bu senaryoların ilkinde, YEK'lere bağlı üretim değerlerinin ve yük talebinin normal işletme şartlarında olduğu varsayılmıştır. İkinci senaryoda; YEK'lere bağlı üretim miktarlarının yüksek, yük talebinin ise yine normal işletme seviyesinde olduğu kabul edilmiştir. Üçüncü senaryoda; YEK'lere bağlı üretim miktarlarının az, yük talebinin ise fazla olduğu bir senaryo oluşturulmuştur. Dördüncü ve son senaryoda ise YEK'lere bağlı üretim ile yük talep miktarlarının normal işletme şartlarında olduğu fakat HMŞ sisteminde parametre değişimi meydana geldiği kabul edilmiştir.

Her bir klasik kontrol yapısı kendi bulanık mantık içeren yapısı ile karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Böylece üç temel kontrol yapısı için bulanık mantık kontrol yapısının HMŞ sistemlerinde YFK üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu nedenle analiz sonuçlarında klasik PID kontrolör sonuçları fuzzy PID kontrolör sonuçları ile klasik TID sonuçları fuzzy TID sonuçları ile klasik FOPID sonuçları ise fuzzy FOPID sonuçları ile dört senaryo için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

HMŞ sisteminin YFK'sında PID kontrolör yapısının kullanıldığı durum için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dört senaryonun tamamında fuzzy PID kontrolör yapısı klasik PID'ye göre frekans yanıtlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. IAE performans indeks değeri için Senaryo 1'de %2,74, Senaryo 2'de %2,48, Senaryo 3'te %7,93 ve Senaryo 4'te %3,13 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri için Senaryo 1'de

%2,62, Senaryo 2’de %2,16, Senaryo 3’te %7,31 ve Senaryo 4’te %3,06 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ISE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %6,32, Senaryo 2’de %7,25, Senaryo 3’te %2,17 ve Senaryo 4’te %2,76 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITSE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %8,76, Senaryo 2’de %8,88, Senaryo 3’te %4,84 ve Senaryo 4’te %4,40 oranında iyileşme gerçekleşmiştir.

HMŞ sisteminin YFK’sında FOPID kontrolör yapısının kullanıldığı durum için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dört senaryonun tamamında fuzzy FOPID kontrolör yapısı klasik FOPID’e göre frekans yanıtlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. IAE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %3,84, Senaryo 2’de %3,36, Senaryo 3’te %5,82 ve Senaryo 4’te %2,28 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %3,63, Senaryo 2’de %3,04, Senaryo 3’te %5,59 ve Senaryo 4’te %2,12 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ISE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %14,11, Senaryo 2’de %13,05, Senaryo 3’te %18,61 ve Senaryo 4’te %7,57 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITSE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %13,99, Senaryo 2’de %13,87, Senaryo 3’te %17,97 ve Senaryo 4’te %7,43 oranında iyileşme gerçekleşmiştir.

HMŞ sisteminin YFK’sında TID kontrolör yapısının kullanıldığı durum için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dört senaryonun tamamında fuzzy TID kontrolör yapısı klasik TID’ye göre frekans yanıtlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. IAE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %3,45, Senaryo 2’de %3,31, Senaryo 3’te %4,80 ve Senaryo 4’te %2,32 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITAE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %4,01, Senaryo 2’de %3,35, Senaryo 3’te %5,91 ve Senaryo 4’te %2,37 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ISE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %10,04, Senaryo 2’de %10,83, Senaryo 3’te %13,97 ve Senaryo 4’te %7,48 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. ITSE performans indeks değeri için Senaryo 1’de %11,26, Senaryo 2’de %12,20, Senaryo 3’te %15,96 ve Senaryo 4’te %8,26 oranında iyileşme gerçekleşmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular, HMŞ sistemlerin YFK’sı için üç temel kontrolör yapısında bulanık mantık içeren yapıların farklı işletme koşulları altında klasik yapılara göre daha etkin sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Sonraki çalışmalarda aşağıdaki hususların dikkate alınması önerilmektedir.

İlk olarak, bu çalışmada incelenen HMŞ güç sisteminin YFK'sında kullanılan kontrolör yapılarının OPAL-RT gibi gerçek zamanlı benzetim platformları üzerinde test edilmesi önerilmektedir. Böylece kontrolör yapılarının hesaplama ve haberleşme gecikmeleri ile ölçüm gürültüsü gibi gerçek zamanlı davranışlarının analizi mümkün olacaktır.

İkinci olarak BESS, EV ve EAC sistemlerine ait ayrıntılı modeller gerçekleştirilebilir. Tasarlanacak olan ayrıntılı modeller yardımı ile BESS sistemlerin şarj deşarj durumları, EV ve EAC sistemlerin park süreleri, şarj süreleri ve kullanım süreleri dikkate alınarak daha detaylı bir enerji yönetimi ve frekans kontrolü gerçekleştirilebilir.

Üçüncü olarak YEK'lere bağlı üretim değerlerinin oluşturulmasında gerçek rüzgar, güneş ışığı ve yük verileri kullanılabilir. Buna bağlı olarak daha gerçekçi işletme koşulları oluşturularak kontrolör yapılarının frekans yanıt performans analiz işlemleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

Abdelfattah, H., Aseeri, A. O., and Abd Elaziz, M. (2024). Optimized FOPID controller for nuclear research reactor using enhanced planet optimization algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 97, 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.04.021>.

Al-Dhaifallah, M., Kanagaraj, N., and Nisar, K. S. (2018). Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Fractional Model of Pneumatic Pressure System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/5478781>.

Alizadeh, M., Tightiz, L., and Azimi Nasab, M. (2024). Providing an Intelligent Frequency Control Method in a Microgrid Network in the Presence of Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 15(7), 276. <https://doi.org/10.3390/wevj15070276>.

Alruwaili, M., and Cipcigan, L. (2022). Optimal Annual Operational Cost of a Hybrid Renewable-Based Microgrid to Increase the Power Resilience of a Critical Facility. *Energies*, 15(21), 8040. <https://doi.org/10.3390/en15218040>.

Anderson, P. M., and Fouad, A. A. (2003). *Power System Control and Stability*. IEEE Press.

Andic, C., Turkey, B., and Ozturk, A. (2025). Sled Dog Optimization Algorithm Based PID/TID Controller for Load Frequency Control in Interconnected Power Systems. *2025 5th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECET63943.2025.11472493>.

Azeem, O., Ali, M., Abbas, G., Uzair, M., Qahmash, A., Algarni, A., and Hussain, M. R. (2021). A Comprehensive Review on Integration Challenges, Optimization Techniques and Control Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid. *Applied Sciences*, 11(14), 6242. <https://doi.org/10.3390/app11146242>.

Babatunde, O. M., Munda, J. L., and Hamam, Y. (2020). A Comprehensive State-of-the-Art Survey on Hybrid Renewable Energy System Operations and Planning. *IEEE Access*, 8, 75313–75346. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988397>.

Bai, Y., and Wang, D. (n.d.). Fundamentals of Fuzzy Logic Control — Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. In *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications* (pp. 17–36). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4_2.

Bak, I., Spoz, A., Ziolo, M., and Dylewski, M. (2021). Dynamic Analysis of the Similarity of Objects in Research on the Use of Renewable Energy Resources in European Union Countries. *Energies*, 14(13), 3952. <https://doi.org/10.3390/en14133952>.

Bansal, H. O., Sharma, R., and Shreeraman, P. R. (2012). PID controller tuning techniques: a review. *Journal of Control Engineering and Technology*, 2(4), 168–176.

Bevrani, H. (2014). *Robust Power System Frequency Control*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07278-4>.

Buvarp, D., Syrén, L., Lindberg, M., Oliveira, J., and Leijon, J. (2026, February 28). *Resilient Microgrid with Electric Aircraft Charging at a Regional Airport in Sweden*. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-12106>.

Carrillo-Perez, F., Pecho, O. E., Morales, J. C., Paravina, R. D., Della Bona, A., Ghinea, R., et al., Herrera, L. J. (2022). Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(1), 259–280. <https://doi.org/10.1111/jerd.12844>.

Chen, G., Li, Z., Zhang, Z., and Li, S. (2020). An Improved ACO Algorithm Optimized Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control in Multi Area Interconnected Power Systems. *IEEE Access*, 8, 6429–6447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960380>.

Colson, C. M., Nehrir, M. H., and Wang, C. (2009). Ant colony optimization for microgrid multi-objective power management. *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4840070>.

Debbarma, S., Saikia, L. C., and Sinha, N. (2013). AGC of a multi-area thermal system under deregulated environment using a non-integer controller. *Electric Power Systems Research*, 95, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.09.008>.

Doctor, F., Budd, T., Williams, P. D., Prescott, M., and Iqbal, R. (2022). Modelling the effect of electric aircraft on airport operations and infrastructure. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, 121553. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121553>.

Doğan, G. (2022). *biyoyenilenebilir enerji tabanlı mikro şebekenin yük frekansı kontrolü için bulanık pid kontrolör*. Bingöl Üniversitesi.

Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>.

- Ela, E., and O'Malley, M. (2012). Studying the Variability and Uncertainty Impacts of Variable Generation at Multiple Timescales. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(3), 1324–1333. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2185816>
- Erdiwansyah, Mahidin, Husin, H., Nasaruddin, Zaki, M., and Muhibbuddin. (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3>.
- Esmat, A., Magdy, A., ElKhattam, W., and ElBakly, A. M. (2013). A novel Energy Management System using Ant Colony Optimization for micro-grids. *2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPECS.2013.6713023>.
- Goh, H. H., Suo, W., Liang, X., Zhang, D., Dai, W., Kurniawan, T. A., and Goh, K. C. (2024). An adaptive energy management strategy for airports to achieve carbon neutrality by 2050 via waste, wind, and solar power. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1365650>.
- Guo, Z., Zhang, X., and Zhang, R. (2021). A multi-agent microgrid energy management solution for air transport electrification. *IET Conference Proceedings*, 2021(5), 318–324. <https://doi.org/10.1049/icp.2021.2351>.
- Guo, Zekun, Li, B., Taylor, G., and Zhang, X. (2023). Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles. *ETransportation*, 17, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100257>.
- Han, J. (2025). *Enhanced frequency control in future low-inertia power systems based on digital twins of distributed energy resources* (University of Strathclyde). University of Strathclyde. <https://doi.org/10.48730/z1kt-h104>.
- Haydaroğlu, C. (2025). Chaos-based optimization for load frequency control in Islanded airport microgrids with hydrogen energy and electric aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 143, 1198–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.174>.
- Hekimoğlu, B. (2019). Böbrek-ilhamlı Algoritma ile Ayarlanan PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız Kontrolü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 652–663. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.496782>.
- Hernández-Mayoral, E., Madrigal-Martínez, M., Mina-Antonio, J. D., Iracheta-Cortez, R., Enríquez-Santiago, J. A., Rodríguez-Rivera, O., et al., Mendoza-Santos, E. (2023). A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources. *Sustainability*, 15(12), 9847. <https://doi.org/10.3390/su15129847>.

Holmblad, L. P., and Ostergaard, J.-J. (1981). Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic Techniques. *IFAC Proceedings Volumes*, 14(2), 809–814. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)63582-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)63582-1).

Ingleson, J. W., and Allen, E. (2010). Tracking the Eastern Interconnection frequency governing characteristic. *IEEE PES General Meeting*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589872>.

Jaleeli, N., VanSlyck, L. S., Ewart, D. N., Fink, L. H., and Hoffmann, A. G. (1992). Understanding automatic generation control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1106–1122. <https://doi.org/10.1109/59.207324>.

Kandari, R., Neeraj, N., and Micallef, A. (2022). Review on Recent Strategies for Integrating Energy Storage Systems in Microgrids. *Energies*, 16(1), 317. <https://doi.org/10.3390/en16010317>.

Kerdphol, T., Rahman, F. S., Watanabe, M., and Mitani, Y. (2021). *Fundamental Concepts of Inertia Power Compensation and Frequency Control*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57961-6_2.

Khokhar, B., Dahiya, S., and Parmar, K. P. S. (2021). A Novel Hybrid Fuzzy PD-TID Controller for Load Frequency Control of a Standalone Microgrid. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1053–1065. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04761-7>.

Kılıç, E., and Özdemir, M. T. (2019). Güç Sistemlerindeki Optimum Otomatik Gerilim Regülasyonu için Çoklu Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.24012/dumf.396192>.

Kumar, N., Tyagi, B., and Kumar, V. (2017). Deregulated Multiarea AGC Scheme Using BBBC-FOPID Controller. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(7), 2641–2649. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2293-1>.

Kundur, P. (1994). *Power System Control and Stability* (First). New York: McGraw-Hill College.

Lei, T., Du, J., Li, R., and Gao, Q. (2022). Real-Time Simulation-Based Energy Management of Airport Microgrid for Electric Aircraft. *2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/POWERCON53406.2022.9930083>

Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., and Madureira, A. G. (2006). Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 916–924. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873018>.

Lurie, B. J. (1994). *Patent No. Us-Patent-Appl-Sn-023253*.

Ma, F., Wang, C., Zhu, B., Ge, J., Zhang, F., and Sun, J. (2025). An Improved Chaos Particle Swarm Optimization Approach in FOPID Controller for Microbial Fuel Cells. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21(5), 3890–3900. <https://doi.org/10.1109/TII.2025.3529922>.

Machowski, J., Bialek, J. W., and Bumby, J. R. (2008). Power System Dynamics: Stability and Control. In *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/6>.

Maji, A., Biswas, S., Roy Chowdhury, S. B., Chattopadhyaya, A., Saha, S., and Banerjee, S. (2025). A Comparative Study of PID, FOPID, and TID Controllers Using Harris Hawk Optimization for Load Frequency Control of Renewable Energy Grids in Deregulated Environments. *2025 7th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, 118–123. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISPCC66872.2025.11039571>.

Mamdani, E. H., and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).

Minja, M., and Mushi, A. (2023). Design of International Airport Hybrid Renewable Energy System. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, 42(1), 46–57. <https://doi.org/10.52339/tjet.v42i1.887>.

Monje, C. A., Chen, Y., Vinagre, B. M., Xue, D., and Feliu, V. (2010). *Fractional-order Systems and Controls*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-335-0>.

Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Davoodkhani, I. F., Kamyab, H., and Ali, R. R. (2021). Load-frequency control in an islanded microgrid PV/WT/FC/ESS using an optimal self-tuning fractional-order fuzzy controller. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 71677–71688. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14799-1>.

Naorem, R. B., Das, D. C., and Roy, P. (2025). Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient-Based Load Frequency Control for Interconnected Hybrid Microgrids With Renewable Energy Integration Using a Tilt–Integral–Derivative Controller. *Artificial Intelligence for Engineering*, 1(2), 95–116. <https://doi.org/10.1049/aie2.70006>.

Ortega Alba, S., and Manana, M. (2017). Characterization and Analysis of Energy Demand Patterns in Airports. *Energies*, 10(1), 119. <https://doi.org/10.3390/en10010119>.

Öztürk, D., Yıldırım, B., and DOĞAN, G. (2022). Biyoyenilenebilir Enerji Tabanlı Mikro Şebekenin Yük Frekansı Kontrolü İçin Fuzzy PID Kontrolör. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 3(2), 206–224. <https://doi.org/10.55546/jmm.1105012>.

Paramati, S. R., Sinha, A., and Dogan, E. (2017). The significance of renewable energy use for economic output and environmental protection: evidence from the Next 11 developing economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13546–13560. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8985-6>.

Patel, S., Mohanty, B., and Hasanien, H. M. (2020). Competition over resources optimized fuzzy TIDF controller for frequency stabilization of hybrid micro-grid system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(9). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12513>.

Paz, R. A. (2001). The design of the PID controller. *Klipsch School of Electrical and Computer Engineering*, 8, 1–23.

Rai, A., and Das, D. K. (2022). The development of a fuzzy tilt integral derivative controller based on the sailfish optimizer to solve load frequency control in a microgrid, incorporating energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 48, 103887. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103887>

Rajesh, K. S., Dash, S. S., Rajagopal, R., and Sridhar, R. (2017). A review on control of ac microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(January), 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.106>.

Raslan, A. A., Aly, M., Mohamed, E. A., Alhosaini, W., Ahmed, E. M., Nasrat, L. S., and Said, S. M. (2025). Optimized Non-Integer with Disturbance Observer Frequency Control for Resilient Modern Airport Microgrid Systems. *Fractal and Fractional*, 9(6), 354. <https://doi.org/10.3390/fractalfract9060354>.

Raya-Armenta, J. M., Bazmohammadi, N., Avina-Cervantes, J. G., Sáez, D., Vasquez, J. C., and Guerrero, J. M. (2021). Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111327>.

Rebours, Y. G., Kirschen, D. S., Trotignon, M., and Rossignol, S. (2007). A Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services—Part I: Technical Features. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 350–357. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888963>.

Shayeghi, H., Davoudkhani, I. F., and Bizon, N. (2024). Robust self-adaptive fuzzy controller for load-frequency control of islanded airport microgrids considering electric aircraft energy storage and demand response. *IET Renewable Power Generation*, 18(4), 616–653. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12926>.

Singh, K., and Arya, Y. (2023). Tidal turbine support in microgrid frequency regulation through novel cascade Fuzzy-FOPID droop in de-loaded region. *ISA Transactions*, 133, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.07.010>.

Singh, S., Singh, V. P., and Mathur, A. (2025). ISE-Tuned Control for Frequency Regulation of Renewable-Integrated Airport Microgrid. *2025 IEEE 4th International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/STPEC66316.2025.11490594>.

Singh, S., Singh, V. P., Mathur, A., Bashishtha, T. K., Padmanaban, S., and Varshney, T. (2025). Airport microgrid control using integral-of-absolute-error having high renewable penetration. *Scientific Reports*, 15(1), 23550. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04820-9>.

Sompolska-Rzechuła, A., Bąk, I., Becker, A., Marjak, H., and Perzyńska, J. (2024). The Use of Renewable Energy Sources and Environmental Degradation in EU Countries. *Sustainability*, 16(23), 10416. <https://doi.org/10.3390/su162310416>.

Sondhi, S., and Hote, Y. V. (2014). Fractional order PID controller for load frequency control. *Energy Conversion and Management*, 85, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.091>.

Sreenath, S., Sudhakar, K., A.F., Y., Solomin, E., and Kirpichnikova, I. M. (2020). Solar PV energy system in Malaysian airport: Glare analysis, general design and performance assessment. *Energy Reports*, 6, 698–712. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.015>.

Sreenath, S., Sudhakar, K., and Yusop, A. F. (2020). Solar photovoltaics in airport: Risk assessment and mitigation strategies. *Environmental Impact Assessment Review*, 84, 106418. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106418>.

Stavriniadis, S., Zacharia, P., and Xidias, E. (2025). A Fuzzy Control Strategy for Multi-Goal Autonomous Robot Navigation. *Sensors*, 25(2), 446. <https://doi.org/10.3390/s25020446>.

Stuart Bennett. (1993). Development of the PID controller. *IEEE Control Systems*, 13(6), 58–62. <https://doi.org/10.1109/37.248006>.

Tang, K. S., Kim Fung Man, Guanrong Chen, and Kwong, S. (2001). An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4), 757–765. <https://doi.org/10.1109/41.937407>.

Tang, Z., Liu, J., Shen, H., and Zeng, P. P. (2022). Heterogeneous energy storage system scheduling strategy for low carbon airport oriented microgrid. *Energy Reports*, 8, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.154>.

Topno, P. N., and Chanana, S. (2015). Tilt Integral Derivative control for two-area load frequency control problem. *2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453361>.

Trainelli, L., Salucci, F., Riboldi, C. E. D., Rolando, A., and Bigoni, F. (2021). Optimal Sizing and Operation of Airport Infrastructures in Support of Electric-Powered Aviation. *Aerospace*, 8(2), 40. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020040>.

Türk, İ., Kılıç, H., Haydaroglu, C., and Top, A. (2025). Robust Load Frequency Control in Hybrid Microgrids Using Type-3 Fuzzy Logic Under Stochastic Variations. *Symmetry*, 17(6), 853. <https://doi.org/10.3390/sym17060853>.

Van Oosterom, S., and Mitici, M. (2023). Optimizing the battery charging and swapping infrastructure for electric short-haul aircraft—The case of electric flight in Norway. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 155, 104313. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104313>.

Varshney, T., Patnana, N., and Singh, V. P. (2025). Enhanced Frequency Regulation of Islanded Airport Microgrid Using IAE-Assisted Control with Reaction Curve-Based FOPDT Modeling. *Inventions*, 10(5), 88. <https://doi.org/10.3390/inventions10050088>.

Verdugo, P., Cañizares, C., and Pirnia, M. (2025). Modeling and energy management of hangar thermo-electrical microgrid for electric plane charging considering multiple zones and resources. *Applied Energy*, 379, 124951. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124951>.

Wang, X., Atkin, J., Bazmohammadi, N., Bozhko, S., and Guerrero, J. M. (2021). Optimal Load and Energy Management of Aircraft Microgrids Using Multi-Objective Model Predictive Control. *Sustainability*, 13(24), 13907. <https://doi.org/10.3390/su132413907>.

Yakout, A. H., Kotb, H., Hasanien, H. M., and Aboras, K. M. (2021). Optimal Fuzzy PIDF Load Frequency Controller for Hybrid Microgrid System Using Marine Predator Algorithm. *IEEE Access*, 9, 54220–54232. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070076>.

Yildirim, B., Gheisarnejad, M., and Khooban, M. H. (2021). A Robust Non-Integer Controller Design for Load Frequency Control in Modern Marine Power Grids. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2021.3114735>.

Yıldırım, B., Ozdemir, M. T., and Eke, I. (2019). Design of Integer Order Approximation Fractional Order Controller with for Automatic Voltage Regulation System. *2019 4th International Conference on Power Electronics and Their Applications (ICPEA)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPEA1.2019.8911137>.

Yildirim, B. (2020). Gain and Phase Margins based Stability Region Analysis of Time-Delayed Shipboard Microgrid with Sea Wave Energy. *IET Electric Power Applications*. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0762>.

Yıldız, S. (2025). *İzole mikroşebekelerde frekans regülasyonu için gerçek zamanlı uyarlamalı kontrol stratejileri*. Firat University.

Yıldız, S., Gunduz, H., Yildirim, B., and Özdemir, M. T. (2023). An innovative LFC scheme for multi-area microgrid incorporating with hydrogen-based demand response mechanism. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.278>.

Yun, H.-Y., Jeong, S.-J., and Kim, K.-S. (2013). Advanced Harmony Search with Ant Colony Optimization for Solving the Traveling Salesman Problem. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/123738>.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Zhang, X., Wang, D., Yu, T., Xu, Z., and Fan, Z. (2018). Ensemble learning for optimal active power control of distributed energy resources and thermostatically controlled loads in an islanded microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(49), 22474–22486. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.062>.

Znati, I., Ferfra, M., Bouaddi, A., and Chehaibi, N. I. (2025). TID Controller for Load Frequency Control in Multi-Area Interconnected Systems with High Renewable Energy Penetration Using an Improved Grey Wolf Algorithm. *2025 5th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 1–8. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRASET64571.2025.11008173>.