

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

**DAĞITILMIŞ ENERJİ KAYNAKLARININ VE MİKRO
ŞEBEKELERİN UYARLAMALI VE HESAPLAMALI
ZEKÂ DENETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Tariq KAMAL

Enstitü Anabilim Dalı	:	ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı	:	ELEKTRİK
Tez Danışmanı	:	Doç. Dr. Murat KARABACAK
Ortak Danışmanı	:	Doç. Dr. Luis M. Fernández RAMÍREZ

Haziran 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAĞITILMIŞ ENERJİ KAYNAKLARININ VE MİKRO
ŞEBEKELERİN UYARLAMALI VE HESAPLAMALI
ZEKÂ DENETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Tariq KAMAL

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 30 / 06 /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Ali FUAT BOZ
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.
Murat KARABACAK
Üye**

**Prof. Dr.
Murat KALE
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Ahmet KÜÇÜKER
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Burhan BARAKLI
Üye**

BEYAN

Tez içindeki kullanılan tüm materyal ve yöntemlerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan geliştirildiğini beyan ederim. Bu tezde kullanılan tüm şekiller, metinler ve sonuçlar akademik ve etik kurallara uygundur. Tezde herhangi bir yanlış beyan yoktur ve başkalarının çalışmaları kullanılmamıştır. Bu tezde verilen bilgiler orijinal olup başka bir tezde kullanılmamıştır.

Tariq KAMAL

30.06.2022

TEŞEKKÜR

Öncelikle tezin tasarımında bana yardımcı olan değerli danışmanım Doç. Dr. Murat Karabacak'a teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) teşekkür ederim. Bu tez çalışması, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi bünyesinde bulunan Güç Elektroniği Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından desteklenmiştir. Destekleri için ilgili Merkeze teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	i
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	i
ŞEKİLLER LİSTESİ	iii
TABLolar LİSTESİ	v
ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon.....	2
1.2. Araştırmanın Problem İfadesi.....	3
1.3. Amaçlar	4
1.4. Araştırma Metodolojisi.....	5
1.5. Tez Yapısı	5
BÖLÜM 2.	
GÜNEŞ PV SİSTEMLERİNİN UYARLAMALI DENETİMİ	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. PV Güneş Sistemin Tanımı ve Panelin Çalışma İlkesi.....	10
2.3. PV'in Çevrimiçi Uyarlamalı Denetimi	12
2.4. Uyarlamalı B-spline Sinirsel Bulanık Denetimcisinin Yapısı	13
2.4.1. Sinirsel bulanık B-spline'ın yapısı.....	15
2.4.2. Parametrelerin güncelleme kuralları	18
2.5. Lyapunov Kararlılık Analizi.....	20
2.6. Simülasyonlar ve Tartışma	22

2.7. Sonuçlar.....	26
 BÖLÜM 3.	
SOFC SİSTEMİNİN UYARLAMALI DENETİMİ	27
3.1. Giriş.....	27
3.2. Sistemin Açıklaması ve Denetimi	30
3.2.1. SOFC sisteminin dinamik modellemesi.....	31
3.2.2. Elektrolizör (ELZ) modeli.....	32
3.2.3. Kompresör ve hidrojen tankı modeli.....	33
3.3. SOFC'in Çevrimiçi Uyarlamalı Dalgacık Tabanlı Denetimi	34
3.3.1. Uyarlamalı kontrol ile parametreler güncelleme.....	38
3.4. Tartışma ve Simülasyonlar	39
3.4.1. Sabit akım ve değişken gerilim (durum 1).....	39
3.4.2. Sabit gerilim ve değişken akım (durum 2).....	46
3.5. Sonuçlar.....	49
 BÖLÜM 4.	
MİKRO ŞEBEKENİN ENERJİ YÖNETİMİ VE DENETİMİ.....	50
4.1. Giriş.....	50
4.2. Temel Alınan Mikro Şebekenin Yapısı.....	52
4.3. Mikro Şebekenin Çalışma Prensipleri ve Denetimi	52
4.3.1. PV model ve denetimi	52
4.3.2. SOFC modeli ve denetimi	53
4.3.3. ELZ modeli ve denetimi.....	53
4.3.4. Hidrojen tankı modeli.....	54
4.3.5. Batarya denetimi	54
4.3.6. Şebeke bağlantılı eviricinin denetimi.....	54
4.4. EMSCS'nin Çalışması	61
4.4.1. EMSCS sonuçları ve tartışması.....	63
4.5. Sonuçlar.....	69

BÖLÜM 5.

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	70
5.1. Sonuçlar.....	70
5.2. Gelecek Çalışmalar	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ	86



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABNFC	: Uyarlamalı B-spline sinirsel bulanık denetimci
ALWNF	: Uyarlamalı Legendre dalgacık sinirsel bulanık
DG	: Dağıtık üretim
EVs	: Elektrikli araçlar
ELZ	: Elektrolizör
FC	: Yakıt hücresi
FL	: Bulanık mantık
FLC	: Bulanık mantık denetimcisi
GMPP	: Global maksimum güç noktası
GDBP	: Gradyan inişi geri yayımlı
HC	: Tepe tırmanışı
ISE	: İntegral kare hatası
ITAE	: İntegral zaman mutlak hatası
ITSE	: İntegral zaman karekök hatası
kWh	: Kilowatt saat
MGİ	: Maksimum güç noktası
MRE	: Ortalama görelî hatası
NN	: Sinir ağı
NFC	: Sinirsel bulanık denetimci
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
SMSM	: Sabit mıknatıslı senkron makine
PLL	: Faz kilitlemeli çevrim
PV	: Fotovoltaik
PHEVs	: Şarjlı hibrit elektrikli araç
PMS	: Güç yönetim sistemi

RES	: Yenilenebilir enerji kaynakları
SOFC	: Katı oksit yakıt hücresi
SoC	: Şarj durumu
THD	: Toplam harmonik bozulma



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. PV enerjisi sistemler	12
Şekil 2.2. PV'in B-spline denetim yöntemi	17
Şekil 2.3. B-spline ile NFC sisteminin yapısı	17
Şekil 2.4. Hava koşulları (ışınım ve sıcaklık)	23
Şekil 2.5. Farklı aralıklarda PV çıkış gücü	24
Şekil 2.6. İzleme hatası	24
Şekil 2.7. PV enerji dönüşüm verimliliği (%).....	25
Şekil 2.8. Performans indeksleri	25
Şekil 3.1. Güç sisteminin yapısı.....	30
Şekil 3.2. SOFC'in P-I ve V-I eğrileri	31
Şekil 3.3. SOFC'in önerilen denetim stratejisi	35
Şekil 3.4. Önerilen NFC yapısı	36
Şekil 3.5. Sabit akım (durum 1)	40
Şekil 3.6. SOFC'in farklı denetimcilerle çıkış gerilimi (durum 1).....	40
Şekil 3.7. Yakıt kullanımı (durum 1)	41
Şekil 3.8. Yakıt akışı (durum 1)	42
Şekil 3.9. AC bara güçleri (durum 1).....	42
Şekil 3.10. Dinamik performans karşılaştırmasının simülasyonu (durum 1).....	44
Şekil 3.11. Farklı denetimciler kullanarak SOFC'in verimliliği (durum 1)	44
Şekil 3.12. Değişken akım (durum 2)	44
Şekil 3.13. SOFC'nin farklı denetimcilerle çıkış gerilimi (durum 2).....	45
Şekil 3.14. Yakıt kullanımı (durum 2)	45
Şekil 3.15. Yakıt akışı (durum 2)	45
Şekil 3.16. AC bara güçleri (durum 2).....	45
Şekil 3.17. AC bara güçleri (durum 2).....	48
Şekil 3.18. Dinamik performans karşılaştırmasının simülasyonu (durum 2).....	48

Şekil 3.19. Farklı denetimciler kullanarak SOFC'in verimliliği (durum 2)	48
Şekil 4.1. Temel alınan mikro şebekenin yapısı	52
Şekil 4.2. PV P-V ve I-V eğrileri	53
Şekil 4.3. Batarya denetimci	54
Şekil 4.4. ANFJW denetimcisinin yapısı	55
Şekil 4.5. Temel alınan stratejinin çalışması.....	58
Şekil 4.6. EMSCS'nin akış şeması	62
Şekil 4.7. Hava koşulları verileri (a) güneş ışıması ve (b) sıcaklık.....	63
Şekil 4.8. Enerji kaynakları arasında güç alışverişi ve paylaşımı	64
Şekil 4.9. Bataryanın şarj durumu.....	64
Şekil 4.10. Aktif güç (a-b) ANFJW, (c-d) NFC, (e-f) FLC, (g-h) PID.....	65
Şekil 4.11. Reaktif güç (a-b) ANFJW, (c-d) NFC, (e-f) FLC, (g-h) PID	66
Şekil 4.12. THD karşılaştırması	66
Şekil 4.13. Frekanstaki değişimin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.14. Güç verimliliği (a, c, e, g) aktif ve (b, d, f, h) reaktif güç.....	67
Şekil 4.15. Dinamik aktif güç performans	68
Şekil 4.16. Dinamik reaktif güç performans	68

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. PV çıkış gücü verimliliklerinin ve performans endekslerinin özeti	25
Tablo 3.1. Sabit akım ve değişken gerilimin ayrıntılı verileri (durum 1)	43
Table 3.2. SOFC sisteminin verimliliği ve dinamik yanıtın (p.u) (durum 1).....	44
Tablo 3.3. Sabit akım ve değişken gerilimin ayrıntılı verileri (durum 2)	47
Tablo 3.4. SOFC sisteminin verimliliği ve dinamik yanıtın (p.u) (durum 2)	48
Tablo 4.1. Sistem parametreleri	61
Tablo 4.2. Verimleri ve dinamik tepki karşılaştırması.....	68

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Uyarlamalı denetim, yüksek dereceli kayan kipli denetim, geliştirilmiş sinirsel bulanık denetim, dalgacıklar, B-spline fonksiyonu(eğrisi), mikro şebeke, fotovoltaik, dağıtılmış enerji kaynakları

Modern elektrik güç dağıtım sistemleri, evsel ve endüstriyel yüklerin artan elektrifikasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, fotovoltaik güneş, yakıt hücresi, hidro elektrik santraller) ve ulaşımın (elektrikli araçlar) artan entegrasyonu ile daha karmaşık ve zor yönetilebilir hale gelmektedir. Güç taleplerinin aralıklı doğası ve yenilenebilir enerji kaynakları güç dağıtım sistemlerini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bu tez çalışmasında bu ana soruna çözüm önerisi olarak, mikro şebekelerin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (fotovoltaik güneş panelleri, ve yakıt hücresi) gerçek zamanlı denetimi ve enerji yönetimi için yapay zekâ tabanlı, dayanıklı ve uyarlamalı denetim sistemleri geliştirmek amaçlanmaktadır.

Fotovoltaik güneş panellerinin için yeni bir uyarlamalı sinirsel bulanık maksimum güç izleme yöntemi, B-spline fonksiyonları ile elde edilmektedir. B-spline fonksiyonları ile fotovoltaik güneş panellerinin performansı, dönüşüm verimliliği ve dinamik cevabı açısından önemli ölçüde iyileşmiştir. Fotovoltaik güneş panellerinin dönüşüm verimliliği %17.14 civarında artmıştır. Bu tezin bir diğer önemli katkısı da katı oksit yakıt hücresinin denetimi olmuştur. Katı oksit yakıt hücresi sisteminin için uyarlamalı dalgacık tabanlı denetim yöntemi önerilmiştir. Önerilen denetim diğer klasik denetimlere kıyasla çıkış gerilimi, yakıt kullanımı, yakıt akışı, dönüşüm verimliliği ve geçici ve sabit durum yanıtı açısından daha iyi performans sağlamaktadır. Katı oksit yakıt hücresi sisteminin önerilen denetim ile dönüşüm verimliliği %5.04 civarında artmıştır.

Mikro şebekelerde enerji yönetimine dair ise bir uyarlamalı sinirsel bulanık denetim yöntemi tasarlanmıştır. Çalışılan enerji yönetim sistemi, 24 saat boyunca yük gereksinimlerini karşılamak için mikro şebeke sistem bileşenleri arasında güç akışını ve güç paylaşımını yönetmiştir. Sonuç olarak, fotovoltaik güneş panellerinin ve yakıt hücrelerinin maksimum güç izleme performansı artırılmış ve aynı şartlar altında daha fazla enerji üretimi sağlanarak verim artırılmıştır.

ADAPTIVE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE CONTROL OF DISTRIBUTED ENERGY SOURCES AND MICROGRIDS

SUMMARY

Keywords: Adaptive control, higher order sliding mode control, improved neuro-fuzzy control, wavelets, B-spline function, microgrid, distributed energy resources

The expanding electrification of domestic and industrial loads, as well as the penetration of renewable energy sources (such as wind, solar, fuel cell, and hydroelectric power plants), as well as transportation (electric vehicles), provide challenges to today's electrical power distribution systems. The intermittent nature of power demands and renewable energy sources make a complex distribution power system. The objective of this thesis is to develop artificial intelligence-based, robust, and adaptive control systems for real-time control of renewable energy sources (photovoltaic solar panels and fuel cell) and microgrids.

A new adaptive neural fuzzy maximum power tracking technique for photovoltaic solar panels is designed with B-spline functions. With B-spline functions, the performance of photovoltaic solar panels is significantly improved in terms of conversion efficiency and dynamic response. The conversion efficiency of photovoltaic solar panels is increased by around 17.14%. Another important contribution of this thesis is the control of the solid oxide fuel cell. An adaptive wavelets control is developed for the solid oxide fuel cell system. The proposed controller provides better performance in terms of output voltage, fuel utilization, fuel flow, conversion efficiency, and dynamic response as compared to conventional controllers. The conversion efficiency of solid oxide fuel cell is increased by around 5.04% with the proposed controller.

Finally, an adaptive neural fuzzy based control technique is designed for energy management in microgrids. The proposed energy management system managed power flow and power sharing among microgrid system's components to meet the load requirements for 24 hours. Consequently, the maximum power tracking performance and the performance of photovoltaic solar panels, and fuel cells are increased with the solutions developed in this thesis, as well as efficiency under the same operating conditions.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Küresel iklim değışikliğı, yüksek karbon fiyatı, olumsuz çevresel etkiler, artan enerji talebi, düşük bakım ve artan sanayileşme gibi endişeler nedeniyle yenilenebilir enerjiye küresel geçiş hızla büyümeaktadır. Küresel olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretim payı 2020 yılında %28'e yükselmiştir [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2050 yılına kadar dünya enerji tüketimini %70 oranında karşılaması beklenmektedir [2]. Birçok avantajları olsa da yenilenebilir enerji üretiminin yaygınlaştırılmasında teknik sorunlar bulunmaktadır. Fotovoltaik (PV) güneş ve rüzgârın son derece değışken, denetim edilemez ve aralıklı doğası, güç sistemlerinde kararlılık sorunlarına ve tutarsızlıklara neden olur. PV güneş ve rüzgâra dayalı enerji üretiminde elde edilen elektrik enerjisi, yerel hava durumu (sıcaklık, bulutlar, güneş ışınlımı), rüzgâr hızı ve toz gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle, güvenilirliği artırmak ve dağıtılmış güç üretiminin entegrasyonu için mikro şebeke kavramı ortaya çıkmıştır. Mikro şebeke, bir grup yerel enerji kaynağı, enerji depolama sistemi ve yükün ana şebekeyle senkronize edilmesiyle oluşur.

Genel olarak, bir mikro şebeke sistemi batarya, volanlar, yakıt hücreleri ve Ultra-kapasitör (UC) gibi enerji depolama desteğı olan rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinden oluşur. Enerji depolamanın işlevi, enerji fazlasını depolamak ve aşırı enerji talebi sırasında ek güç sağlayarak sistemin güvenilirliğini artırmaktır [3]. Mikro şebeke sisteminin diğer avantajları arasında yüksek güvenilirlik, düşük maliyet ve geliştirilmiş güç kalitesi avantajları sayılabilir. Bununla birlikte, mikro şebeke sistemlerinin denetiminde gelişime açık ve literatürde sıcak önemli noktalar vardır. Bunlardan ilki Maksimum Güç İzleme (MGİ) performansının artırılarak, aynı şartlar altında elektrik enerjisi üretimini artırmak yani verimliliğı artırmaktır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin gerçek zamanlı denetimi ve mikro şebekelerde enerji yönetimi diğer en önemli güncel çalışma alanlarıdır [3-11].

Mikro şebeke sistemlerinin çalışması, denetim yöntemlerinin seçimine bağlıdır. Uygun yöntemler verimliliği artırarak kWh enerji maliyetini azaltır. Uygun denetim yöntemleri olmadan mikro şebeke sistemleri, gerilim dalgalanmaları, güç kalitesi, frekans dalgalanmaları, elektromanyetik girişim, karasızlık ve yüksek Toplam Harmonik Bozulma (THD) gibi birçok yöntem sorunlarla karşı karşıya kalır [4].

Doğrusaldan, doğrusal olmayana, sabit kazançlı denetimden uyarlamalı denetime, geleneksel yapay zekâ tabanlı denetimden sinirsel bulanık algoritmalara ve meta-sezgisele kadar birçok farklı denetim ve yöntemler araştırmacılar tarafından mikro şebeke ve depolama sistemleri için önerilmiştir [5-11]. Literatürde, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ve mikro şebekeler için geliştirilmiş çeşitli denetim yöntemlerinin incelemesi bulunmaktadır [12]. Benzer şekilde, hibrit yenilenebilir enerji ve mikro şebekeler sistemlerinde yüksek performans elde etmek için çeşitli enerji yönetimi ve denetim stratejileri, opti, maliyet optimizasyonu, güç paylaşımı, yük dağıtımı ve çizelgeleme araştırmacılar tarafından önerilmiştir [13-18]. Bu yöntemlerin birçoğu yenilenebilir enerji ve mikro şebekeler sistemlerine belirli bir dereceye kadar olumlu katkıda bulunmuştur, ancak aynı zamanda bazı sakıncaları da beraberinde getirmiştir. Takip eden başlıklarda, bu kısımda bahsedilen dinamikler açık şekilde ifade edilmiştir.

1.1. Motivasyon

Dünya nüfusunun sürekli artması ve endüstriyel gelişmeler, küresel enerji tüketiminde ve karbondioksit salımında benzeri görülmemiş miktarda sürekli artışa neden olmaktadır. Petrol ve doğal gazın tüketim oranı bir önceki yüzyıla göre 200 kat daha fazla büyümüştür. Bu yakıtların aşırı kullanımı, çevre kirliliğe neden olmaktadır ve iklim değişikliğinin önde gelen nedenlerinden sayılmaktadır. Değerli hammaddelerin ömrü göz önüne alındığında, yakın gelecekte yakıt sıkıntısı yaşanacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle dünya fosil yakıtlar yerine yeni ve alternatif enerji kaynakları arayışına girmiştir. Yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payının, 2021’de, sanayi devrimi’nin başlangıcından bu yana en yüksek payı alarak neredeyse %30’a çıkmış bulunmaktadır [19].

Tüm seçenekler arasında rüzgâr, güneş ve yakıt pili büyük ilgi görmektedir [13]. 2021’de PV elektrik enerjisi üretimi %18 artmıştır. Benzer şekilde rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerji 2020’de yaklaşık %17 büyüyerek en büyük yenilenebilir enerji üretim artışını kaydetme yolunda ilerlemiştir. Çeşitli araştırmalar, bir ülkenin sürekli ekonomik büyümesinin bu enerji kaynaklarının etkin kullanımına bağlı olduğunu göstermektedir [1, 19]. Dünya çapındaki birçok ülke, önemli yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeline sahiptir. Bir mikro şebeke sisteminde, PV güneş paneller, rüzgâr türbinleri ve Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) elektrik üretmek için en uygun güç kaynakları olarak görülmektedir. Ancak bu yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi gerçek zamanda en uygun denetim yöntemleri gerektirir. Bu motivasyon ile bu tez çalışması yapılmıştır ve sonuçlar ümit vericidir. Teknik ayrıntılara takip eden başlıklarda girilmiştir.

1.2. Araştırmanın Problem İfadesi

PV güneş panelleri ve yakıt piline dayalı enerji üretimi, temiz çevre, düşük karbon salımı, temiz enerji ve düşük maliyet gibi birçok üstünlük sunar. Bununla birlikte, bu enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde, enerji dönüşüm verimliliğini artırmak ve gerçek zamanlı denetim sistemlerini tasarlamak en önemli zorluklardan iki tanesidir. Bu bağlamda aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

- PV güneş panellerinin enerji dönüşüm verimliliği MGİ yöntemine güçlü şekilde bağlıdır. Maksimum güç uygun MGİ yöntemi kullanılarak yakalanabilir. Geleneksel MGİ yöntemleri, tek tip ışınım altında verimli bir şekilde çalışır, ancak performansları kısmi gölgelenme ve değişen hava koşullarında düşer. Bu algoritmalar, kısmi gölgelenmede genellikle yerel bir maksimuma takılır ve sonuç olarak düşük verimlilik ortaya çıkar. Bu yüzden kısmi gölgelenme ve değişken hava koşullarında PV güneş panellerinden maksimum güç elde etmek için MGİ yöntemlerinin geliştirilmesi gereklidir.
- Yakıt pilleri günümüz enerji sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Yakıt hücrelerinin dinamik performansı, örneğin SOFC, yükteki hızlı değişimler

altında yavaştır. Bu nedenle, SOFC'nin yüksek performanslı denetiminde yük takip sorunu bulunur.

1.3. Amaçlar

Bu doktora tezinin temel amacı, elektrik enerjisi şebekelerinin enerji verimliliğini, esnekliğini ve kararlılığını artıran ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu geliştiren mikro şebekelerdeki yenilenebilir enerji kaynakları için gelişmiş yapay zekâ ve uyarlamalı denetim dayalı yeni gerçek zamanlı denetim yöntemleri geliştirilmesidir.

Bu nedenle;

- Ortamdaki ve yükteki gerçek zamanlı dalgalanmayı dikkate alarak amaç fonksiyonunu maksimize eden ve hızlı takip eden yeni bir uyarlamalı denetimin bir PV güneş sistemi için tasarlanması gerekmektedir. B-spline MGİ yönteminin sonuçları geleneksel MGİ yöntemleri olan Artımlı İletkenlik (IC), ve geleneksel Tepe Tırmanışı (HC) gibi ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel MGİ yöntemlerinden farklı olarak, B-spline MGİ yöntemi, değişen hava koşulları profiline dayalı olarak verim ve dinamik yanıt açısından daha iyi performans göstermiştir. B-spline MGİ noktası yönteminin enerji dönüşüm verimliliği, geleneksel MGİ yöntemlerine kıyasla %17.14 civarında artmıştır.
- SOFC, hızlı güç değişimleri sırasında çalıştırıldığında, akım- gerilim eğrisinde hızlı bir gerilim düşümü ortaya çıkar. Bununla birlikte, yük talebindeki ani değişimler, SOFC’de hidrojen açlığı yaratır. Sonuç olarak bu yakıt açlığı hücre dayanıklılığını azaltır. SOFC’de sabit kazançlı doğrusal denetim yöntemlerinin uygulanması basittir. Ancak bu durumda bahsedilen yakıt açlığı sebebiyle maksimum doğruluk elde edilemez. Bu nedenle SOFC sisteminin yavaş yük takip problemini etkin bir şekilde çözmek için yeni bir uyarlamalı denetim yöntemi önerilmiştir. Sonuç olarak geleneksel yöntemle göre önerilen yöntem ile SOFC verimliliği %5.04 civarında artmıştır.

- Son olarak, bu tez bir mikro şebekede yenilenebilir enerji kaynakları için yeni bir enerji yönetimi sistemi geliştirmek amaçlanmıştır. Çalışılan enerji yönetim sistemi, yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanmakta ve yüke kesintisiz 24 saat güç beslemesi sağlamaktadır.

1.4. Araştırma Metodolojisi

Yukarıda belirtilen amaçları gerçekleştirmek için, önerilen sistemin modellenmesi, simülasyonu, denetimi ve değerlendirmesi için temel bir yazılım olarak MATLAB kullanılmış ve aşağıdaki metodoloji uygulanmıştır. PV enerji sistemi, hidrojen sistemi (SOFC) akü bankası, mikro şebekenin güç dönüştürücüleri (DA/DA dönüştürücüler, doğrultucu, şebeke bağlantılı evirici) için matematik modeller çıkartılmış ve değerlendirilmiştir. Daha sonra tüm bu bileşenlerin dinamik modellenmesi MATLAB ortamına aktarılmıştır. Sonrasında PV, SOFC'in denetimi, literatürdeki denetimsiler ve yöntemler kullanılarak tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Klasik denetimsilerdeki dezavantajlara dayanarak, PV paneller için B-spline MGI yöntemi çalışılmış ve MATLAB Simulink™ ortamında simülasyonu yapılmıştır.

Legendre dalgacık ile gömülü yeni bir uyarlamalı Sinirsel Bulanık Denetimci (NFC) önerilmiş ve MATLAB ile simülasyonu yapılmıştır. Önerilen denetimci, bir yakıt hücresinin yavaş yük takibi problemini çözmektedir. Benzer şekilde, şebeke bağlantılı evirici denetimi için Jacobi dalgacık tabanlı uyarlamalı NFC geliştirilmiştir. Son olarak, tüm mikro şebeke MATLAB'da tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Toplam elektrik üretimi, enerji depolaması, yük planlaması ve şebeke ile paylaşımının verimli bir yaklaşımla yönetilmesi ve kontrol edilmesi çalışılmıştır.

1.5. Tez Yapısı

Bu doktora tezi beş bölümde düzenlenmiştir.

- Bölüm-1, bu tezin giriş kısmı sunulmaktadır. Ayrıca tezin amacı, motivasyonu ve hedefleri açıklanmıştır.

- Bölüm-2, güneş PV sistemlerine ayrılmıştır. Bu bölüm, PV'nin dinamik modellemesini ve ilgili son durumu açıklanmıştır. Klasik denetim yöntemlerindeki dezavantajlar tartışılmıştır. Ayrıca PV denetimi için B-spline fonksiyonu tabanlı denetim yöntemi çalışılmış ve simülasyon sonuçları elde edilmiş ve tartışılmıştır.
- Bölüm-3, SOFC'yi ve denetimi anlatılmaktadır. SOFC için önerilen Legendre dalgacık tabanlı denetim yöntemi modellenmiş ve simülasyon sonuçları tartışılmıştır.
- Bölüm-4 mikro şebeke sistemini açıklamaktadır. Mikro şebekenin farklı bileşenleri, denetimi, enerji yönetimi ve simülasyon sonuçları tartışılmıştır.
- Bölüm-5, bu tezin sonuçlarını ve önemli bulgularını tartışmaktadır. Ayrıca, muhtemel gelişmeler ve gelecek çalışmalar da tartışılmıştır.

BÖLÜM 2. GÜNEŞ PV SİSTEMLERİNİN UYARLAMALI DENETİMİ

Bu bölümde, gerçek yük koşulları ve kısmi gölgelenmeyi göz önüne alarak PV güneş sisteminde gerçek zamanlı (çevrimiçi) MGİ noktası izleme için uyarlamalı sinirsel bulanık tabanlı dayanıklı bir denetim sistemi çalışılmıştır. B-spline denetim sisteminde, sinirsel bulanık yapının yerel maksimuma takılma ve yüksek hesaplama süresi problemleri B-Spline fonksiyonu yardımı ile giderilmiştir. B-spline denetim sisteminin parametreleri, MGİ noktası hatası aracılığı ile işletilen uyarlamalı sinirsel bulanık sistemin kuralları ile çevrimiçi olarak ayarlanmaktadır. B-spline denetim sisteminin optimizasyonu için gradyan inişi geri yayımlı olarak bilinen bir algoritma kullanılmıştır. Klasik akıllı ve geleneksel MGİ yöntemleri ile B-spline uyarlamalı NFC sistemi; MGİ noktası izlemedeki hata ve enerji dönüşüm verimliliği gibi farklı parametreler açısından karşılaştırılmıştır. B-spline tabanlı denetim sisteminin dayanıklılığını doğrulamak için karşılaştırma indeksleri oluşturulmuş ve tam güne ilişkin gerçek zamanlı hava koşulları dikkate alınarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde verilen çalışmalar ve analizler, referansta verilen yöntemler temel alınarak literatür analizi yapmak amacıyla gerçekleştirilmiştir [20, 73], tez kapsamında önerilen özgünlük Bölüm 3'te yer almaktadır.

2.1. Giriş

Küresel enerji sorunları gittikçe büyümektedir ve enerji talebindeki artışın üstesinden gelmek ise gittikçe zorlaşmaktadır. Ortalama enerji tüketimi talebinin 2050 yılına kadar yaklaşık 30 TW olacağı tahmin edilmektedir [21]. Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi kabaca 100.000 TW'tır. Bu güç değeri dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamak için çok ciddi bir seçenek teşkil etmektedir. Bununla birlikte, atmosferik olaylardaki belirsizlikler ve değişen iklim koşulları altında PV güneş enerji

sistemlerinden maksimum güç elde etmek, bu sistemlerin denetimindeki en büyük zorluklardan biridir.

Uygulamaya bağlı olarak, PV güneş sistemleri iki kategoride sınıflandırılır: (i) şebeke bağlantısız PV güneş sistemler, (ii) şebeke bağlantılı PV güneş sistemler [3]. Şebeke bağlantısız PV güneş enerjisi sistemleri sabit yüklere elektrik enerjisi sağlar, çoğu zaman enerji depolama için bataryalar da bulunur. Şebeke bağlantılı PV güneş enerjisi sistemleri elektrik dağıtım şebekesine bağlanır. Şebeke bağlı evirici ile şebekeye güç aktarımı yapılır. Her iki sınıfta da kapalı çevrim akım/gerilim kontrolü ve MGİ yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Literatürde yüksek PV enerji dönüşüm verimliliği elde etmek için birçok MGİ yöntemleri geliştirilmiştir. HC, eğri uydurma, kısa/açık devre akımı/gerilim yöntemleri, dalgalanma korelasyon denetimi ve IC gibi geleneksel MGİ yöntemleri uzun yıllardır literatürde mevcuttur [22-28]. Örneğin, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı üzerine bina edilen algoritmaların enerji dönüşüm verimliliği düşüktür [29, 30]. Benzer şekilde, eğri uydurma yönteminde, PV panelin parametrelerinin çıkartılması gerekmektedir [31]. Birçok yazar tarafından en yaygın olarak kullanılan yöntem, MGİ noktası çevresinde meydana gelen düşük frekanslı salınımlara sahip olan HC yöntemidir [32-33].

PV enerji sistemlerinin optimal denetiminde kullanılan bir diğer yaklaşım Beta MGİ yöntemidir [34]. Bu yöntemde güç değişimlerini dikkate almak yerine ara değişken β kullanılır. Bu yöntemin çalışması sırasında, geçici durumda değişken büyük adım aralığı kullanılırken, kalıcı durumda küçük adım aralığı kullanılır [35]. Bu yöntemde P-V eğrisi eğimine ihtiyaç duyulmaz ve kararlı duruma ulaşıldığında çok küçük salınımlar gözlenir. β parametresinin aralığı güneş ışıınımına ve sıcaklığa bağlıdır ve β parametre aralığının uygun seçimi ve çeşitli meteorolojik durumlar için optimal ölçeklendirme faktörü N'nin ayarlanması bu yöntemin zorluklarıdır [36]. β algoritması için bir iyileştirme sunulmuştur [37]. Bununla birlikte, bu çalışmada önerilen yöntem güncel yöntemlerle karşılaştırılmamıştır.

PV enerji sistemlerine bağı olan güç dönüştürücülerin denetiminde klasik anlamda sabit kazançlı doğrusal denetimsiler kullanılmaktadır [38-40]. Bu denetimsiler, doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde dayanıklı değildir. Bu nedenle, sistem parametrelerindeki değişim ve belirsizlikler, denetim performansında düşüşlere neden olmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, geri adımlı denetim ve model öngörücü denetim yöntemleri önerilmiştir [41-43].

Literatürde PV enerji sistemlerin çeşitli performans değerlerini artırmak için gelişmiş denetim yöntemleri ve akıllı yöntemler öneren fazla sayıda araştırma makalesi ve çeşitli ders kitapları bulunmaktadır. Örneğin, çeşitli araştırmacılar tarafından PV enerji sistemini kontrol etmek için kayan kipli denetimsi kullanılmıştır [44-47]. Benzer şekilde, literatürde PV enerji sistemleri için geri besleme doğrusallaştırması kullanan bir denetim yöntemi de önerilmiştir [48-49]. Parçacık sürüşü optimizasyonu, yapay arı kolonisi, genetik algoritma gibi doğadan ilham alan akıllı algoritmalar ve bunların çeşitli yöntemlerle oluşturulan hibrit modelleri literatürde karşılaşılan diğer yaklaşımlardır [50-52]. Güneş ışıınımı aniden değiştiğinde, bu yöntemler PV enerji sistemlerin denetiminde uygulanmak için faydalıdır.

PV güneş enerjisi panellerinde enerji dönüşüm verimliliği kısmi gölgelenmeden önemli ölçüde etkilenir. Kısmi gölgelenme koşullarında PV paneller farklı güneş ışıması seviyeleri alır. Geleneksel MGİ yöntemlerinde verimlilik düşüktür çünkü bu yöntemler yerel maksimumlara (veya yerel minimumlara) takılı kalır. Bu gibi olaylar sadece kısmi gölgelenmelerde ortaya çıkar ve PV eğride meydana gelen birden fazla MGİ noktasının oluşmasına neden olmaktadır. Kısmi gölgelenme ve çoklu maksimum oluşumu sorununu ele alan çok sayıda çalışma bulunmaktadır [53-57]. Sonuç olarak PV güneş enerjisi sistemleri kısmi gölgelenme sırasında denetim etmek için yumuşak hesaplama (soft computing) kullanan MGİ noktası yöntemleri örneğin sinir ağı, Bulanık Mantık Denetimsisi (FLC) ve bunların hibrit modelleri geliştirilmiştir [54-57]. Sinir ağları ve bulanık tabanlı denetimde kontrol sistemleri hızlı yakınsama oranına sahip olmasına rağmen, sinir ağlarında denetim kurallarının oluşturulması için her bir PV ünitenin eğitilmesi gerekir [58]. Bulanık denetimde ise sistemin öncelik bilgisine de ihtiyaç duyulur [59]. Sinir ağları ve bulanık denetimin

birlikte kullanıldığı hibrit model üzerinde ortaya çıkan olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çeşitli araştırmalar yapılmıştır [60]. Bununla birlikte, çoğu araştırmada, sınırlı çalışma bölgesi durumları için denetimci tasarımları yapılmıştır. Sonuç olarak, yüksek belirsizlik durumlarında kontrol sistemi kararsızlığa sürüklenmiştir. Bu nedenle, NFC'ler, uygun uzay ararken yerel minimumları yanlış tespit edebilirler. Yerel arama alanı tuzağına düşme riski her zaman bu yöntemde mevcuttur. Klasik NFC gerçek minimumu ararken, ilk minimumda durur ve gerçek minimumları bulmak için ileri arama yapamaz. Bu amaçla, gelişmiş bir B-spline tabanlı uyarlanabilir sinirsel NFC önerilmiştir. Birçok araştırmacı literatürde B-spline entegrasyonunun NFC performansını daha da artırabileceğini ve ilk minimumda hapsedilmesini ortadan kaldırabileceğini göstermektedir [61]. Benzer şekilde, B-spline'ın kullanımları çeşitli doğrusal olmayan denetim sistemlerinde de kullanılmıştır [62-70].

Bu bölümde, uyarlamalı B-spline fonksiyonları çalışılmış ve MGİ yöntemine entegre edilmiştir. B-spline MGİ NFC uyarlamalı B-spline tabanlı yöntem doğru minimumu bulmaktadır. Gradyan inişi geri yayılım tabanlı çevrim içi uyarlama, PV enerji sistemi parametrelerini kullanmadan B-spline tabanlı denetim sisteminin parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Geleneksel MGİ noktası yöntemleri ile karşılaştırmalı bir analizi sağlanmış ve B-spline MGİ tabanlı kontrol sistemi için Lyapunov kararlılık analizi yapılmıştır. B-spline tabanlı yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlüğü karşılaştırma indeksleri ve simülasyonlarla doğrulanmıştır.

2.2. PV Güneş Sistemin Tanımı ve Panelin Çalışma İlkesi

PV güneş panelleri güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmektedir. PV güneş panelleri birçok hücreden oluşmaktadır. Teknik olarak her bir PV güneş hücre, p-n bağlantılı yarı iletken malzemelerden yapılır. Güneşten gelen fotonlar PV güneş panelinin üzerinde bulunan bahsettiğimiz bu hücreler tarafından emildiklerinde, fotoelektrik reaksiyon ile açığa çıkan enerji elektronların hareket etmelerine yol açar ve böylece elektrik enerjisi üretilmiş olur. Bir PV enerji sistemi için PV panel dışında DA/DA dönüştürücü, şarj/deşarj dönüştürücüsü ve şebeke bağlantılı evirici gibi birçok bileşen ve uygun bir MGİ tabanlı denetim sisteminin tasarlanması gerekmektedir.

Doğru akım ile beslenen yükün (R_L) enerjisi, Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi DA/DA yükselten dönüştürücü üzerinden PV paneller tarafından sağlanır. Sistemin dinamik modelini elde etmek için (2.1)-(2.3) denklemleri kullanılır [65].

$$\frac{dv_{PV}}{dt} = \frac{1}{C_a}(i_{PV} - i_L) \quad (2.1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_1}[v_{PV} - v_b(1 - d)] \quad (2.2)$$

$$\frac{dv_{C_b}}{dt} = \frac{1}{C_b}\left[i_L(1 - d) - \frac{v_{C_b}}{R_L}\right] \quad (2.3)$$

PV panelde, akım ve gerilim arasındaki ilişki (2.4) eşitliğinde gösterildiği gibi doğrusal olmayan karakteristiğe sahiptir.

$$i_{PV} = n_p I_{ph} - n_p I_D \left[e^{\left(\frac{v_{PV} + R_s i_{PV}}{n_s v_t} \right)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

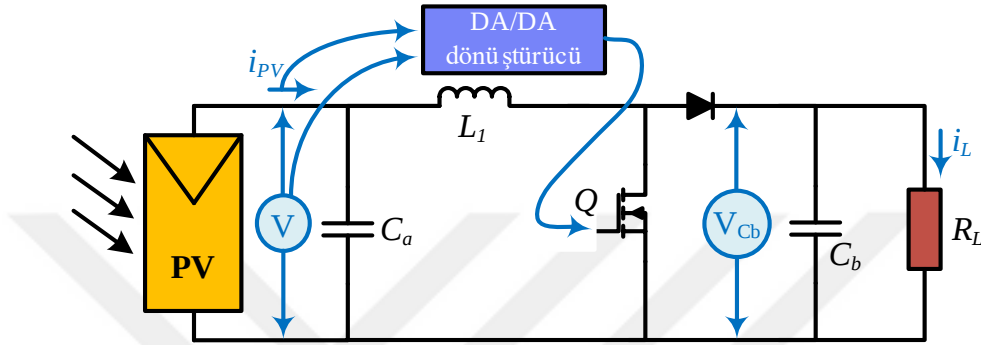
(2.4) eşitliğinde, v_t uç gerilimini, n_p ve n_s ise paralel ve seri panel sayısını ifade eder.

Her bir P-V eğrisinin farklı bir maksimum güç noktası vardır. PV enerji sisteminden elde edilebilecek maksimum güç hava koşullarına bağlıdır. Her çalışma durumu için PV panelden maksimum gücün elde edilebileceği farklı bir MGİ noktası bulunmaktadır. Bu nedenle, PV panellerin enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için MGİ noktası sürekli olarak izlenmelidir. Maksimum güç noktasının izlenmesindeki en kritik kısım DA-DA yükseltici dönüştürücünün "anahtar çalışma oranının" (d) sürekli olarak ayarlanmasıdır. PV panellerle birlikte DA/DA dönüştürücü devresi Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

Yükselticide d değeri değiştikçe, PV enerjisi sistemin giriş direnci de değişir. Maksimum güç noktası, d değeri ayarlanarak, darbe genişliği modülasyon sinyali ile anahtarlanan MOSFET aracılığıyla izlenir. DA-DA dönüştürücü, (2.5) eşitliğinde gösterildiği gibi eşdeğer direnç devresi gibi düşünülebilir.

$$R_{eq} = R_L (1-d)^2 \quad (2.5)$$

PV panelin çıkış direnci eşdeğer dirençe eşit olduğunda (R_{eq}), yüke maksimum güç aktarılır [66].



Şekil 2.1. PV enerjisi sistemler

2.3. PV'in Çevrimiçi Uyarlamalı Denetimi

Bu bölümde, uyarlamalı bir B-spline NFC kullanılarak bir PV enerji sisteminin maksimum güç noktasını elde etmek için daha dayanıklı bir yöntem uygulanmıştır. Şekil 2.2.'te B-spline tabanlı denetim yöntemi verilmiştir. Maksimum güç noktası için ise (2.6) eşitliği verilmiştir.

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial v_{PV}} = \frac{\partial v_{PV} i_{PV}}{\partial v_{PV}} = v_{PV} \frac{\partial i_{PV}}{\partial v_{PV}} + i_{PV} = 0 \quad (2.6)$$

Uyarlamalı B-spline NFC'nin girişinde bir "s" hata terimi vardır ve bu değer (2.7) eşitliği ile ifade edilir.

$$s = \frac{\partial i_{PV}}{\partial v_{PV}} + \frac{i_{PV}}{v_{PV}} \approx \frac{i_{PV}(k) - i_{PV}(k-1)}{v_{PV}(k) - v_{PV}(k-1)} + \frac{i_{PV}(k)}{v_{PV}(k)} \quad (2.7)$$

(2.7) eşitliğinde k yineleme sayısını ifade eder.

2.4. Uyarlamalı B-spline Sinirsel Bulanık Denetimcisinin Yapısı

Çalışmada kullanılan B-spline ve Uyarlamalı B-spline Sinirsel Bulanık Denetimcisinin (ABNFC) yapısı bu alt bölümde açıklanmıştır. B-spline, herhangi bir dinamik sistemi doğrusal olmayan ve karmaşık fonksiyonlarla tahmin etmek yerine çok daha kolay yoldan modelleyebilir. Bu yöntem hedefine ulaşırken düşük dereceli polinomları benzersiz kesme noktalarında birleştiren düğüm vektörleri bir B-spline'in temel fonksiyonunu oluşturmaktadır. Katsayıların sayısı B-spline fonksiyonun derecesine göre belirlenir ve bu fonksiyon çeşitli veri türlerinin görselleştirilmesi ve modellenmesi için esneklik sağlayan parametrik yüzeylere de sahiptir [66]. Yöntemin hesaplama süreci (2.8) eşitliği ile verilmiştir.

$$\Xi_{ij}(x_i) = \sum_{g=0}^{n-1} \beta_g \Theta_{g,p}(x_i) \quad 1 \leq p \leq n \quad (2.8)$$

(2.8) eşitliğinde Ξ_{ij} ve $\Theta_{g,p}$ ise girdi değişkeninin üyelik fonksiyonu ve temel fonksiyonu ifade eder. Toplam denetim nokta sayısı ve g. denetim noktası sırasıyla $n+1$ ve β_g ile gösterilir. B-spline'in fonksiyonu (2.9) eşitliği ile verilmiştir.

$$\Theta_{g,p}(x_i) = \frac{x_i - t_g}{t_{g+p-1} - t_g} \Theta_{g,p-1}(x_i) + \frac{t_{g+p} - x_i}{t_{g+p} - t_{g+1}} \Theta_{g+1,p-1}(x_i) \quad (2.9)$$

B-spline'in ikinci derece fonksiyonu ($p = 2$) (2.10)-(2.12) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$\Theta_{g,2}(x_i) = \frac{x_i - t_g}{t_{g+1} - t_g} \Theta_{g,1}(x_i) + \frac{t_{g+2} - x_i}{t_{g+2} - t_{g+1}} \Theta_{g+1,1}(x_i) \quad (2.10)$$

$$\Theta_{g,1}(x_i) = \begin{cases} 1 & x \in [t_g, t_{g+1}) \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\Theta_{g+1,1}(x_i) = \begin{cases} 1 & x \in [t_{g+1}, t_{g+2}] \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.12)$$

Yukarıdaki eşitliklerde x_i aralığı için düğümler t_{g+2} , t_{g+1} ve t_g ise ifade eder. (2.10)-(2.12) eşitlikleri ile (2.8) eşitliği birlikte kullanarak, (2.13) ile verilen Denklem elde edilir.

$$\Xi_{ij}(x_i) = \begin{cases} \beta_0 \frac{x_i - t_0}{t_1 - t_0} & x_i \in [t_0, t_1] \\ \beta_0 \frac{t_2 - x_i}{t_2 - t_1} & x_i \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ \beta_g \frac{t_{g+2} - x_i}{t_{g+2} - t_{g+1}} + \beta_{g+1} \frac{x_i - t_{g+1}}{t_{g+2} - t_{g+1}} & x_i \in [t_{g+1}, t_{g+2}] \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{p-2} \frac{t_p - x_i}{t_p - t_{p-1}} + \beta_{p-1} \frac{x_i - t_{p-1}}{t_p - t_{p-1}} & x_i \in [t_{p-1}, t_p] \\ \beta_{p-1} \frac{t_{p+1} - x_i}{t_{p+1} - t_p} & x_i \in [t_p, t_{p+1}] \end{cases} \quad (2.13)$$

Genelde daha yüksek dereceli B-spline fonksiyonu için (yani, $p > 1$), temel fonksiyonun maksimum değeri 1'e ulaşmaz. Bu durumda küme normal bulanık küme olarak adlandırılmaz. Bu problem, pozitif bir tamsayı B-spline fonksiyonu ile (2.14) eşitliği kullanılarak çarpılarak çözülebilir.

$$\varsigma = 1 / \sup_{x_i \in X_i} \Theta_{g,2}(x_i)$$

veya

$$\varsigma \Theta_{g,2}(x_i) = \Lambda_{g,2}(x_i) \quad (2.14)$$

Denetim noktalarının küme şekli, boyutu ve dağılımı, sistemin modelleme potansiyellerini değerlendirmede önemli bir rol oynar. Bu nedenle, “ βg ” denetim noktaları, bulanık B-spline’ı ayarlamak için optimize edilmiştir. Denetim noktalarının dağıtımını, p’ninci hedeflenen değer için bir bulanık küme $(x_{ip}, s(x_{ip}))$ üzerinde eşit olarak gerçekleştirilir. Bu nedenle, denetim noktaları (2.15) eşitliği kullanılarak ayarlanır.

$$\Lambda_{g,2}(x_i) = \begin{cases} 1, & x_{ip} = g \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.15)$$

(2.15) eşitliğinde, r'nin güncellenmiş değeri, gerekli $s(x_{ip})$ değerinden elde edilen (x_{ip}) ise ifade eder. Kapalı denetim noktası " βr " (2.10) ve (2.13)'üncü denklemleri kullanılarak (2.16) eşitliği ile tanımlanabilir.

$$\beta_r = t_{ij}(x_{ip}) = s(x_{ip}) \quad (2.16)$$

2.4.1. Sinirsel bulanık B-spline'ın yapısı

Genellikle, “IF-THEN” kuralları, bulanık sistemi çeşitli girdi ve çıktı tabanlı dilsel değişkenler altında çalıştırmak için uygulanır.

$$R_i : \forall x_{li} \rightarrow \Xi_{li} \text{ ve } \forall x_{mi} \rightarrow \Xi_{mi}; y_i = u$$

Yukarıdaki ifadede "i." bulanık kuralı " R_i " ile, toplam giriş sayısı m ile ve i. kuralın k. girişi x_{ki} ile $k=1,2,3,4,\dots, m$ değerleri için gösterilir. Uyarlamalı B-spline NFC'nin beş katmanlı yapısı Şekil 2.3.'te gösterilmiştir.

Birinci katman: Giriş katmanı

Hatadaki değişimler $x_2=s$ ve MGİ hatası $x_1=s$, uyarlamalı B-spline sinirsel NFC'nin iki girişidir. Dolayısıyla, katmanların $O_{i,j}^{(1)}$ çıktısı ve $I_i^{(1)}$ girdisi (2.17) eşitliği ile verilmiştir.

$$\begin{cases} I_i^{(1)} = x_i & i=1,2 \\ O_{i,j}^{(1)} = I_i^{(1)} & j=1,2,...,l \end{cases} \quad (2.17)$$

(2.17) eşitliğinde I dilsel değişkenleri ifade eder.

İkinci katman: Bulanıklaştırma (fuzzification)

Bulanıklaştırma işlemi uygulanır ve bulanık kümeleri karakterize eden nöronlar, dilsel bulanık kuralların öncül (Antecedent) yapısına kullanılmaktadır.

$$\begin{cases} I_{i,g}^{(2)} = \Theta_{g,2}(x_i) \\ O_{ij}^{(2)} = \Xi_{ij}(x_i) = \sum_{g=0}^{n-1} \beta_g I_{i,g}^{(2)} \end{cases} \quad (2.18)$$

(2.18) eşitliğinde j th bulanık kümesi, Ξ_{ij} ile gösterilen üyelik fonksiyonuna sahip bir i th girdisine sahiptir.

Üçüncü katman: Çıkarım katmanı (Inference Layer)

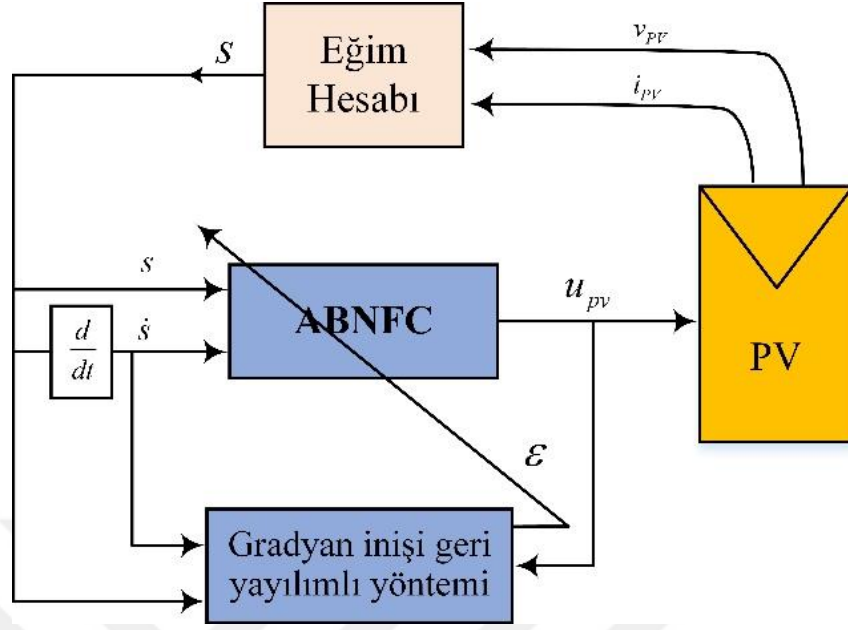
Bu katman üyelik derecesinin bulunur. (2.19) eşitliğinde her kuralın gücünü değerlendirmek için T-norm yöntemi yapılır.

$$\begin{cases} I_{i,j}^{(3)} = O_{i,j}^{(2)} = \Xi_{i,j}(x_i) \\ O_i^{(3)} = \mu_i(x_i) = \prod_{i=1, j=1}^{m,l} \Xi_{i,j}(x_i) \end{cases} \quad (2.19)$$

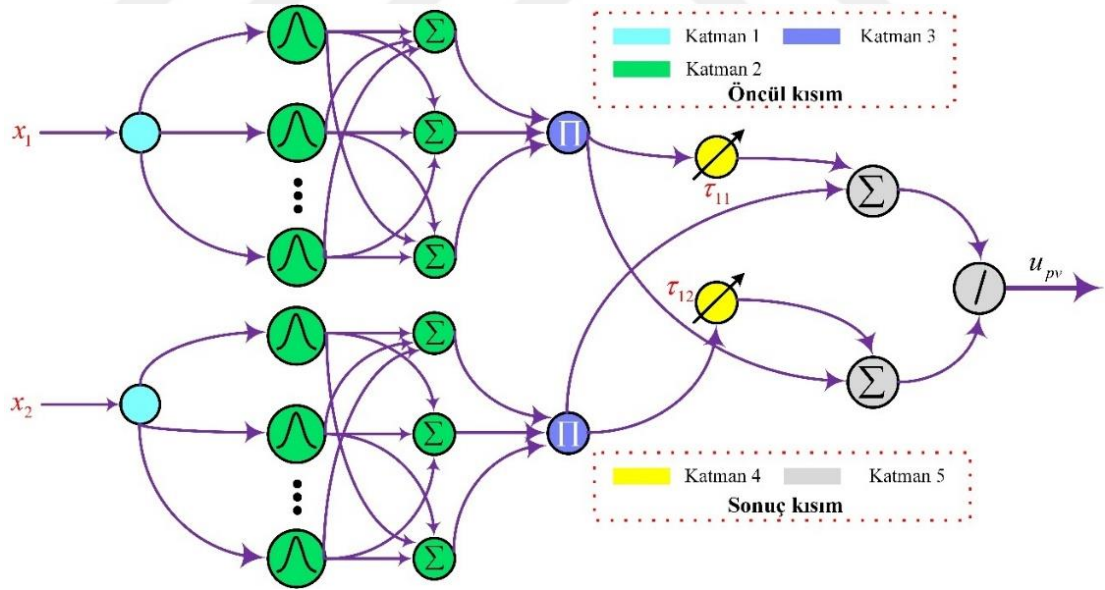
Dördüncü katman: Ağırlık katmanı (Weight Layer)

Bu katmandaki sınıf sayısı n ile temsil edilir ve nöronlar ($z=1, 2, \dots, n$) τ ağırlığı ile (2.20) eşitliğinde çarpılır.

$$\begin{cases} I_i^{(4)} = \mu_i(x_i) \\ O_i^{(4)} = \tau_{zi} I_i^{(4)} & z=1,2,...,n \end{cases} \quad (2.20)$$



Şekil 2.2. PV'in B-spline denetim yöntemi



Şekil 2.3. B-spline ile NFC sisteminin yapısı

Beşinci katman: Çıktı katmanı

Burada, merkezi durulaştırma işlemi gerçekleştirilerek bir bulanık çıktısı elde edilir.

$$\begin{cases} I^{(5)} = \sum_{i=1}^m O_i^{(4)} \\ O^{(5)} = u_{PV} = \frac{I^{(5)}}{\sum_{i=1}^m O_i^{(3)}} \end{cases} \quad (2.21)$$

(2.21) eşitliğinde dönüştürücünün d değeri uyarlamalı B-spline NFC'nin çıkışına u_{PV} karşılık gelmektedir.

2.4.2. Parametrelerin güncelleme kuralları

Verilen maliyet fonksiyonu, sinirsel bulanık B-spline'ın yapay sinir ağ öğrenmesi yoluyla ağı parametreleri ayarlanarak azaltılabilir. Denetim noktalarını uyarlamak için gradyan inişi geri yayımlı yöntem uygulanır. Bu nedenle, maliyet fonksiyonunun genel formu şu şekilde tanımlanabilir.

$$E = \frac{1}{2} (y_d - y_i)^2 \quad (2.22)$$

(2.22) eşitliğinde B-spline denetimcinin ($y_i = u_{PV}$) çıkışı y_i ve PV santralinin ($y_d = u_{PV}$) çıkışı y_d ifade eder. Güncellenen denetim parametreleri $\chi = [\tau, \Xi]$ ile gösterilir. Bu nedenle, (2.23) ve (2.24) ile verilen güncellenmiş denklemler kullanılır.

$$\tau_{zi}(t+1) = \tau_{z,i}(t) - \wp \frac{\partial E}{\partial \tau_{zi}} \quad (2.23)$$

$$\Xi_{ij}(t+1) = \Xi_{ij}(t) - \wp \frac{\partial E}{\partial \Xi_{ij}} \quad (2.24)$$

(2.23) ve (2.24) eşitliklerinde $\wp$ öğrenme oranını ifade eder. Türev terimler, zincir kuralı kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \tau_{zi}} = \frac{\partial E}{\partial y_i} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau_{zi}} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \Xi_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y_i} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial \mu_{ij}} \cdot \frac{\partial \mu_{ij}}{\partial \Xi_{ij}} \quad (2.26)$$

Sistem (örneğin, $\frac{\partial y}{\partial u} = 1$), bir modele olan ihtiyacı ortadan kaldırmak için B-spline denetimci döngüsüne bağlanır [71]. (2.25) ve (2.26) eşitliklerinde görülen türevler yerlerine konulursa (2.27) ve (2.28) ile verilen denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \tau_{zi}} = -(y_d - y_i) \frac{\mu_i \sum_{i=1}^m O_i^{(3)}}{\left(\sum_{i=1}^m O_i^{(3)} \right)^2} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \Xi_{ij}} = -(y_d - y_i) \frac{\tau_{zi} - u}{\sum_{i=1}^m O_i^{(3)}} O_i^{(3)} \quad (2.28)$$

Uyarılama hatası tek bir iterasyonda hesaplanır ve skaler bir değer olup Denklem (2.22) ile gösterilir. Güncelleme parametreleri için (2.27) ve (2.28) denklemleri (2.23) ve (2.24) denklemlerinde yerine yazılarak nihai uyarılama (2.29) ve (2.30) denklemleri hesaplanır.

$$\tau_{zi}(t+1) = \tau_{zi}(t) + \wp(y_d - y_i) \frac{\mu_i \sum_{i=1}^m O_i^{(3)}}{\left(\sum_{i=1}^m O_i^{(3)} \right)^2} \quad (2.29)$$

$$\Xi_{ij}(t+1) = \Xi_{ij}(t) + \rho(y_d - y_i) \frac{\tau_{zi} - u}{\sum_{i=1}^m O_i^{(3)}} O_i^{(3)} \quad (2.30)$$

2.5. Lyapunov Kararlılık Analizi

Gradyan inişi geri yayımlı yöntemin yakınsaması, öğrenme oranının uygun seçimine bağlıdır. Kararlılık analizi bir sistem tasarımının en önemli kısımlarından biridir. Lyapunov kararlılık analizi yapılırsa fonksiyon şu şekilde tanımlanır.

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon \quad (2.31)$$

(2.31) eşitliğinde, denetimcinin uyarılama hatası (ε) ile temsil edilir ve (2.32) eşitliği ile tanımlanır.

$$\varepsilon = (y_d - y_i) \quad (2.32)$$

Lyapunov fonksiyonuna ait çeşitli kullanım şekilleri vardır [72].

$$\Delta P = P(t+1) - P(t) = \frac{1}{2} [\varepsilon^2(t+1) - \varepsilon^2(t)] \quad (2.33)$$

Benzer şekilde, öğrenme hatasındaki değişimler için hesaplama şu şekilde yapılabilir.

$$\Delta \varepsilon(t) = \varepsilon(t+1) - \varepsilon(t) \approx \left(\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \chi} \right)^T \partial \chi \quad (2.34)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} & \frac{\partial \varepsilon}{\partial \Xi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \tau \\ \Delta \Xi \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

$$\Delta\chi = -\kappa\tilde{\lambda}^r \frac{\partial E}{\partial\chi} = \tilde{\lambda}^r \varepsilon(t) \frac{\partial y_i}{\partial\chi}, \text{ öyleyse}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \Delta\tau \\ \Delta\Xi \end{pmatrix} = \varepsilon(t) \begin{pmatrix} \tilde{\lambda}^r \frac{\partial y_i}{\partial\tau} \\ \tilde{\lambda}^\Xi \frac{\partial y_i}{\partial\Xi} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Denetimcinin yakınsaması, yakınsama teoremi ile elde edilir.

Teorem: Eğer $\tilde{\lambda}^r$ Denklem (2.37)'yi sağlıyorsa, asimptotik yakınsama sağlanabilir.

$$0 < \tilde{\lambda}^r < \frac{2}{\max\left(\frac{\partial y_i}{\partial\chi^r}\right)} \quad (2.37)$$

Kanıt: Denklem (2.33) kullanılarak Lyapunov fonksiyonundaki değişimler şu şekilde verilebilir.

$$\Delta P = P(t+1) - P(t) = \frac{1}{2} \left[\varepsilon^2(t+1) - \varepsilon^2(t) \right] \quad (2.38)$$

Denklem (2.34) ile (2.39)'da verilen bağıntı elde edilir.

$$\Delta P = \Delta\varepsilon(t) \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{2} \Delta\varepsilon(t) \right] \quad (2.39)$$

(2.39) eşitliğinde, (2.34) ve $\Delta\chi = -\tilde{\lambda}^i \frac{\partial E}{\partial\chi} = \tilde{\lambda}^i \varepsilon(t) \frac{\partial y_i}{\partial\chi}$ ifadeleri kullanılırsa (2.40) eşitliği elde edilir.

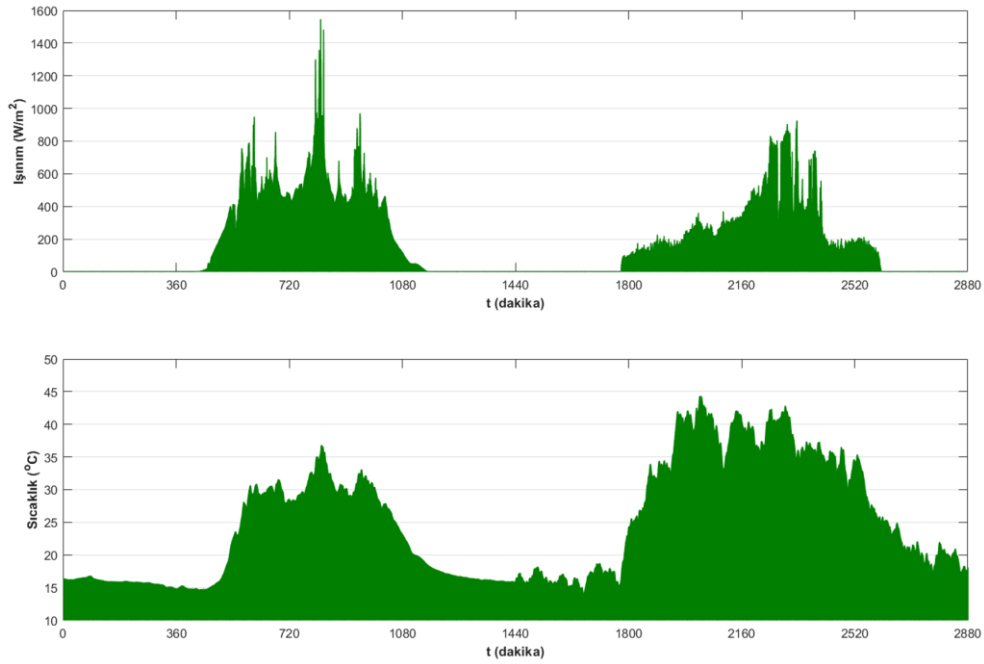
$$\Delta P = \left(\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial\chi} \right)^T \tilde{\lambda} \varepsilon(t) \frac{\partial y_i}{\partial\chi} \left\{ \varepsilon(t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial\chi} \right)^T \tilde{\lambda} \varepsilon(t) \frac{\partial y_i}{\partial\chi} \right\} \quad (2.40)$$

(2.33)'ü kullanarak (2.41) ile verilen son ilişki elde edilir.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \chi} = -\frac{\partial y_i}{\partial \chi} \quad (2.41)$$

2.6. Simülasyonlar ve Tartışma

400 kW nominal güce sahip PV enerji sistemi 13 paralel dizinin her birinde 66 seri hücre ile MATLAB'ın Simscape aracında tasarlanmıştır. Geleneksel denetimcilerden elde edilen sonuçlar uyarlanabilir B-spline NFC ile karşılaştırılmış (B-spline Şekil 2.5.'te belirtildiği gibi) ve B-spline yönteminin daha yüksek verime sahip olduğu kanıtlanmıştır. Oransal-Integral-Türevsel Saptır-Gözle (PID-PO) ve PID-IC MGİ tabanlı yöntemleri bu bölümde tasarlanmıştır. Güneş ışıınımı (W/m^2) ile birlikte sıcaklık ($^{\circ}C$) Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi iki gün için kaydedilmiştir [72, 74]. Güneş ışıınının verileri saat 07.11 (431 dakikada) ile saat 18.44 (1124 dakikada) arasındaki zaman aralığı için toplanmıştır. PV enerji sisteminin çıkış gücü Şekil 2.5.'te gösterilen tüm yöntemler için karşılaştırılmıştır. Güneş saat 13.43'te (823 dakikada) en yüksek seviyede 1000 W/m^2 ışıma ile 366 kW'lık (1. günde) maksimum güce ulaşıldığı görülmüştür. Aynı şekilde 2. gün için güneş saat 13.20'de (2240 dakikada) en yüksek seviyede 840 W/m^2 ışıma ile 225 kW'lık maksimum güce ulaşıldığı görülmüştür. Güneş ışıınımı zamanla değiştikçe meydana gelen maksimum güçteki değişikliklerden dolayı s değerleri dalgalanmaktadır. Maksimum güç noktasındaki eğim sıfır değilken "s" değeri denetimci tarafından sıfırda olacak şekilde optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde uyarlamalı B-spline NFC tarafından elde edilen minimum hatanın (referans güç - aktif gücü) diğer yöntemlere göre daha düşük olduğu fark edilebilir. Tüm MGİ tabanlı denetimciler tarafından optimize edilmiş s'lerin sonuçları Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. s'deki değişimler, B-spline denetimci kullanılarak ± 35 p.u'ya, "PID-IC" kullanılarak ± 500 p.u'ya ve "PID-PO" kullanılarak ± 600 p.u'ya ulaşmıştır.



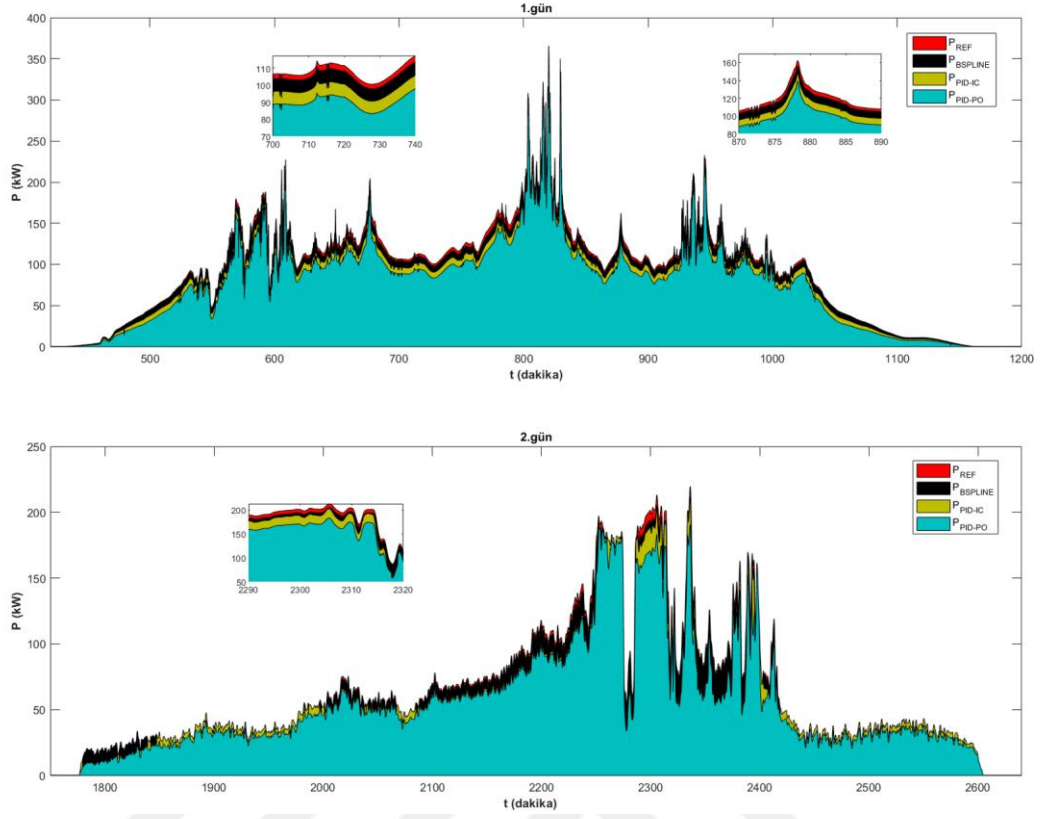
Şekil 2.4. Hava koşulları (ışınım ve sıcaklık)

Ortalama PV enerji dönüşüm verimliliği ($\eta_{PV-orta}$) ve PV enerji dönüşüm verimliliği (η_{PV}) sırası ile (2.42) ve (2.43) eşitlikleri ile verilmiştir.

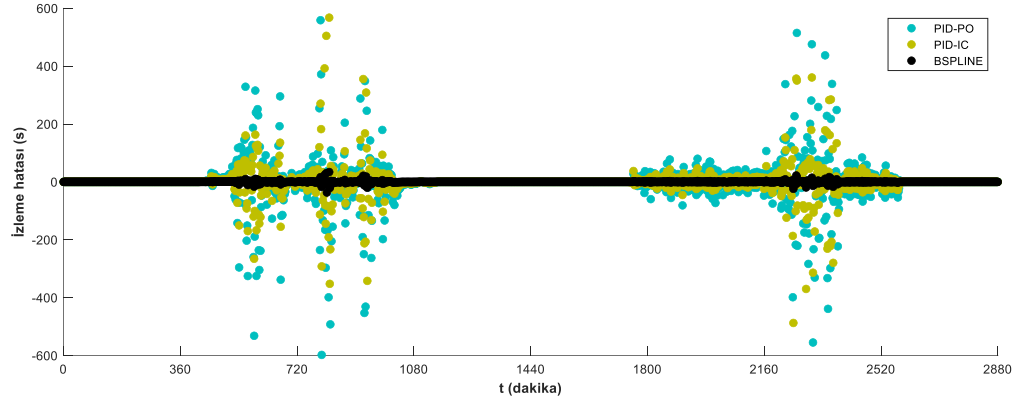
$$\eta_{PV} = \frac{\int_0^t P_{PV}(t)dt}{\int_0^t P_{REF}(t)dt} \times 100\% \quad (2.42)$$

$$\eta_{PV-orta} = \frac{1}{T} \eta_{PV} \quad (2.43)$$

Çeşitli denetimler için ortalama verimliliklerin grafiksel karşılaştırma analizi, Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi sunulmuştur. Uyarlanabilir B-spline NFC'nin performansının diğer tüm denetim yöntemlerine göre üstün ve neredeyse sabit (%97.07) olduğu, diğer yöntemlerin performansının ise oldukça düşük ve değişken olduğu ortaya çıkmıştır. Tablo 2.1. ve Şekil 2.8.'de, B-spline yönteminin dayanıklılık analizi için değerlendirilen beş hata indeksi, İntegral Zaman Karekök Hatası (ITSE), İntegral Zaman Mutlak Hatası (ITAE), İntegral Mutlak Hatası (IAE), Ortalama Görelî Hatası (MRE) ve İntegral Kare Hatası (ISE) gösterilmiştir.

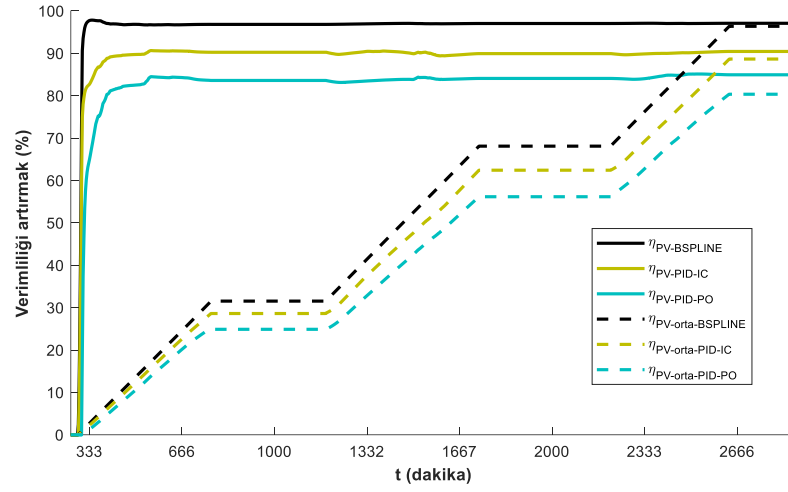


Şekil 2.5. Farklı aralıklarda PV çıkış gücü

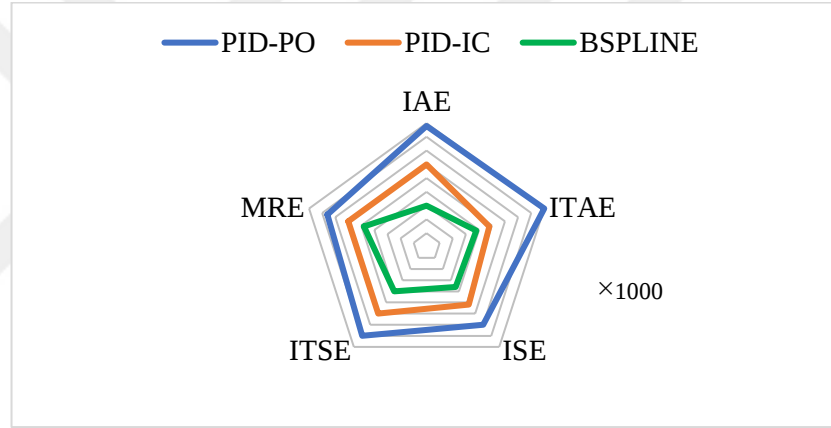


Şekil 2.6. İzleme hatası

Uyarlamalı B-spline NFC kullanılarak diğer denetimcilere kıyasla küçük hatalar ve yüksek verimli kümülatif sonuçlar elde edilmiştir. Işınmındaki değişiklikler B-spline denetiminin performansını etkileyebilir.



Şekil 2.7. PV enerji dönüşüm verimliliği (%)



Şekil 2.8. Performans indeksleri

Tablo 2.1. PV çıkış gücü verimliliklerinin ve performans endekslerinin özeti

Denetimciler	η_{PV} (%)	MRE (10^3)	IAE (10^3)	ITAE (10^3)	ISE (10^3)	ITSE (10^3)
	$\eta_{PV-orta}$ (%)					
BSPLINE	97.07 97.47	0.06921	0.082	2.644	0.338	10.07
PID-IC	90.43 88.64	0.9041	0.270	8.59	3.56	113.9
PID-PO	84.92 80.33	1.3647	0.425	13.3	6.801	187.1

Bu nedenle, uyarlamalı B-spline NFC denetimci değişken çevresel koşullar altında test edilmiş ve elde edilen sonuçlar, uyarlamalı B-spline NFC'nin dayanıklı olduğunu ve

değişik sıcaklık ve hava senaryosunda oldukça iyi performans gösterdiğini ispatlamaktadır.

2.7. Sonuçlar

Çevrimiçi uyarlamalı NFC ile B-spline fonksiyonları, yük ve gerçek zamanlı çevre koşulları dikkate alınarak PV enerji sistemini kontrol etmek için kullanılmıştır. PV enerji sisteminin performansı, sinirsel bulanık yapının B-spline fonksiyonları ile hibridizasyonu nedeniyle önemli miktarda arttırılmıştır. B-spline denetimci ile PV güneş panellerinin enerji dönüşüm verimliliği %17.14 civarında artmıştır. Denetimcinin etkinliği, yük değişikliği ve gerçek zamanlı ani çevresel değişiklikler gibi belirsizlikler uygulanarak dayanıklılık doğrulanmıştır. MGİ tabanlı denetimde bilinen klasik yöntemler, B-spline denetimci ile karşılaştırılmış ve B-spline denetimin üstünlüğü, hata indeksleri ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Simüle edilmiş sonuçlar, B-spline denetimcinin çevrimiçi uyarlanabilir özelliklerinin, yeni çalışma ortamları altında güçlü bir dayanıklılık sağladığını göstermektedir.

BÖLÜM 3. SOFC SİSTEMİNİN UYARLAMALI DENETİMİ

Bu bölümde, SOFC sisteminin denetimi için uyarlamalı dalgacık tabanlı yeni bir denetim yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen denetimciye iyileştirme, klasik NFC'nin sonuç (consequent) kısmında Legendre dalgacığının (Legendre wavelet) kullanılmasıyla elde edilmiştir. Legendre dalgacığının üstün zaman-frekans lokalizasyonuna özelliklerine sahip olması sebebiyle, önerilen denetimci diğer klasik denetimcilere kıyasla çıkış gerilimi, yakıt birimi, yakıt akışı, enerji dönüşüm verimliliği ve geçici ve kalıcı durum yanıtı açısından daha iyi performans sağlamaktadır. Yeni denetimcinin etkinliğini doğrulamak için bölümün sonunda gerçekleştirilen simülasyonlar verilmiştir.

3.1. Giriş

Yakıt hücreleri, hidrojenden elektrik enerjisi üretmek için ELZ kullanan verimli enerji dönüşüm cihazlarıdır. Yakıt pilleri, yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu, çevre dostu olma, yakıt esnekliği ve modülerlik gibi çeşitli avantajlar nedeniyle güç depolama alanında önemli bir yere sahiptir. Bir yakıt hücresi sisteminin dizel motora göre ek avantajları arasında, geliştirilmiş güvenilirlik ve düşük mekanik kayıp sayılabilir [75].

Ayrıca, çalışma esnasında kullanılmayan yakıt daha fazla güç üretmek için geri dönüştürülebilir ve bu sayede yakıt hücresinin genel performansı artar. Yakıt pilleri elektrolit tipine ve yakıtı göre çeşitli türlere ayrılır. Bunların arasında yer alan SOFC, geleceğin enerji endüstrisinde önemli bir yer tutacak en olası yakıt hücresi olarak kabul edilmiştir. Yüksek sıcaklık (600–1000°C) nedeniyle SOFC en az %50 verim sağlayabilir [76]. Kirliliklere karşı yüksek tolerans, yüksek akım yoğunluğu gibi diğer bazı özellikler, SOFC'in diğerlerine kıyasla daha iyi performans göstermesini sağlamaktadır [77, 78]. Yüksek verimlilik ve yakıt esnekliğine rağmen SOFC, geçici

rejimde yavaş yük takibi yeteneği gibi eksikleri söz konusudur [3, 79]. Bunun nedeni, güç değişimlerinin yakıt kullanımında dalgalanmalara neden olmasıdır. Daha iyi verimlilik için yüksek yakıt kullanım oranı gereksinimi söz konusudur. Tipik olarak, istenen yakıt kullanım oranı %80 ila %90 arasındadır [80, 81]. SOFC, hızlı güç değişimleri sırasında (kullanım çok yüksek olduğunda), akım-gerilim eğrisinde yüksek bir gerilim düşümü oluşur. Bununla birlikte, güç talebindeki ani değişimler, SOFC’de hidrojen açlığı yaratır. Sonunda, bu yakıt açlığı hücre dayanıklılığını azaltır [82, 83].

Son birkaç yılda, SOFC’in yük takibini iyileştirmek için farklı araştırmacılar tarafından önemli çalışmalar yapılmıştır. Bazı araştırmacılar, yüksek performans için SOFC’li SC gibi yüksek güç yoğunluklu cihazların kullanılmasını önermiştir. Bu bağlamda, çeşitli makale ve konferans bildirilerinde birçok yakıt hücresi ve SC tabanlı hibrit mimari rapor edilmiştir. Örneğin, birincil enerji kaynağı olarak yakıt hücresi ve ikincil olarak çift yönlü güç elektroniği dönüştürücüleri ile SC entegre edilmiş ve incelenmiştir [84]. Talepteki hızlı artışlar sırasında yakıt hücresi gerilim düşümünü azaltmak için bir akım denetim yaklaşımı kullanılmıştır. Yakıt hücresi akımı, hidrojen açlığını önlemek için kontrol edilir [85]. Ancak, yakıt hücresini yalnızca kalıcı durum koşullarında tutan bir DA terminal gerilimi kontrolü geliştirilmiştir. Buradaki stratejiye göre, yakıt hücresindeki mekanik stresleri azaltmak için SC’den güç alınmıştır. Ancak birçok araştırmacı, SOFC’den hızlı yanıt elde etmek için farklı denetim ve optimizasyon yöntemleri de önermiştir. Örneğin, bir SOFC-SC hibrit sisteminde bir uyarlamalı denetim yöntemi önerilmiştir [86]. Çalışmada yakıt açlığını azaltmak ve SOFC’in yük takip kapasitesini artırmak için bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Yakıt hücrelerinde oksijen açlığı sorununu çözmek için doğrusal olmayan bir referans regülatör stratejisi uygulanmıştır [87]. Bazı araştırmacılar, SOFC için sabit kazançlı doğrusal denetimcilere sahip güç elektroniği güç dönüştürücüleri önermiştir. SOFC’de bu tür sabit kazançlı doğrusal denetimcilerin uygulanması basittir. Ancak bu denetimciler sistem parametre bilgisi gerektirir.

Benzer şekilde, bazı çalışmalarda SOFC için öngörücü denetim (predictive control) önerilmiştir. Örneğin, bir yakıt hücresi/SC sistemi için model tabanlı bir tahmine

dayalı denetim yöntemi geliştirilmiştir [88]. Ancak bu yöntem tahmine dayalı denetim için yoğun hesaplama süresi gereklidir.

Bazı çalışmalarda olduğu gibi kural tabanlı denetim şemaları da geliştirilmiştir [89, 90]. Kural tabanlı denetim şemalarında, yönetilmesi zor olan çok fazla kural sebebiyle sistemin performansı zayıf kalabilmektedir. Literatürde akıllı denetim yöntemleri ve bunların modifikasyonları da sunulmuştur. Örneğin, SOFC tabanlı hibrit sistemin bulanık denetimi tartışılmıştır [91]. Bulanık öngörücü denetim gibi diğer başka yöntemler, sinirsel ağlar tabanlı öngörücü denetim, türev düzlük yöntemi, doğrusal kuadratik integral denetim, giriş-çıkış doğrusallaştırma denetimi gibi kontrol sistemleri yakıt hücresi sistemleri için geliştirilmiştir [92-99]. Ancak, yük takibi sorunu devam etmektedir.

Son yıllarda, yakıt hücrelerini kontrol etmek için araştırmacılar tarafından benimsenen en yaygın yöntem bulanık sinir ağları yöntemidir. Örneğin yakıt hücresi denetimi için NFC kullanılmıştır [100–102]. Ancak yine de, hesaplama karmaşıklığı ve ilk yerel minimumda takılıp kalmak, bulanık sinir ağları yaklaşımın sakıncalarından bazılarıdır [103]. Ayrıca, doğrusal sonuç kısmı sebebiyle, bulanık sinir ağları sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini ele almak için yetersiz kalmaktadır. Bu doğal sorunlar, NFC’de dalgacıklar kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır [104]. Dalgacıklar, NFC hesaplama hızını geliştirmek için etkili olmuştur [105]. Daha önce yapılan çalışmaların çoğu, polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri ile ilgilidir. SOFC sistemleri hakkında az sayıda araştırma çalışması yapılmış ve bu araştırmalarda çok özel koşullar göz önünde bulundurulmuştur. Çok büyük değişiklikler olması durumunda, sistem parametreleri sistemde kararsızlık yaratan sınırları aşar. Bu gibi durumlarda doğrusal olmayan uyarlamalı bir denetim yöntemi, doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmek için oldukça mükemmeldir.

Bu bölümde, SOFC güç sistemi (yakıt hücresi, hidrojen tankı, ELZ ve güç dönüştürücüler) için yeni bir çevrimiçi uyarlamalı dalgacık dönüşümü tabanlı denetim yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yeni denetimcinin yapısı, SOFC’in yük takip sorununu, uyarlamalı kontrol ile çözmek için yedi katmanlı dalgacık tabanlı NFC

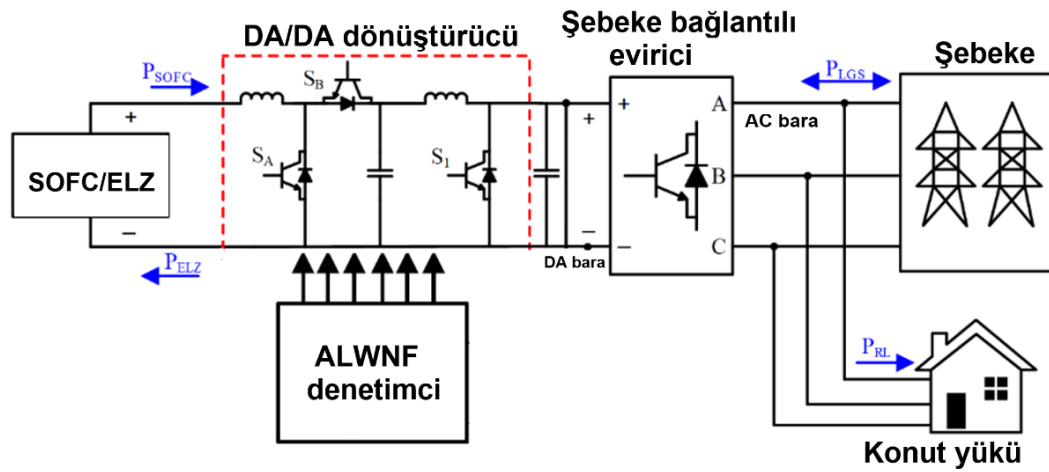
önerilmiştir. Legendre dalgacıkları gömülü sinirsel gradyan inişi geri yayımlı yöntemi kullanılarak kontrol sisteminin parametrelerini ayarlanmaktadır. Önerilen denetimci SOFC'in çıkış gerilimini, yakıt (hidrojen) kullanımı ve hidrojen akışını kontrol etmektedir. Yeni denetiminin performansı verimlilik, güç takibi, yük gerilimi ve diğer dinamik performans parametreleri açısından geleneksel denetimcilerin yanı sıra akıllı denetimcilerle de karşılaştırmıştır.

3.2. Sistemin Açıklaması ve Denetimi

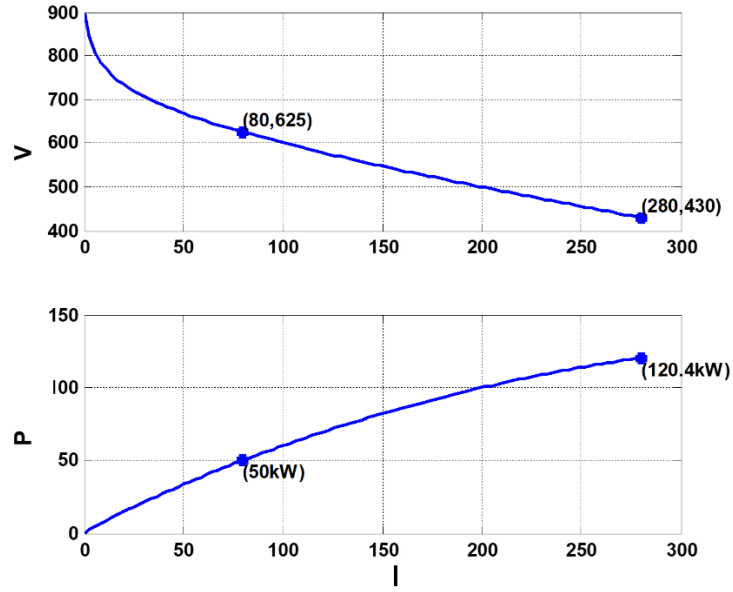
Şekil 3.1. SOFC'in tanımını ve önerilen denetimini göstermektedir. SOFC DA/DA dönüştürücü üzerinden DA hatta bağlıdır. DA bara çıkışındaki güç ardından akım denetimi ile kontrol edilen şebeke bağlı evirici üzerinden şebekeye verilir. SOFC'in çıkışı, uyarlamalı bir sinirsel bulanık Legendre dalgacık denetimcisine sahip hidrojen akış düzenleyicisi kullanılarak kontrol edilir.

Önerilen yöntem, yük değişimleri göz önünde bulundurularak bir günü tamamlayacak şekilde simüle edilmiştir. Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi SOFC P-I ve V-I eğrileri doğrusal değildir. SOFC çıkış gücü (3.1) eşitliği ile ifade edilir.

$$P_{SOFC} = V_{SOFC} I_{SOFC} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Güç sisteminin yapısı



Şekil 3.2. SOFC'in P-I ve V-I eğrileri

3.2.1. SOFC sisteminin dinamik modellemesi

SOFC hidrojen moleküllerinde tutulan enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için bir elektrokimyasal reaksiyon kullanır. Saf hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının yan ürünleri olarak ısı ve temiz su üretilir. Bir SOFC tipik olarak bir elektrolit ve anot ve katot olmak üzere iki elektrottan oluşur. Anot ayrı bir silindirden hidrojen alırken, katot oksijen alır. Elektrik üretmek için sırasıyla anot ve katotta oksidasyon ve indirgeme gerçekleşir. SOFC dinamik modeli üretilen çıkış gerilimi ile Nernst potansiyeli arasındaki mevcut ilişkiden türetilmiştir [106, 107].

$$V_{SOFC} = N_s E - V_L \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliğinde V_{SOFC} , yakıt hücresi yığının çıkış gerilimini temsil eden ve N_s bağlı hücre sayısını gösterir (seri), V_L gerilim kayıplarıdır ve E yakıt hücresinden belirlenen Nernst potansiyeli ve şu şekilde verilir.

$$E = E_0 + E \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \quad (3.3)$$

(3.3) eşitliğinde E_0 , reaksiyon serbest enerjisine karşılık gelen gerilimi belirtir, T yakıt hücresi sıcaklığına karşılık gelir, R ve F sırasıyla genel gaz sabitini ve Faraday sabitini temsil eder. p_{H_2O} , p_{H_2} ve p_{O_2} sırasıyla su, hidrojen ve oksijenin kısmi basınçlarını gösterir. p_{H_2O} , p_{H_2} ve p_{O_2} değerleri aşağıda belirtilen denklemler kullanılarak belirlenebilir.

$$p_{H_2} = -\frac{1}{t_{H_2}} \left(p_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} (M_{H_2,SOFC} - 2K_r I_{SOFC}) \right) \quad (3.4)$$

$$p_{H_2O} = -\frac{1}{t_{H_2O}} \left(p_{H_2O} + \frac{2}{K_{H_2O}} K_r I_{SOFC} \right) \quad (3.5)$$

$$p_{H_2} = -\frac{1}{t_{O_2}} \left(p_{O_2} + \frac{1}{K_{O_2}} (M_{O_2,SOFC} - K_r I_{SOFC}) \right) \quad (3.6)$$

(3.4)-(3.6) eşitliklerinde $M_{H_2,SOFC}$ ve $M_{O_2,SOFC}$ sırasıyla hidrojen ve oksijeni temsil eder. K_{H_2O} , K_{H_2} ve K_{O_2} sabitlerdir. K_r aynı zamanda bir sabittir ve yakıt hücresi akımı (I_{SOFC}) ile hidrojen $q_{H_2}^r$ reaktan oranı arasındaki bağıntı yardımıyla elde edilebilir ve (3.7) eşitliğinde verilmiştir.

$$q_{H_2}^r = 2K_r I_{SOFC} \quad (3.7)$$

3.2.2. Elektrolizör (ELZ) modeli

Elektrik gücü, hidrojen üretimi için ELZ tarafından kullanılır. Çıkış gerilimi bir ELZ hücresinden hesaplanabilir [106, 107].

$$E_{cell} = E_0 + \frac{I_{ele}(r_1 + r_2 T_{ele})}{A_{ele}} + E_1 \log \left\{ \frac{\left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{T_{ele}} + \frac{\tau_3}{T_{ele}^2} \right)}{A_{ele}} + 1 \right\} \quad (3.8)$$

(3.8) eşitliğinde T_{ele} ve E_0 sırasıyla ELZ sıcaklığı ve termodinamik hücre gerilimidir; τ_i ve E_1 ELZ aşırı gerilim parametreleridir; r_i omik direnç parametresini temsil eder ve A_{ele} elektrot alanını belirtir. V_{ele} ELZ'deki toplam çıkış gerilimi gösterir ve (3.9) eşitliği ile tanımlanabilir.

$$V_{ele} = N_{ele} E_{cell} \quad (3.9)$$

N_{ele} hücre sayısını gösterir. ELZ net güç tüketimini (3.10) eşitliği ile verilmiştir.

$$P_{ele} = V_{ele} I_{ele} \quad (3.10)$$

Hidrojen üretim hızı R_{H_2} uygulanan akım cinsinden (3.11) eşitliği ile ifade edilir.

$$R_{H_2} = \lambda(T, D) \frac{N_{ele}}{2F} I_{ele} \quad (3.11)$$

D akım yoğunluğudur ve λ sıcaklıktır. Bu ikisi fonksiyonunu oluşturur. Sabit hidrojen basıncını korumak için aşağıdaki Denklem (3.12)'ye uyulmalıdır. Bir başka deyişle hidrojenin üretim ve çıkış değerleri eşit olmalıdır.

$$\frac{C_{ele}}{RT_{ele}} \frac{d}{dt} p_{H_2,ele} = R_{H_2} - R'_{H_2,ele} \quad (3.12)$$

C_{ele} katot hacmidir ve $\dot{R}_{H_2,ele}$ molar hidrojen çıkış hızıdır.

3.2.3. Kompresör ve hidrojen tankı modeli

$\dot{R}_{H_2,ele}$ ile kompresör gücü (P_C) arasındaki ilişki (3.13) eşitliği kullanılarak politeknik modele dayalı olarak geliştirilebilir.

$$R'_{H_2,ele} = \frac{\beta_C}{\gamma} P_C \quad (3.13)$$

$$\gamma = \frac{kRT_{ele}}{k-1} \left\{ \left(\frac{t_p}{p_{ele}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right\}$$

Gerekli miktarda hidrojen ELZ tarafından yakıt hücresine gönderilir ($R_{H_2,sofc}$) ve ($\dot{R}_{H_2,net}$) ile gösterilen kalan hidrojen miktarı, depolama tankına taşınır (3.14) eşitliği ile ifade eder.

$$R'_{H_2,net} = R'_{H_2,ele} - R_{H_2,sofc} \quad (3.14)$$

Depolanan hidrojen basıncını (P_{H_2}), hesaplamak için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT_t}{\tilde{V}_t} R'_{H_2,net} \quad (3.15)$$

(3.15) eşitliğinde T_t ve $\tilde{V}_t$ sırasıyla depolama tankı sıcaklığını ve depolama tankı hacmini gösterir.

3.3. SOFC'in Çevrimiçi Uyarlamalı Dalgacık Tabanlı Denetimi

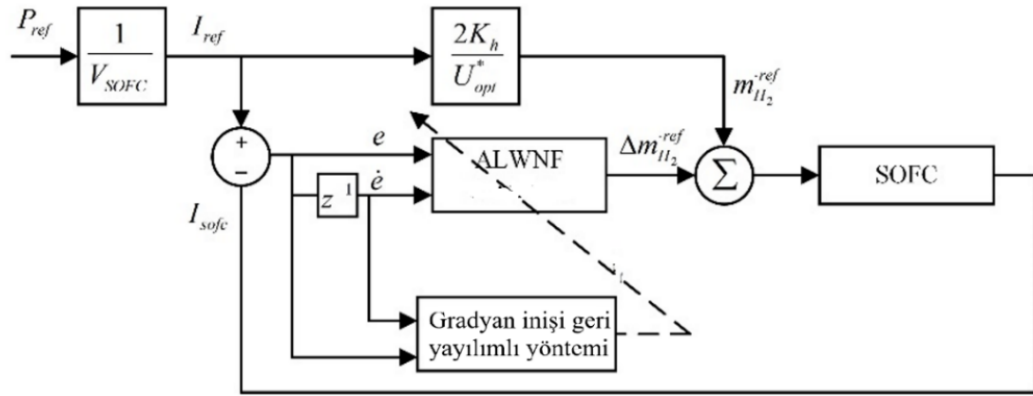
SOFC'in tepki süresini iyileştirmek için girdisinin (hidrojen) kontrol edilmesi gerekmektedir. Giriş hidrojeni, SOFC akımındaki artışla artar ve bunun tersi de geçerlidir. SOFC yığın akımı şu şekilde (3.16) eşitliği ile ifade edilir.

$$m_{H_2}^{in} = \left(\frac{2k}{H_2^{uti}} \right) I_{sofc} \Rightarrow I_{sofc} = \left(\frac{H_2^{uti}}{2k} \right) m_{H_2}^{in} \quad (3.16)$$

H_2^{uti} optimal bir hidrojen kullanımını tanımlar ve tipik aralığı %80-90'dır. m_2^{uti} giriş hidrojeninin molar akışını temsil eder, karşılık gelen çıkış akımı (3.17) eşitliği ile edilmektedir.

$$\frac{0.8m_{H_2}^{in}}{2k} = I_{sofc-min} \leq I_{sofc-r} \leq I_{sofc-mak} = \frac{0.9m_{H_2}^{in}}{2k} \quad (3.17)$$

k , SOFC'de reaksiyona giren hidrojen miktarını sağlayan sabiti temsil eder. $0.8m_{H_2}^{in}$ sırasıyla minimumdur ve $0.9m_{H_2}^{in}$, hidrojen molar akışının maksimum limitidir. $I_{sofc-min}$ and $I_{sofc-mak}$ minimum ve maksimum SOFC akımlarıdır, I_{sofc-r} ise referans akımıdır. Yukarıda belirtilen hidrojen tüketimi ve akımı limiti, V-I eğrisinin optimum çalışma noktasını elde etmek için kullanılır.

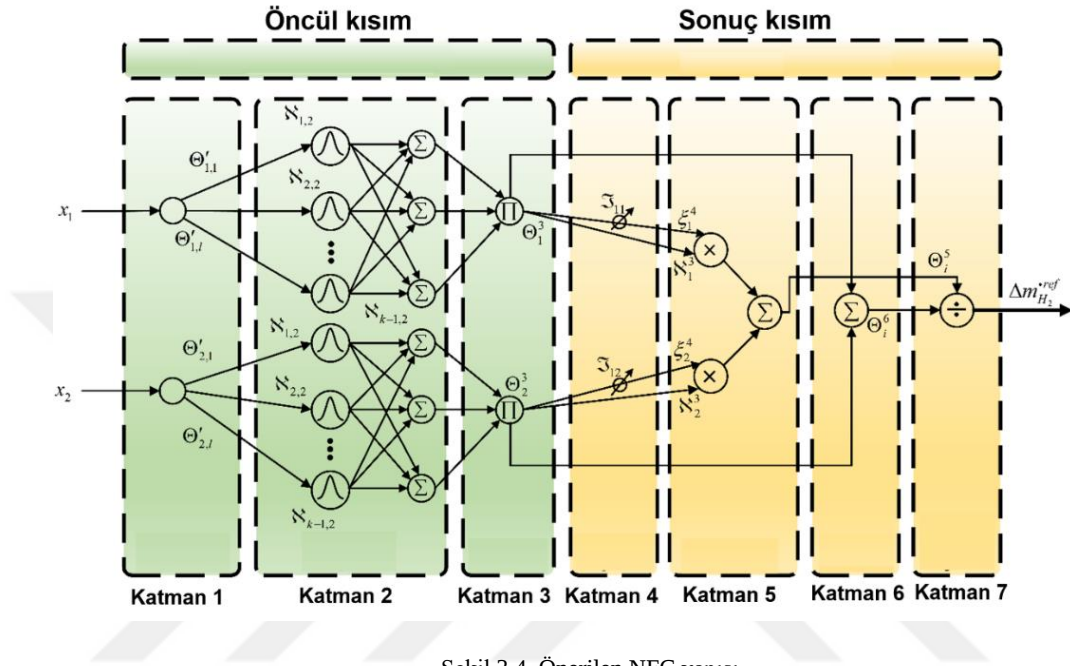


Şekil 3.3. SOFC'in önerilen denetim stratejisi

Sürekli yük dalgalanmaları, SOFC için çeşitli farklı çıkış güç noktaları oluşturur. Girdi hidrojen akış hızındaki bu tür değişimler kapalı çevrim bir denetim sistemini gerektirir. SOFC'in güç talebi, Denklem (3.18)'deki bir akım talep girdisi ile ifade edilir. Şekil 3.3. SOFC için önerilen uyarlanabilir dalgacık tabanlı denetim stratejisini açıklamaktadır.

$$I_{sofc-r} = \frac{P_{sofc-r}}{V_{sofc}} \quad (3.18)$$

SOFC'den hızlı yanıt elde etmek için bir Legendre dalgacık tabanlı uyarlanabilir sinirsel bulanık denetim bu çalışmada önerilmektedir. SOFC sistemini analiz etmek için Legendre dalgacık sinirsel bulanık tanımlayıcısı uygulanır. Önerilen sinirsel bulanık yaklaşım, Şekil 3.4.'te gösterildiği gibi 7 katmandan oluşur.



Şekil 3.4. Önerilen NFC yapısı

Birinci katman: Bu katmanda değişkenlerin (girdilerin) sayısı toplanır ve daha sonra düğümler kullanılarak ikinci katmana gönderilir.

$$\Theta_i^1(k) = x_i^1(k) \quad (3.19)$$

$$\eta_i^1(k) = \Theta_i^1(k) = x_i^1(k) \quad (3.20)$$

(3.19) ve (3.20) eşitliklerinde, $i = 1, 2, \dots, m$ düğüm sayısıdır ve k yineleme anlamına gelir.

İkinci katman: Bulanık sistem, dilsel terimleri her bir girdiyi üyelik dereceleriyle birlikte toplar. Dilsel değerlerin her girişi Gauss üyelik fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.

$$\Theta_i^2(k) = \eta_i^1(k) = x_i^1(k) \quad (3.21)$$

$$\Theta_i^2(k) = \aleph_i^2 = e^{-0.5 \left(\frac{\Theta_i^2(k) - m_i}{\sigma_i} \right)^2} = e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \quad (3.22)$$

(3.21) ve (3.22) eşitliklerinde, m_{ij} ve σ_{ij} sırasıyla Gauss üyelik fonksiyonunun merkezini ve varyansını gösterir.

Üçüncü katman: Bulanık üyelik fonksiyonu çalıştırılır. Çıkış değerini hesaplamak için MIN işlemi uygulanır ve (3.23)-(3.24) eşitlikleri ile ifade eder.

$$\Theta_i^3(k) = \eta_i^2 = \aleph_i^2 = e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \quad (3.23)$$

$$\Theta_i^3(k) = \aleph_i^3 = \prod_{i=1}^m \aleph_i^2 = \prod_{i=1}^m e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \quad (3.24)$$

Dördüncü katman: Bu katmanda, Legendre dalgacık fonksiyonu yapıya tanıtılır ve şu şekilde verilir.

$$\mathfrak{I}_{nq}(x) = \begin{cases} 2^{0.5h} C_q^*(2^h x - 2n + 1), & \forall x < \frac{n}{2^{h-1}} \\ 0, & o.w \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\Theta_i^4 = \xi_i^4 = f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q \in \mathbb{Z}} \lambda_{nq} \mathfrak{I}_{nq}(x) \quad (3.26)$$

(3.25) ve (3.26) eşitliklerinde, $x = \Theta_i^4$, bu katmanın girişi $\Theta_i^4 = \mathfrak{I}_{nq}(\Theta_i^4)$ ve bu katmanın çıktısıdır.

Beşinci katman: Hem öncül hem de sonuç bileşenlerinin çıktıları çarpılır ve ardından her girdi için toplanır ve (3.27) eşitliği ile ifade eder.

$$\Theta_i^5(k) = \sum_{i=1}^m \xi_i^4 \aleph_i^3 \quad (3.27)$$

Altıncı katman: Tüm kurallar (yani üçüncü katmanın çıktısı) bu katmanda toplanır ve (3.28) eşitliği ile ifade eder.

$$\Theta_i^6(k) = \sum_{i=1}^m \aleph_i^3 \quad (3.28)$$

Yedinci katman: Son olarak önerilen denetiminin çıkışı hesaplanır ve (3.29) eşitliği ile ifade eder.

$$\Delta m_{H_2}^{ref} = \Theta_i^7(k) = \frac{\Theta_i^5(k)}{\Theta_i^6(k)} = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i^4 \aleph_i^3}{\sum_{i=1}^m \aleph_i^3} \quad (3.29)$$

3.3.1. Uyarlamalı kontrol ile parametreler güncelleme

Gradyan inişi geri yayımlı yöntemi denetiminin hem öncül hem de sonuç bölümlerinin ağırlıklarını güncellemek için kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonu şu şekilde minimize edilir.

$$\ell = (y_d - y)^2$$

$$E = \frac{1}{2} \ell + \frac{1}{2} \Delta^2 m_{H_2}^{ref} \quad (3.30)$$

$\Delta m_{H_2}^{ref}$ önerilen denetiminin çıktısıdır. Üç parametre güncellenir.

$$\tau = [m, \sigma, \gamma]^T \quad (3.31)$$

(3.31) eşitliğinde (m, σ) öncül kısmın ortalamalarını ve varyanslarını temsil ederken, γ Legendre dalgacık fonksiyonunun ağırlıklarını gösterir. Gradyan inişi geri yayımlı kullanılarak τ için güncelleme denklemi şu şekilde yazılır.

$$\tau(u+1) = \tau(u) + \wp \frac{\partial E}{\partial \tau} \quad (3.32)$$

(3.32) eşitliğinde $\wp$ öğrenme oranını gösterir. $\frac{\partial E}{\partial \tau}$ faktörünü zincir kuralı kullanarak değerlendirirken, son denklemler (3.33)-(3.35) şöyledir.

$$\gamma_{ij}(u+1) = \gamma_{ij}(u) + \wp \ell \left(\frac{\aleph_i^3}{\Theta_i^6(u)} \Im_{nq}(\Theta_i^4) \right) \quad (3.33)$$

$$\sigma_{ij}(u+1) = \sigma_{ij}(u) + \wp \ell \left(\frac{\xi_i^4 - \Delta m_{H_2}^{ref}}{\Theta_i^6(u)} \right) \aleph_i^3 \cdot 2 \left(\frac{u_i - m_{ij}}{\sigma_{ij}^2} \right) \quad (3.34)$$

$$m_{ij}(u+1) = m_{ij}(u) + \wp \ell \left(\frac{\xi_i^4 - \Delta m_{H_2}^{ref}}{\Theta_i^6(u)} \right) \aleph_i^3 \cdot 2 \left(\frac{(u_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3} \right) \quad (3.35)$$

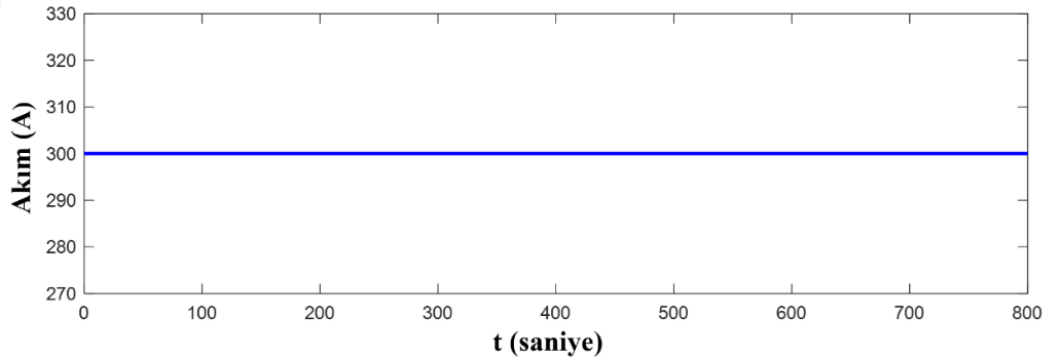
3.4. Tartışma ve Simülasyonlar

Önerilen yöntemin etkinliğini test etmek için aşağıdaki simülasyonlar iki farklı durumda gerçekleştirilir ve sonuçlar elde edilir.

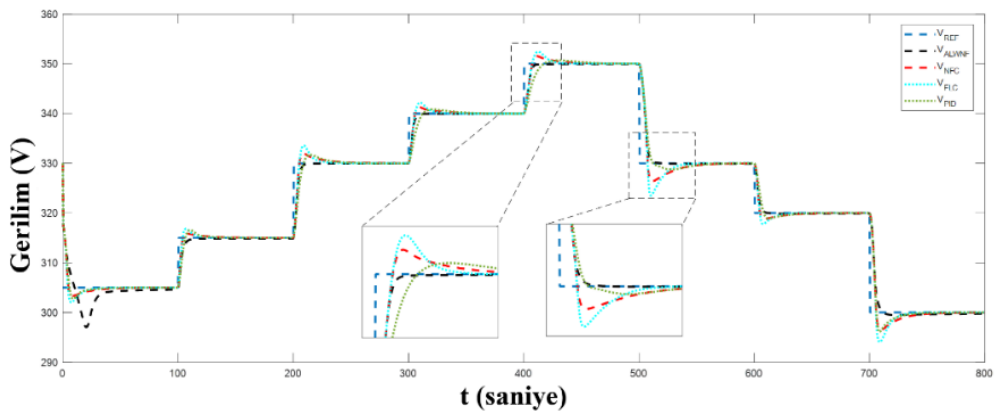
3.4.1. Sabit akım ve değişken gerilim (durum 1)

Bu durum sırasında, gerilim farklı aralıklarla değiştirilirken SOFC'in akımı sabit tutulur ve önerilen denetimci ile birlikte farklı denetimcilerin etkinliği çıkış gerilimi, yakıt kullanımı, yakıt akışı (hidrojen) ve şebeke bağlantılı evirici taraflarında kontrol edilmiştir (bkz. Şekil 3.5.-3.9.). Örneğin, Şekil 3.5.'te akım 300A'da tutulmaktadır ve farklı denetimciler tarafından üretilen çıkış gerilimi ve referans gerilimi Şekil 3.6.'da gösterilmektedir. Önerilen denetimci, PID denetimci, FLC ve NFC ve referans gerilimi sırasıyla noktalı siyah, noktalı açık yeşil, noktalı açık mavi, noktalı kırmızı, noktalı mavi ile gösterilir. Referans (nominal) gerilim 305 V değerinde başlar ve sonrasında sırasıyla 100, 200, 300 ve 400. saniyede kademeli olarak 315 V, 330 V, 340 V ve 350 V değerine yükseltilir. Sonrasında referans gerilimi sırasıyla 500, 600 ve 700. saniyede 330 V, 320 V ve son olarak 300 V değerine düşürülür. Şebeke bağlantılı evirici, şebeke ve konut güçleri Şekil 3.9.'da gösterilmektedir. $t = 375$. saniye ve 700. saniyede konut

yükü gereksinimi şebeke bağlantılı evirici çıkış gücünden daha büyüktür, bu nedenle şebeke, güç talebini karşılaması için şebeke bağlantılı eviriciye güç desteği yapmaktadır. Tüm bu değişikliklerin detayları ve tüm denetimler için aşma ve yerleşme zamanı açısından yanıtlar Tablo 3.1.'de sunulmuştur. Yakınlaştırılmış grafikler (yani, 400. saniye ve 510. saniyede), Şekil 3.5.'teki tüm denetimcilerin performansını daha net şekilde açıklamaktadır. Diğer denetimcilerin (yani, PID, FLC, NFC) performansı, Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi yerleşme zamanının artması ve aşma ile gösterilen performans parametrelerinin bozulmasıyla düşmektedir. Örneğin (anahtarlama zamanı 100. saniye, 305 V – 315 V), önerilen denetimci için aşma %0.0 olarak ve yerleşme zamanı 11.09 saniye olarak görülmektedir.



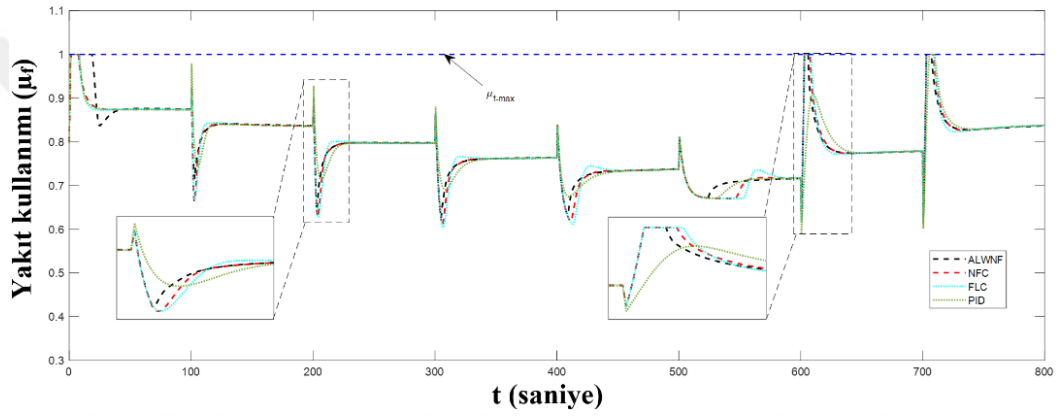
Şekil 3.5. Sabit akım (durum 1)



Şekil 3.6. SOFC'in farklı denetimcilerle çıkış gerilimi (durum 1)

Ayrıca, NFC'nin yerleşme zamanı ve aşması, FLC ve PID denetimcilerden daha düşüktür. Bu modeller ve detayları, Şekil 3.5.'te farklı anahtarlama süreleri için

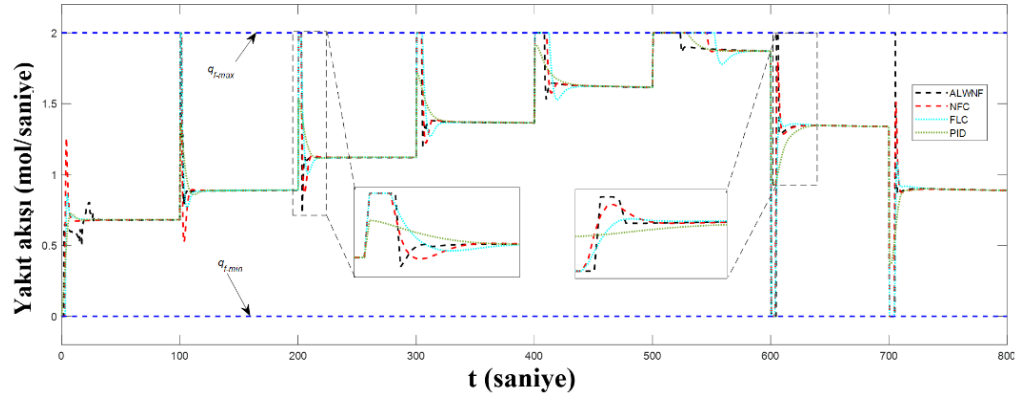
görülebılır. Daha fazla analiz yapmak için, SOFC sisteminin dinamik yanıtı (indeks parametreleri, yani IAE, ISE, ITAE, ITSE ve MRE) Denklem (3.36) kullanılarak her bir denetímci için hesaplanıp Şekil 3.10.'da gösterilmektedir. Tüm indeks parametrelerinin değérlerinin (Tablo 3.2.'de özetlendiği gibi) yeni denetímci göz önüne alındığında çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu da diğerlerine göre daha iyi performans ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Şekil 3.11.'de sunulan tüm denetímçilerin verimliliği (durum 1) hesaplanır. Aynı çalışma koşulları göz önüne alındığında önerilen denetímci ile elde edilen enerji dönüşüm verimliliğinin diğer denetímçilere göre çok daha iyi olduğu görülmektedir.



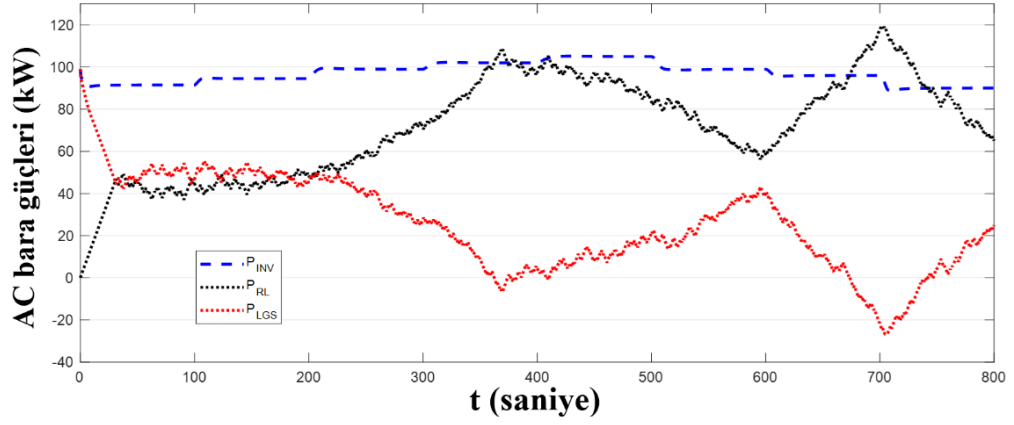
Şekil 3.7. Yakıt kullanımı (durum 1)

Önerilen denetímci ile %99.97 verimlilik gözlemlenmiştir, bunu Tablo 3.2.'de özetlendiği gibi NFC (%98.03), FLC (%96.07) ve ardından PID (%95.10) takip eder.

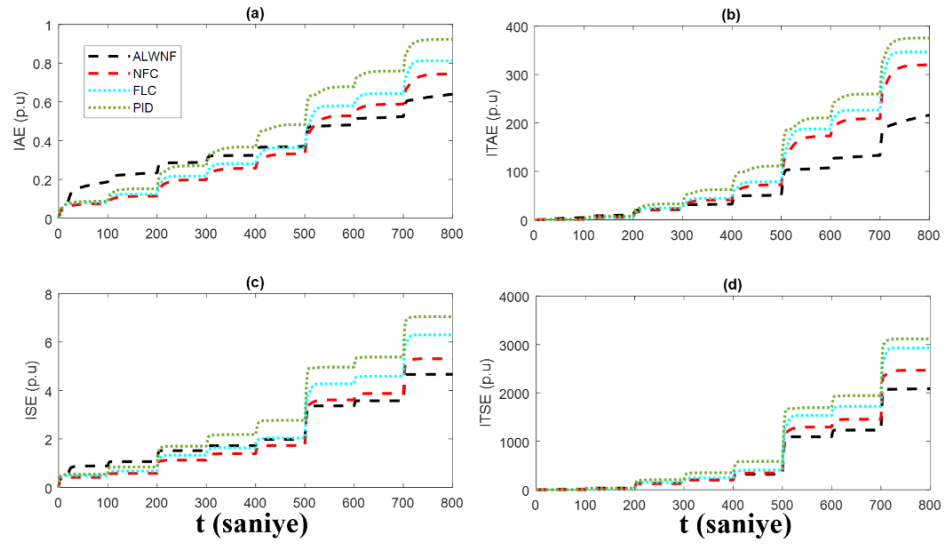
$$\begin{aligned}
 IAE &= \int_0^t |e(t)| dt \\
 ISE &= \int_0^t e^2(t) dt \\
 ITAE &= \int_0^t t |e(t)| dt \\
 ITSE &= \int_0^t t e^2(t) dt
 \end{aligned} \tag{3.36}$$



Şekil 3.8. Yakıt akışı (durum 1)



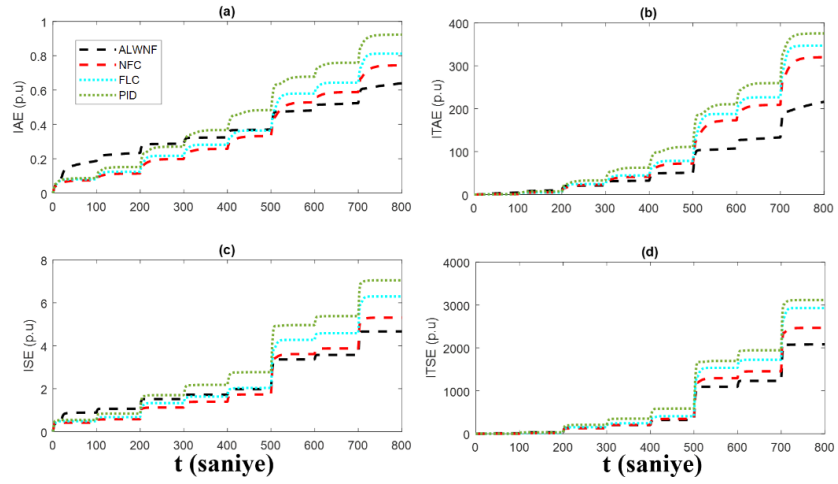
Şekil 3.9. AC bara güçleri (durum 1)



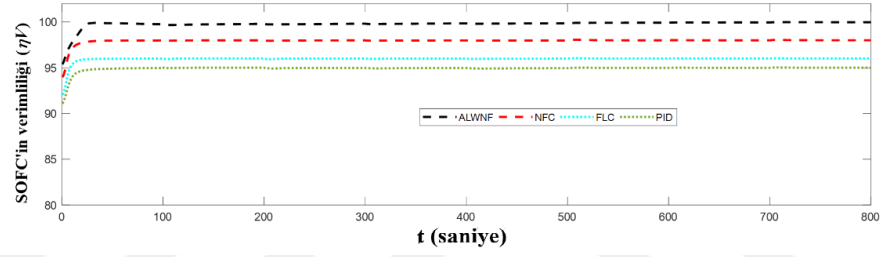
Şekil 3.10. Dinamik performans karşılaştırmasının simülasyonu (durum 1)

Tablo 3.1. Sabit akım ve değişken gerilimin ayrıntılı verileri (durum 1)

Anahtarlama zamanı	Denetimci tipi	Yerleşme zamanı	Aşma
100s 305-315V	ALWNF	11.09 s	%0.0
	NFC	32.3 s	%30
	FLC	32.0 s	%59
	PID	40 s	%51
200s 315-330V	ALWNF	12.1 s	%0.0
	NFC	49.1 s	%28
	FLC	38.2 s	%48
	PID	53.1 s	%53
300s 330-340V	ALWNF	10.9 s	%0.0
	NFC	42.0 s	%39
	FLC	36.5 s	%64
	PID	60.7 s	%25
400s 340-350V	ALWNF	13.6 s	%0.0
	NFC	49.4 s	%43
	FLC	39.6 s	%70
	PID	73.1 s	%20
500s 350-330V	ALWNF	16.6 s	%0.0
	NFC	61.2 s	-%28
	FLC	50.1 s	-%49
	PID	74.2 s	-%37
600s 330-320V	ALWNF	11.2 s	%0.0
	NFC	42.6 s	-%38
	FLC	36.6 s	-%70
	PID	56.5 s	-%33
700s 320-300V	ALWNF	12.1 s	%0.0
	NFC	59.7 s	-%29
	FLC	45.1 s	-%49
	PID	57.8 s	-%64



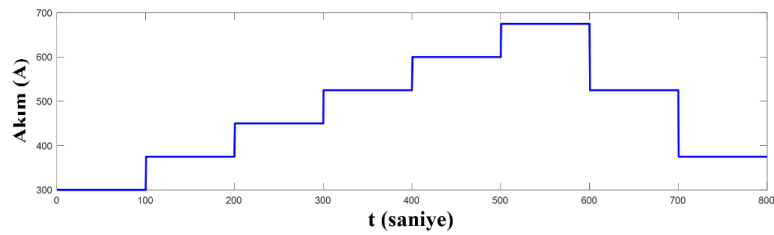
Şekil 3.11. Dinamik performans karşılaştırmasının simülasyonu (durum 1)



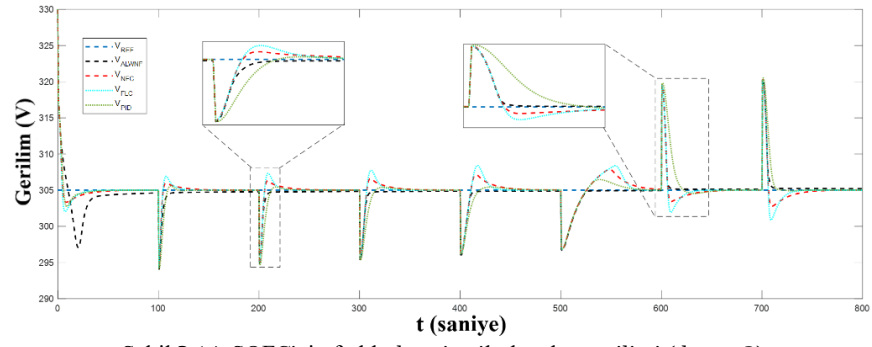
Şekil 3.12. Farklı denetimciler kullanarak SOFC'in verimliliği (durum 1)

Table 3.2. SOFC sisteminin verimliliği ve dinamik yanıtın (p.u) (durum 1)

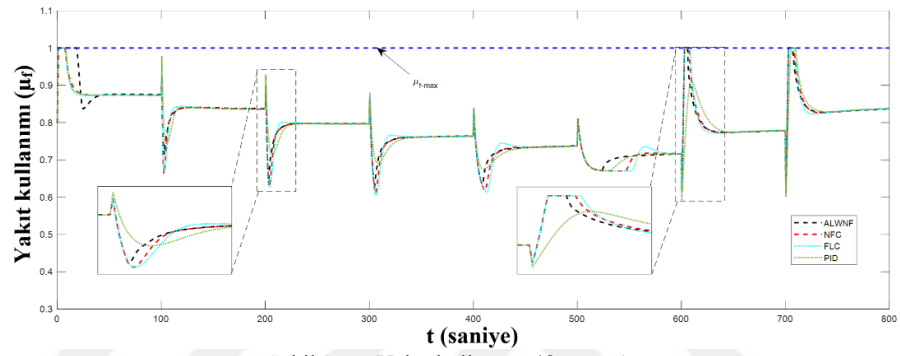
Denetimci	Verimliliği artırmak (ηV)	IAE	ITAE	ISE	ITSE
ALWNF	99.97	0.639	216	4.66	2084
NFC	98.03	0.743	320	5.31	2464
FLC	96.07	0.812	346	6.29	2929
PID	95.10	0.922	375	7.04	3115



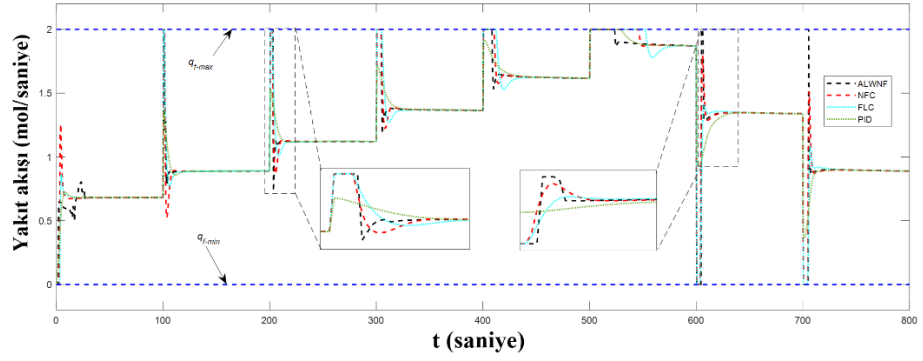
Şekil 3.13. Değişken akım (durum 2)



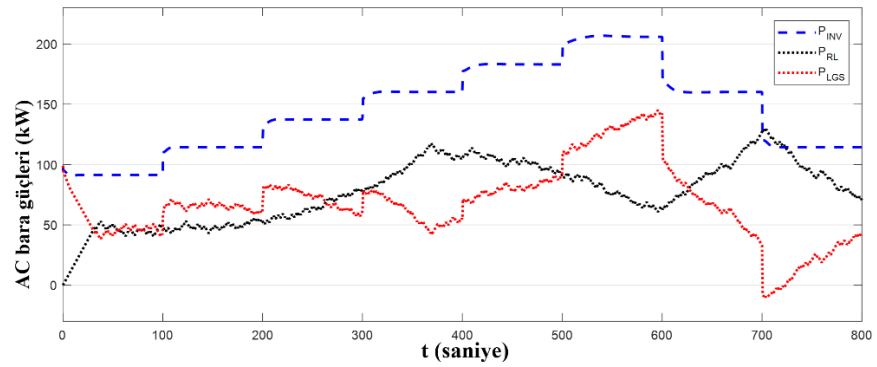
Şekil 3.14. SOFC'nin farklı denetimcilerle çıkış gerilimi (durum 2)



Şekil 3.15. Yakıt kullanımı (durum 2)



Şekil 3.16. Yakıt akışı (durum 2)



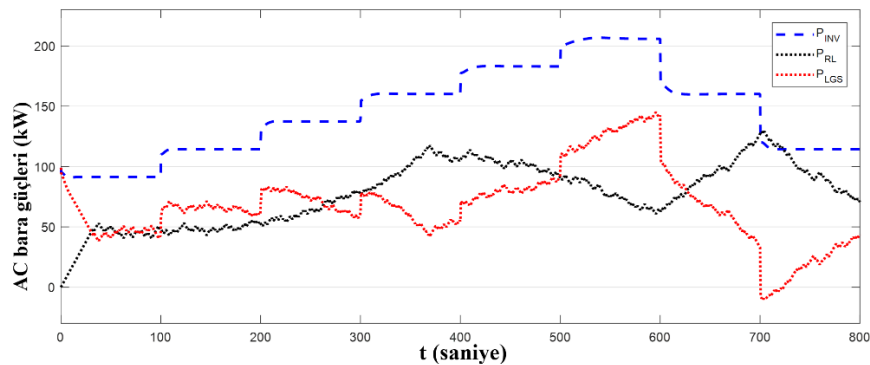
Şekil 3.17. AC bara güçleri (durum 2)

3.4.2. Sabit gerilim ve değişken akım (durum 2)

Bu durum sırasında, SOFC'in gerilimi anma değerinde sabit tutulur ve akım farklı aralıklarla değiştirilir. Örneğin, akımın ilk başlangıç değeri 300 A'dır ve daha sonra 100, 200, 300, 400, 500. saniyede sırasıyla 375 A, 450 A, 525 A, 600 A, 675 A'ya yükseltilir. Benzer şekilde, akım daha sonra şekil 3.12.'de gösterildiği gibi sırasıyla 600 ve 700 saniyede 525 A'e ve ardından 375 A'e düşürölür. Simölasyonların sonuçları şekil 3.13.-3.16.'da gösterilmektedir. Tüm bu durumun detayları Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Durum 1'e benzer şekilde, ALWNF'in performansı diğer denetimcilere kıyasla daha üstündür. Başlangıç aralığı, (yani 100 saniye ve 300 A - 375A), önerilen denetimci ile yerleşme zamanı ve aşma, sırasıyla 14.5 saniye ve %0.0 olarak gözlenir. Aynı aralıkta, yerleşme zamanları ve aşmaları NFC ile 56 saniye ve %33, FLC ile 34.5 saniye ve %62 ve PID ile 31.5 saniye ve %20 olarak görölmeaktadır. Tüm bu değişimler ve detaylar şekil 3.13.'te gösterilmiş ve Tablo 3.3.'te verilmiştir.

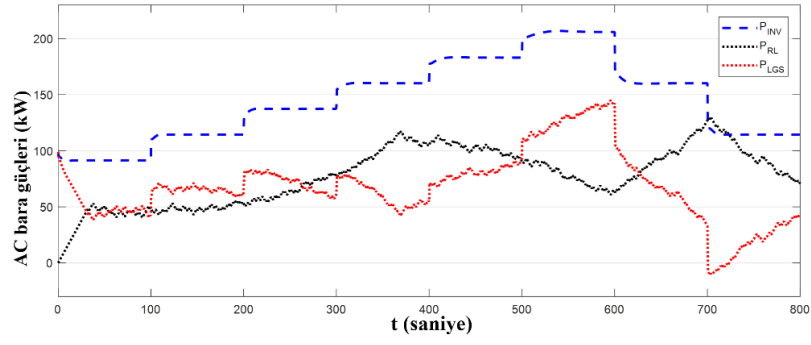
Durum 2 için performans indeksi parametreleri Denklem (3.36) kullanılarak hesaplanmış ve şekil 3.17.'de gösterilmiştir. Önerilen denetimci ile tüm indeks parametrelerinin değerleri (Tablo 3.4.'te özetlenmiştir) çok daha düşüktür. Bu da önerilen denetimcinin dinamik performans ačíısından diğerlerine göre üstünlüğünü göstermektedir.



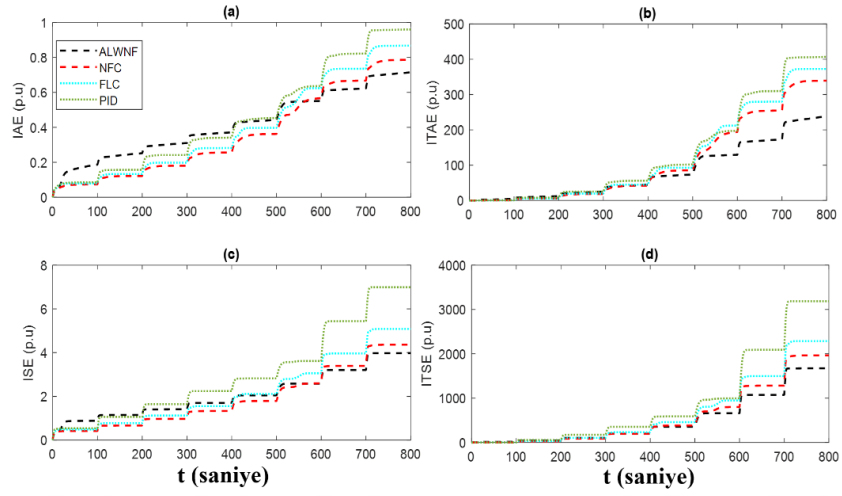
şekil 3.18. AC bara güçleri (durum 2)

Tablo 3.3. Sabit akım ve değişken gerilimin ayrıntılı verileri (durum 2)

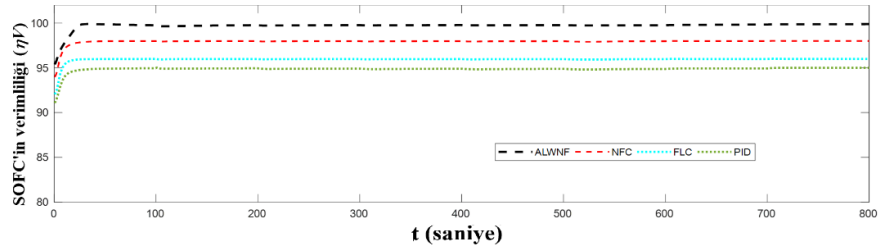
Anahtarlama zamanı	Denetimci	Yerleşme zamanı	Aşma
100 s, 300-375 A	ALWNF	14.5 s	%0.0
	NFC	56 s	%33
	FLC	34.5 s	%62
	PID	31.5 s	%20
200 s, 375-450 A	ALWNF	14.5 s	%0.0
	NFC	63 s	%13
	FLC	39 s	%75
	PID	41.5 s	%43
300 s, 450-525 A	ALWNF	14 s	%0.0
	NFC	68.5 s	%52
	FLC	41 s	%92
	PID	68.5 s	%13
400 s, 525-600 A	ALWNF	17 s	%0.0
	NFC	84.5 s	%39
	FLC	48.5 s	%55
	PID	90 s	%13
500 s, 600-675 A	ALWNF	28.5 s	%0.0
	NFC	100 s	%55
	FLC	82 s	%95
	PID	100 s	%49
600 s, 675-750 A	ALWNF	13 s	%0.0
	NFC	75.5 s	-%52
	FLC	47 s	-%52
	PID	63.5 s	-%16
700 s, 750-825 A	ALWNF	15 s	%0.0
	NFC	74 s	-%72
	FLC	48 s	-%67
	PID	48 s	-%30



Şekil 3.19. AC bara güçleri (durum 2)



Şekil 3.20. Dinamik performans karşılaştırmasının simülasyonu (durum 2)



Şekil 3.21. Farklı denetimler kullanarak SOFC'in verimliliği (durum 2)

Tablo 3.4. SOFC sisteminin verimliliği ve dinamik yanıtın (p.u) (durum 2)

Denetimci	Verimliliği artırmak (ηV)	IAE	ITAE	ISE	ITSE
ALWNF	99.89	0.714	238.6	3.97	1673
NFC	98.13	0.786	339.4	4.36	1963
FLC	96.12	0.866	373.1	5.08	2286
PID	94.85	0.959	407.1	6.99	3187

Benzer şekilde, SOFC sisteminin verimliliği (durum 2), Şekil 3.18.'de verilen tüm denetimler kullanılarak hesaplanmıştır, ve detayları Tablo 3.4.'te özetlenmiştir. Durum 2 için önerilen denetimi ile SOFC sisteminin verimliliğinin %99.89, ardından NFC (%98.13), FLC (%96.12) ve ardından PID (%94.85) olduğu görülmüştür.

3.5. Sonuçlar

Bu bölümde SOFC tabanlı bir güç sisteminin çevrimiçi olarak geliştirilmiş uyarlamalı dalgacık denetimi tabanlı, özgün bir yöntemle kontrolü sağlanmıştır. Klasik NFC performansını geliştirmek için Legendre dalgacık kullanımı kullanılmıştır. Böylece SOFC'nin verimliliği %5.04 civarında artmıştır. Geleneksel ve akıllı denetimcilerle karşılaştırıldığında çıkış gerilimi, yakıt kullanımı, yakıt akışı, enerji dönüşüm verimliliği, geçici ve kalıcı durum performansı açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

BÖLÜM 4. MİKRO ŞEBEKENİN ENERJİ YÖNETİMİ VE DENETİMİ

Bu bölümde yapılan çalışmalar ve analizlerde ilgili referans temel alınmıştır [16, 108-109], böylece literatür analizi yapılmıştır. Tez kapsamında önerilen özgünlük Bölüm 3'te yer almaktadır. Bu bölüm mikro şebeke sistemlerine odaklanmaktadır. Temel alınan mikro şebeke, PV, SOFC, batarya ve yüklerden oluşmaktadır. Bu sistemde, PV birincil enerji kaynağı olarak önceliklendirilmektedir. SOFC sistemi ekstra güç talebini sağlamak için kullanılmaktadır. SOFC'nin geçici hâldeki yavaş reaksiyon süreci, batarya tarafından telafi edilmektedir. Sistemin enerji yönetimi iki denetiminde gerçekleştirilmektedir. Hava koşulları istatistiklerini ve yük koşullarını kullanan ikincil denetimci, mikro şebekenin güç bileşenleri (yani PV, SOFC, batarya ve şebeke bağlantılı evirici) için referans noktaları belirlemektedir. Birincil denetimci ikincil denetiminin referans noktalarının mikro şebekenin bileşenleri tarafından doğru bir şekilde takip edilmesini sağlamaktadır. Gerilim regülasyonu, güç aktarımı, yük değişimleri, verimlilik ve frekans ile ilişkili olarak sistemin kararlılığını ve etkinliğini doğrulamak amaçlı MATLAB/Simulink™ simülasyon ortamı kullanılmıştır.

4.1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynaklarının öngörülemeyen doğası, kirlilik endişeleri ve talepteki sürekli artış, araştırmacıları mikro şebeke veya hibrit güç sistemi tasarlamaya motive etmiştir. Bir hibrit sistemde veya mikro şebekede, birbirinin etkisini telafi eden birkaç enerji kaynağı entegre edilir. Bu şekilde her bir enerji kaynağının en iyi performans ve verim değerleri elde edilebilmektedir [110–112]. Bununla birlikte, optimal bir mikro şebeke sistemi modellenirken birçok zorluk ve kaygı ortaya çıkmaktadır. Mikro şebeke sisteminin çeşitli bileşenleri arasında bileşenlere özgü denetimler esastır. Farklı yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan bir mikro şebeke, kullanışlı ve daha az maliyetlidir [113].

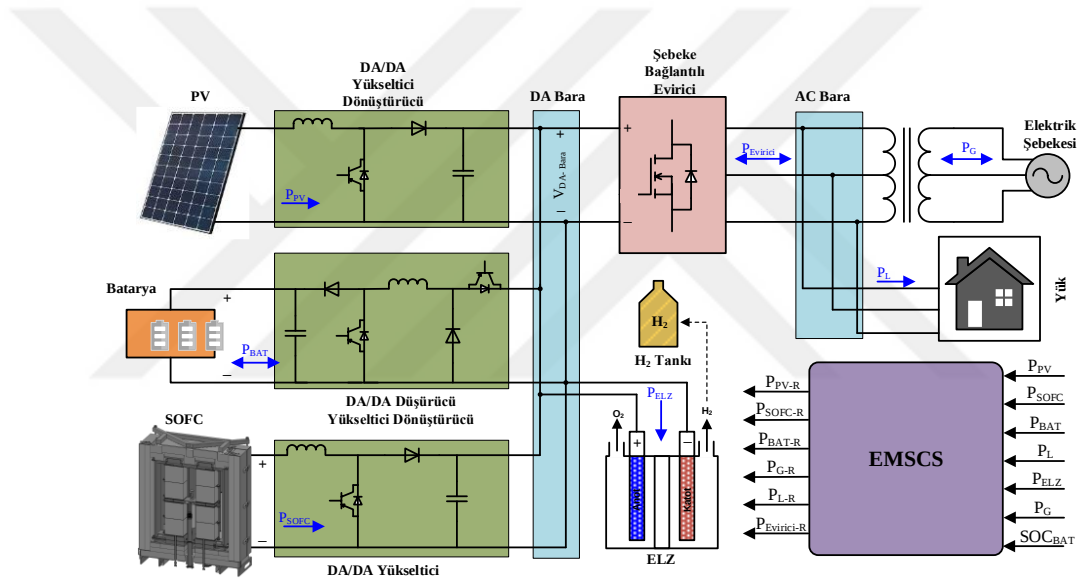
Yenilenebilir enerji kaynakları, örneğin PV güneş panelleri, hidro elektrik enerji ve rüzgâr santralleri, mikro şebeke için temel enerji kaynakları olarak kabul edilir. Ancak, en iyi performans için bu yenilenebilir enerji kaynaklarının uygun hava koşullarına ihtiyacı vardır [114]. Benzer şekilde, PV hibrit sistem, küçük PV izole sistemlerden daha uygun maliyetlidir [115]. Batarya depolamalı ve PV tabanlı mikro şebeke sistemleri örnekleri bulunmaktadır [116]. Mikro şebeke sisteminde yük değişimleri sırasında, enerji depolama sistemleri de mevcutsa, bu mikro şebekenin dayanıklılığını ve kararlılığını artırır [117-122]. Hidrojen enerjisi ve batarya gibi farklı enerji depolama sistemleri farklı mikro şebeke sistemlerinde farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Batarya hızlı anlık tepki ile daha yüksek enerji yoğunlukludur [123]. Bu nedenle güç sistemindeki hızlı güç değişimleri sırasında güç dengesini sağlarlar. SOFC'ler, yavaş dinamik tepki ile yüksek yoğunluklu güce sahiptir [78, 124-127]. Uzun vadeli enerji dengesi uygulamaları için daha uygundur. Bu nedenle, PV, SOFC, ve ELZ entegrasyonu genel performansı ve verimliliği artırmak için bir mikro şebeke sisteminde etkili bir çözüm olabilir.

Birçok çalışmada mikro şebeke sistemleri ve hibrit güç sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar incelenmiştir. Örneğin, mikro şebeke sisteminin boyut tahmini ve fiyat hesaplaması üzerine araştırmalar yapılmıştır [128–132]. Bir PV, SOFC ve batarya tabanlı mikro şebeke sistemi önerilmiştir [133]. Diğer bir çalışmada bir yakıt hücresi, ELZ ve dizel jeneratörden oluşan bir mikro şebeke çalışılmıştır [134]. PV/yakıt hücresi/rüzgâr güç yönetimi ve optimizasyonu açısından incelenmiştir [135]. Rüzgâr, ve batarya enerji sistemi ve faydaları tartışılmıştır [136]. Rüzgâr enerjisinin hidrojene dönüşümü ve batarya depolaması incelenmiştir [137]. Diğer benzer çalışmalar bulunmaktadır [138, 139].

Bazı çalışmalarda yüksek güç kalitesi elde etmek için mikro şebeke sistemleri tasarlanmıştır [140, 141]. Buna da benzer çalışmalar bulunmaktadır [142,143,144]. Bununla birlikte, yukarıda belirtilen çalışmaların bir dezavantajı vardır, çünkü gerçek zamanlı olmayan veriler kullanmışlardır.

4.2. Temel Alınan Mikro Şebekenin Yapısı

Şekil 4.1. temel alınan mikro şebeke sisteminin yapısını göstermektedir. DA bara PV, SOFC, ELZ, ve batarya'dan oluşan bileşenler arasındaki güç aktarımları bir Enerji Yönetim Merkezi Denetim Sistemi (EMSCS) aracılığıyla gerçekleşmektedir. Enerji yönetim sistemi, hava istatistiklerini ve yük koşullarını kullanarak PV, SOFC, batarya ve bir şebeke bağlantılı evirici gibi mikro şebeke bileşenleri için doğru referans çalışma noktalarını belirler. Konut yükü ve elektrik şebekesi AC baraya bağlıdır. Şebeke, üç fazlı bir şebeke bağlantılı evirici üzerinden DA baraya bağlanmış durumdadır.



Şekil 4.1. Temel alınan mikro şebekenin yapısı

4.3. Mikro Şebekenin Çalışma Prensipleri ve Denetimi

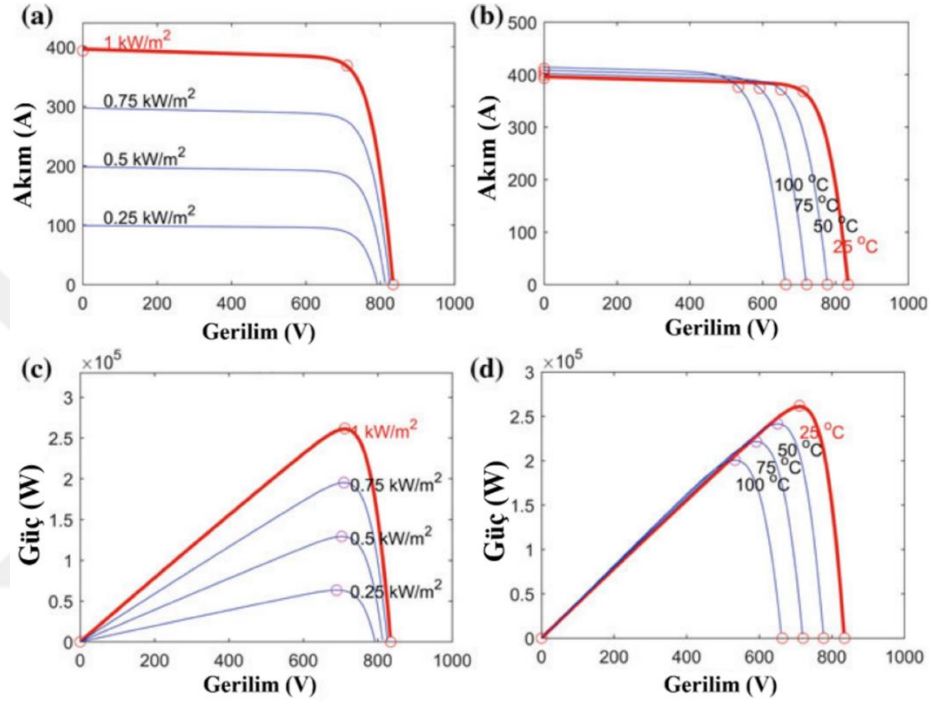
Bu bölüm, sistem bileşenlerini ve sistem denetimini açıklamaktadır.

4.3.1. PV model ve denetimi

PV tarafından üretilen çıkış gücü şu şekilde yazılır [144-147].

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1), PV enerji sisteminin davranışını modellemek için kullanılmaktadır. Hava ve yük akımındaki değişiklikler altında, PV enerji sisteminin çıkış gücünün değişimleri Şekil 4.2.'de sunulmuştur. Bölüm 2'de PV enerji sistemleri ve kontrolü ayrıntılı şekilde verilmiştir.



Şekil 4.2. PV P-V ve I-V eğrileri

4.3.2. SOFC modeli ve denetimi

SOFC elektrik üretmek için hidrojen kullanan önemli bir yakıt hücresi türüdür. Bu tezde, SOFC'nin dinamik modellemesi ve kontrolü yapılmaktadır. SOFC'nin ayrıntılı şekilde analizi ve kontrolü 3. bölümde bulunmaktadır [78, 115, 148].

4.3.3. ELZ modeli ve denetimi

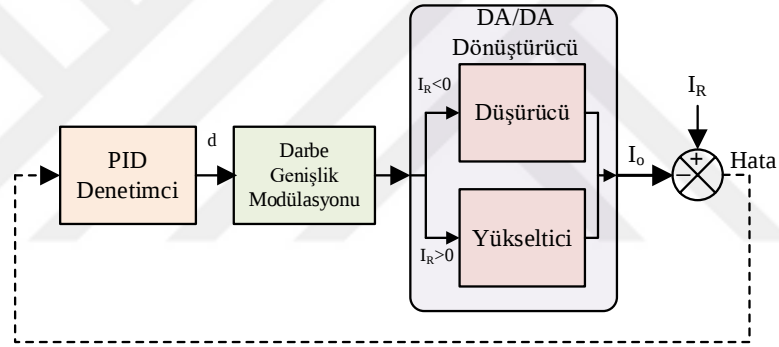
ELZ, hidrojen üretiminde elektrik gücünden yararlanır. Alkali ELZ iyi bilinir ve çok sayıda çalışmada tercih edilmiştir. ELZ'ün ayrıntılı modellemesi ve denetimi 3. bölümde bulunmaktadır.

4.3.4. Hidrojen tankı modeli

ELZ, SOFC'ye uygun miktarda hidrojen sağlarken, fazlası hidrojen tanklarına gönderilir. Hidrojen tankının ayrıntılı bir modellemesi ve denetimi 3. bölümde bulunmaktadır.

4.3.5. Batarya denetimi

Batarya, PID tabanlı DA/DA düşürücü yükseltici (buck-boost) dönüştürücüler aracılığıyla kontrol edilir. Ani güç talebi esnasında bataryadan DA baraya yeterli miktarda güç akışı sağlanır. Ani güç fazlası veya yük atma durumunda ise batarya DA baradan şarj edilerek artık güç miktarı mikro şebekeden alınır.



Şekil 4.3. Batarya denetimci

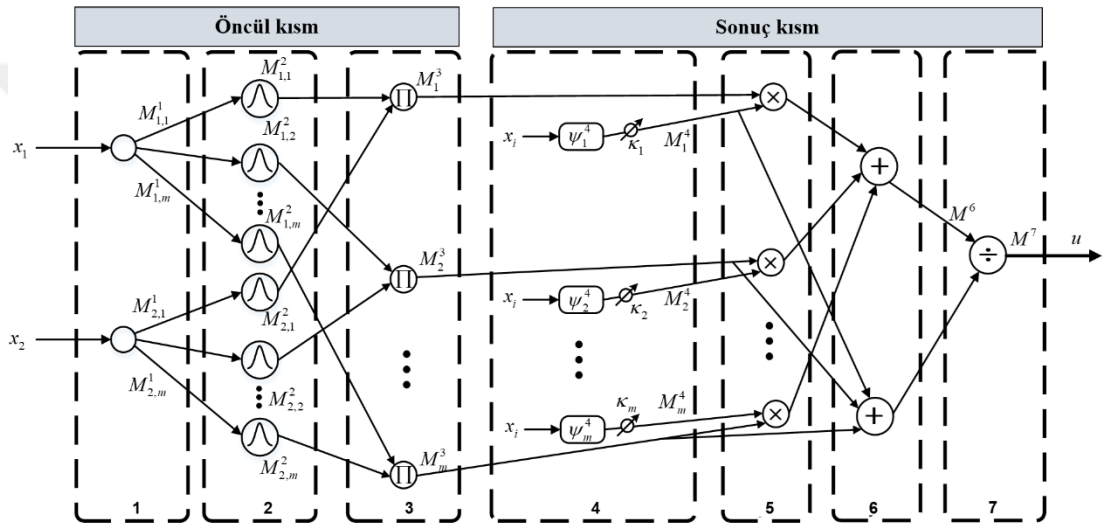
Bataryanın denetim şemaları sırasıyla Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Batarya hakkında daha fazla ayrıntı için ilgili referanslara bakılabilir [89, 118, 149].

4.3.6. Şebeke bağlantılı eviricinin denetimi

Şebekeye bağlı sistemin çalışması sırasında, AC barasına hem gerilimi hem de frekansı bozan birçok yük tipi (doğrusal/doğrusal olmayan) bağlanır. Geçerli problem için denetim kuralı aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
U_{inv} \big|_{t \rightarrow \infty} &= \left[y_{(P,Q)_{inv}}(t) \rightarrow y_{(P,Q)_{inv,ref}}(t) \right] \\
\max \eta_{(P,Q)_{inv}} &= \frac{\int_0^t (P,Q)_{inv}(t) dt}{\int_0^t (P,Q)_{ref}(t) dt} \\
\text{subjected to :} & \\
&\Delta THD_{load} < \pm 5\% \\
&\Delta f_{load} < \pm 8\%
\end{aligned} \tag{4.2}$$

(4.2) eşitliğinde P = aktif güç, Q= reaktif güç, η = verimlilik, ve f= frekans şeklindedir.



Şekil 4.4. ANFJW denetimsinin yapısı

Bu çalışmada, şebeke bağlantılı evirici Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Jacobi Dalgacık Denetimci (ANFJW) aracılığıyla kontrol edilmiştir. Aktif gücü kontrol etmek için bir denetimci ve reaktif gücü kontrol etmek için bir başka denetimci kullanılmıştır. Her bir denetimci, Şekil 4.4.'te gösterildiği gibi yedi katmanda modellenmiştir. İlk üç katman, öncül kısımdır ve sonraki dört katman, denetimsinin sonuç kısmıdır. İlk katmandaki girdilerin sayısı, girdi olarak daha fazla dağıtım için kullanılan düğümlerinin sayısına eşdeğerdir.

N_i^k ve M_i^k sırasıyla k^{th} katmanındaki bir düğümün giriş ve çıkışını tanımlar.

Birinci katman: Bu, sistemden veri alan giriş katmanıdır ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
N_i^1(k) &= x_i^1(k) \\
M_i^1(k) &= N_i^1(k) = x_i^1(k)
\end{aligned} \tag{4.3}$$

(4.3) eşitliğinde $i = 1, 2, \dots, m$ ve k ayrı ayrı düğüm sayısı tekrarlamayı göstermektedir. İkinci katman: Bu katmanda, bulanık sistem dilsel değişkenler ve bunların her bir girdiye üyelik derecesi girilmektedir.

$$N_i^2(k) = M_i^1(k) = x_i^1(k) \tag{4.4}$$

$$N_i^2(k) = \mu_i^2 = e^{-0.5 \left(\frac{N_i^2(k) - m_i}{\sigma_i} \right)^2} = e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \tag{4.5}$$

(4.4) ve (4.5) eşitliklerinde m_{ij} ve σ_{ij} merkez ve kabarcığın yayılımlarıdır.

Üçüncü katman: Bu katmanda üyelik fonksiyonunun çarpımı gerçekleştirilir. M_{in} operatörü çıkış değerini bulmak için kullanılmıştır ve (4.6)-(4.7) eşitlikleri ile ifade eder.

$$N_i^3(k) = M_i^2 = \mu_i^2 = e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \tag{4.6}$$

$$M_i^3(k) = \mu_i^3 = \prod_{i=1}^m \mu_i^2 = \prod_{i=1}^m e^{-0.5 \left(\frac{x_i^1(k) - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \tag{4.7}$$

Dördüncü katman: Jacobi dalgacık fonksiyonu (Jacobi wavelet function) bu katmanda kullanılmıştır ve (4.8) eşitliği ile ifade edilir.

$$\psi_{nq}^{\alpha, \beta}(x) = \begin{cases} 2^{0.5h} \lambda_q^{\alpha, \beta} (2^h x - 2n + 1), & \forall \frac{n-1}{2^{h-1}} \leq x < \frac{n}{2^{h-1}} \\ 0, & o.w \end{cases} \tag{4.8}$$

Burada;

$$\lambda_q^{\alpha,\beta} = \sqrt{\frac{(2q+\alpha+\beta+1)\Gamma(2q+\alpha+\beta+1)m!}{2^{\alpha+\beta+1}\Gamma(q+\alpha+1)\Gamma(q+\beta+1)}} \quad (4.9)$$

$$J_q^{\alpha+\beta} = \sum_{i=0}^q \binom{q+\alpha}{i} \binom{q+\beta}{q-i} \left(\frac{k-1}{2}\right)^{q-i} \left(\frac{k+1}{2}\right)^i, \quad k \in [-1,1] \quad (4.10)$$

$x = N_i^4$ ve bu katmanın girdisi $N_i^4(k) = \psi_{nq}^{\alpha+\beta}(N_i^4)$ ’dir. Bu katmanın çıktısı (4.11) eşitliği ile ifade edilir.

$$M_i^4 = f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q \in \mathbb{Z}} \kappa_{nq} \psi_{nq}^{\alpha+\beta}(x) \quad (4.11)$$

Temel amaç, referans gücü ile talep gücü arasındaki hatayı azaltmaktır. Denetimci, e hatası üzerinde çalışır (4.12) eşitliği ile ifade edilir. Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi, e referans gücü ile talep gücü arasındaki farktır.

$$e = [e_p = P_I^* - P_I \text{ \& } e_q = Q_I^* - Q_I] \quad (4.12)$$

Beşinci katman: Bu katmanda, öncül ve sonuç bölümlerinin çıktısı çarpılmış ve ardından her girdi toplanmıştır.

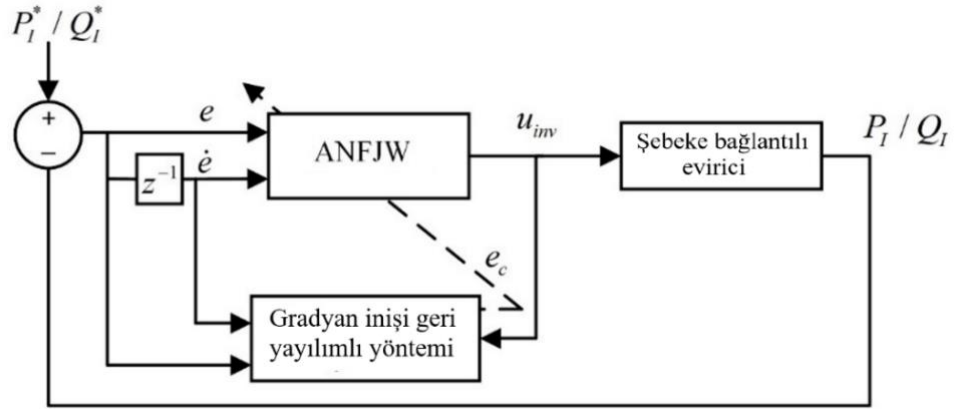
$$M_i^5(k) = \sum_{i=1}^m \beta_i^4 \mu_i^3 \quad (4.13)$$

Altıncı katman: Kuralların toplamı (üçüncü katman çıktısı) bu katmanda gerçekleştirilir ve (4.14) eşitliği ile ifade eder.

$$M_i^6(k) = \sum_{i=1}^m \mu_i^3 \quad (4.14)$$

Yedinci katman: Bu katmanda ANFJW denetimsinin çıktısı hesaplanır ve (4.15) eşitliği ile ifade eder.

$$u_{inv} = M_i^7(k) = \frac{M_i^5(k)}{M_i^6(k)} = \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i^4 \mu_i^3}{\sum_{i=1}^m \mu_i^3} \quad (4.15)$$



Şekil 4.5. Temel alınan stratejinin çalışması

Bu çıkış, şebeke bağlantılı eviricinin kontrolünde referans işaretleri üretmek için kullanılır. Minimize edilecek amaç fonksiyonu ise aşağıdaki gibi verilir (4.16) eşitliği ile ifade eder.

$$E = \frac{1}{2}(y_d - y)^2 + \frac{l}{2}u_{inv}^2 \quad (4.16)$$

Güncellenecek parametreler (4.17) eşitliği ile ifade eder.

$$\xi = [m, \sigma, c]^T \quad (4.17)$$

Bu parametreler, gradyan inişi geri yayılım yöntemiyle çevrimiçi olarak güncellenir. Gradyan inişi geri yayılımı tabanlı güncelleme (4.18)-(4.20) eşitlikleri ile ifade eder.

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \frac{\partial E}{\partial \xi} \quad (4.18)$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{2} (y_d - y)^2 + \frac{lu_{inv}^2}{2} \right) \quad (4.19)$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \left[-e \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} + lu_{inv} \right] \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} \quad (4.20)$$

$$e = y_d - y$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \left[-e \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} + lu_{inv} \right] \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} \quad (4.21)$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \left[-e \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} + lu_{inv} \right] \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} \quad (4.22)$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \left[-\left(e \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} - lu_{inv} \right) \right] \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} \quad (4.23)$$

$$\xi(k+1) = \xi(k) + \lambda \aleph \frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi} \quad (4.24)$$

$$\aleph = -\left(e \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} - lu_{inv} \right) = -(y_d - y) \frac{\partial y}{\partial u_{inv}} - lu_{inv} \quad (4.25)$$

(4.25) eşitliğinde $\frac{\partial y}{\partial u_{inv}} = 1$, ve $\frac{\partial u_{inv}}{\partial \xi}$ zincir kuralı (chain rule) kullanılarak hesaplanır. Güncellenen denklemler (4.26)-(4.28) aşağıdaki gibi yazılır.

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) + \lambda \aleph \frac{\partial u_{inv}}{\partial c_{ij}} \quad (4.26)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) + \lambda \aleph \frac{\partial u_{inv}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.27)$$

$$m_{ij}(k+1) = m_{ij}(k) + \lambda \aleph \frac{\partial u_{inv}}{\partial m_{ij}} \quad (4.28)$$

Bireysel parametreler için kısmi türevin hesaplanması (4.18)-(4.20) eşitlikleri ile ifade eder.

$$\frac{\partial u_{inv}}{\partial c_{ij}} = \frac{\partial u_{inv}}{\partial X_i^4} \frac{\partial X_i^4}{\partial c_{ij}} \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial u_{inv}}{\partial c_{ij}} = \frac{Y_i^2}{Y_i^6} X_i^4 \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} &= \left[-\frac{Y_i^3 u_{INV}}{Y_i^6} + \frac{X_i^4}{Y_i^6} \right] Y_i^3 \cdot 2 \frac{(k_i - \sigma_{ij})}{m_{ij}^2} \\ &= \frac{Y_i^6 \frac{\partial}{\partial Y_i^3} (Y_i^5) - (Y_i^5) \frac{\partial}{\partial Y_i^3} (Y_i^6)}{(Y_i^6)^2} \frac{\partial Y_i^3}{\partial \sigma_{ij}} \\ &= \frac{X_i^4 Y_i^6 - Y_i^5 \cdot 1}{(Y_i^6)^2} \frac{\partial Y_i^3}{\partial \sigma_{ij}} = \left[\frac{Y_i^2 - u_{inv}}{Y_i^6} \right] \frac{\partial Y_i^3}{\partial \sigma_{ij}} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Burada;

$$Y_i^3(k) = \mu_i^3 = \prod_{i=1}^m \mu_i^2 = \prod_{i=1}^m e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k_i - m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)^2} \quad (4.32)$$

Bu nedenle, Denklem (4.32) şu şekilde değişir.

$$= \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^m \mu_i^2 \cdot \frac{\partial \mu_i^2}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial u_{inv}}{\partial \sigma_{ij}} = \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^m \mu_i^2 \left[\mu_i^2 \frac{2(k_i - \sigma_{ij})}{m_{ij}^2} \right] \quad (4.34)$$

Benzer biçimde olarak elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{INV}}{\partial m_{ij}} &= \frac{\partial u_{INV}}{\partial \mu_i^3} \frac{\partial \mu_i^3}{\partial m_{ij}} = \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \frac{\partial \mu_i^3}{\partial m_{ij}} \\ &= \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \prod_{i=1, i \neq j}^m \mu_i^2 \left[\mu_i^2 \frac{2(k_i - \sigma_{ij})^2}{m_{ij}^3} \right] \\ &= \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \mu_i^3 \cdot \frac{2(k_i - \sigma_{ij})^2}{m_{ij}^3} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Denklem (4.20), (4.34) ve (4.35)'ün Denklem (4.25–4.28) içinde yerine yazılarak aşağıdaki güncellenmiş (4.36)-(4.38) eşitlikleri ile ifade eder.

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) + \lambda \mathcal{N} \left[\frac{Y_i^2}{Y_i^6} X_i^4 \right] \quad (4.36)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) + \lambda \mathcal{N} \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^m \mu_i^2 \left[\mu_i^2 \frac{2(k_i - \sigma_{ij})}{m_{ij}^2} \right] \quad (4.37)$$

$$m_{ij}(k+1) = m_{ij}(k) + \lambda \mathcal{N} \left[\frac{X_i^4 - u_{inv}}{\mu_i^3} \right] \mu_i^3 \cdot \frac{2(k_i - \sigma_{ij})^2}{m_{ij}^3} \quad (4.38)$$

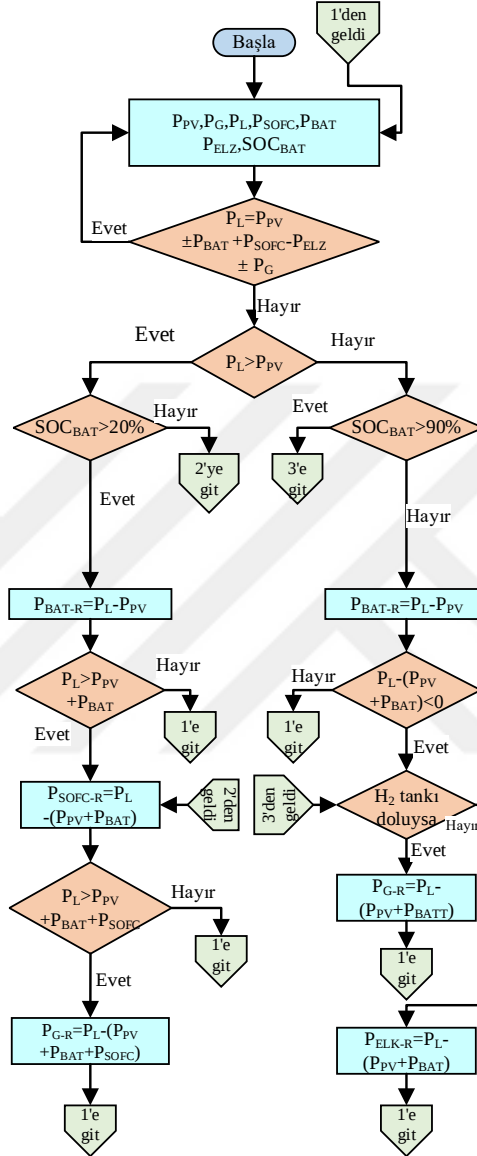
4.4. EMSCS'nin Çalışması

Temel alınan algoritma kullanılarak gerekli güç talebini sağlamak için Şekil 4.6.'da gösterildiği gibi bir enerji yönetim sistemi tasarlanmıştır. 75 ev için mikro şebekeyi kontrol etmek için bir durum çalışması dikkate alınmıştır.

Tablo 4.1. Sistem parametreleri

Sembol	Açıklama
P_L	Yük gücü
P_G	Şebekesi gücü
P_{Bat}	Batarya gücü
P_{PV}	PV gücü
P_{SOFC}	SOFC gücü
P_{BAT-R}	Bataryanın referans gücü
P_{ELZ}	Elektrolizör'nin gücü
P_{SOFC-R}	SOFC'nin referans gücü
P_{ELZ-R}	Elektrolizör'nin gücü referans gücü
P_{G-R}	Şebeke referans gücü

Durum çalışması, gerçek yük değişimleri ve gerçek hava koşulları kullanılarak yapılmıştır. Bu senaryoda gerçeğe uygun olarak PV performansı, güneş ışınlamı (W/m^2) ve sıcaklıktaki ($^{\circ}C$) değişimle değişmektedir



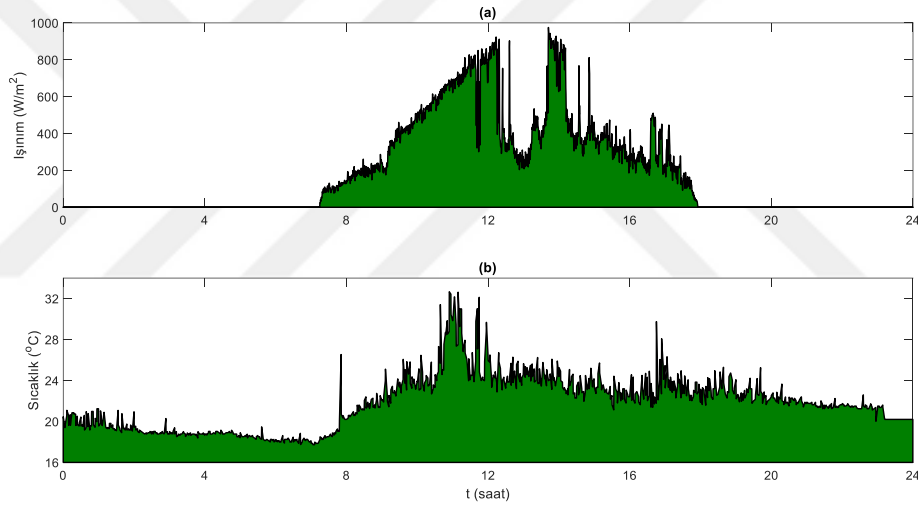
Şekil 4.6. EMS-CS'nin akış şeması

Sıcaklık her saatte bir ölçülürken güneş ışınlamı her yarım saatte bir izlenmiştir. Hane başına maksimum yük 2.8 kW ve ortalama yük 2.02 kW olarak alınmıştır. Tepe yük saat 18.00'da başlayıp 21.00'da sona ermektedir. Güneş ışınlamı, sıcaklık ve yük tahmini dikkate alınarak 7aşağıdaki kontrol algoritması kullanılarak EMS-CS gerçekleştirilmektedir. Temel alınan algoritmaya göre, net yük talebi PV'nin güç

üretiminden karşılanmalıdır. PV net talebi sağlayamıyorsa, şarj seviyesi %20'nin üzerindeyse batarya kalan gücü sağlayacaktır. PV ve batarya bankası toplam talebi karşılayamazsa, SOFC'den kalan güç alınacaktır. Hala bir güç gereksinimi varsa, şebeke bunu sağlayacaktır (durum 3). Benzer şekilde, eğer PV talepten daha fazla güç üretiyorsa, kalan güç bataryaya aktarılacaktır. Batarya şarj değerleri %90'ın üzerinde ise artık güç hidrojen üretmek için kullanılacaktır. Hala bir güç varsa, kalan güç şebekeye aktarılacaktır. Parametrelerin açıklamaları Tablo 4.1.'de tanımlanmıştır.

4.4.1. EMSCS sonuçları ve tartışması

Şekil 4.7.'de, gündeğümü saat 07.00'de ve gün batımı 17.20'de oluşmaktadır. Günlük güneş ışıınının ortalama değeri 990 (W/m^2) olarak ölçülmüştür.



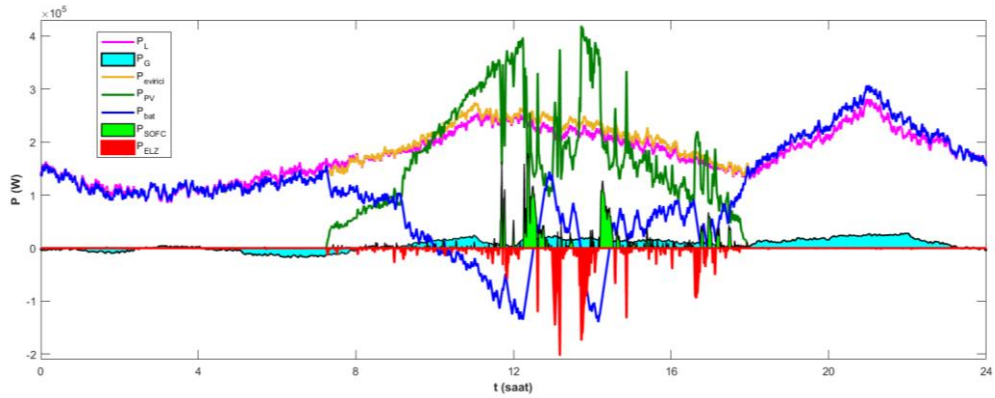
Şekil 4.7. Hava koşulları verileri (a) güneş ışıması ve (b) sıcaklık

Şekil 4.8. PV tarafından üretilen gücü göstermektedir (yeşil olarak gösterilmiştir), batarya (mavi olarak gösterilmiştir) şebeke bağlantılı evirici (turuncu olarak gösterilmiştir), SOFC (parlak yeşil olarak gösterilmiştir), ELZ (kırmızı olarak gösterilmiştir) elektrik şebekesi (turkuaz olarak gösterilmiştir) ve toplam yük talebi (pembe olarak gösterilmiştir).

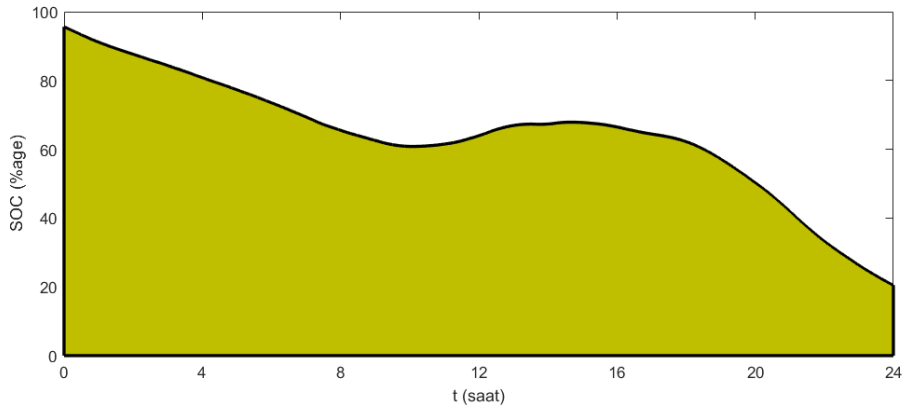
$t = 00.00$ 'dan 07.10'a kadar, güneş ışığının olmaması nedeniyle PV çıkış gücü sıfırdır. Toplam yük batarya sisteminden elde edilmektedir. Bu aralık sırasında, EMSCS bataryanın şarj durumunu kontrol etmektedir ve şarj durumu %20'den fazla olduğu için

batarya gerekli net gücü sağlayabilmiştir. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi batarya şarj durumu %68'e düşmüştür.

Saat $t = 07.10 - 09.00$ 'a kadar PV ve bataryanın her biri 90 kW güç sağlamıştır ve batarya şarj durumu yaklaşık %62'dir. EMSCS hala durum 1'de çalışmaktadır. Saat $t = 09.00 - 09.48$ arası batarya ve PV sisteminden kümülatif güç kaynağı 231 kW'dır ve toplam talep 198 kW'dır. 33 kW güç sistemde fazladır. Bu nedenle, ELZ sistemden 33 kW güç emmiştir. Saat $t = 09.45$ ila 11.35 arasında, PV yüke ve ELZ'ye yeterli güç sağlamış ve ayrıca batarya şarj etmiştir. Hava koşulları sebebiyle, PV çıkış gücü $t = 11.31 - 11.39$, 12.10 – 13.27 ve 14.03 – 14.40 saatlerinde aniden düşmüştür. Bu zamanda, SOFC ve elektrik şebekesi mikro şebekeye gerekli gücü sağlamıştır. $t = 14.40 - 17.36$ aralığında, PV çıkış gücü akşam saatlerinden dolayı düşmeye başlamıştır.

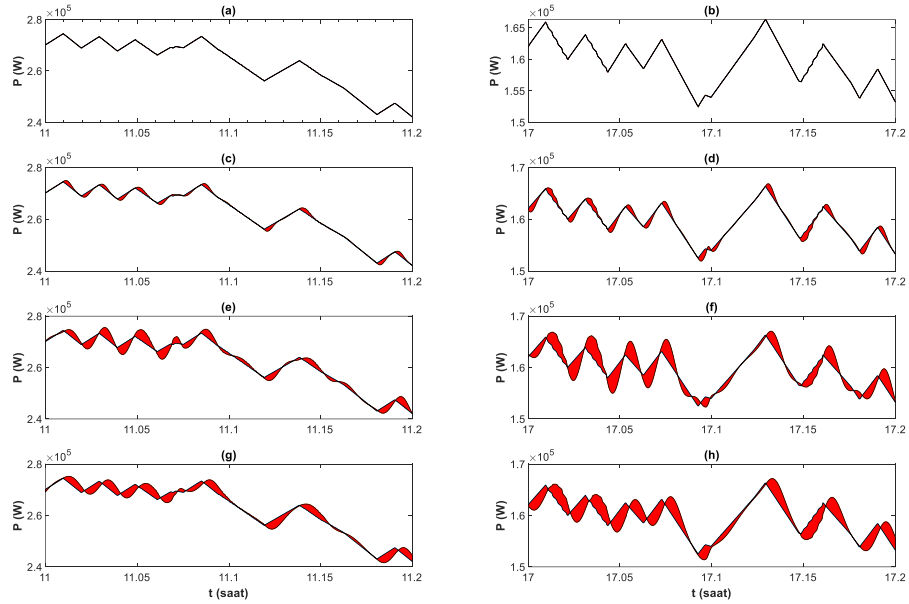


Şekil 4.8. Enerji kaynakları arasında güç alışverişi ve paylaşımı



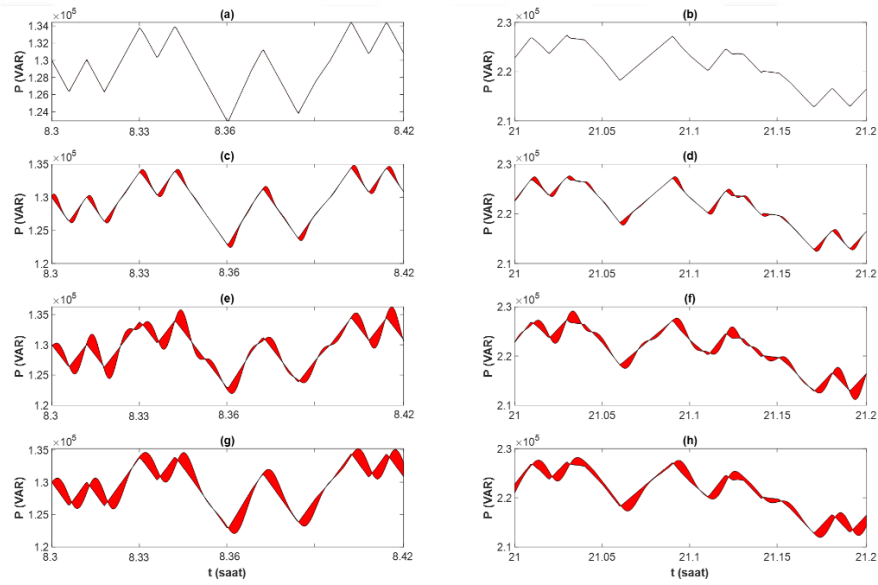
Şekil 4.9. Bataryanın şarj durumu

Batarya, güç eksikliğini karşılamıştır. $t=17.35 - 18.18$ saatleri arasında batarya, SOFC ve şebeke, eksik güç nedeniyle mikro şebeke gücüne destek sağlamıştır. $t = 18.15$ ila 24.00'de batarya, PV'nin çıkış gücü sıfırdır, şebeke ve batarya, yük talebini sağlamıştır ve batarya şarj durumu %22'edüşmüştür. Bu şekilde PV, batarya, SOFC, şebeke ve yük arasındaki güç alışverişi ve paylaşımı EMSCS aracılığıyla 24 saat boyunca gerçekleşmiş olmaktadır. Daha iyi güç kalitesi ve DA baradan sistemin geri kalanına güç akışı için şebeke bağlantılı evirici, ANFJW denetimcileri aracılığıyla kontrol edilmiştir. ANFJW denetimcilerinin sonuçları, klasik akıllı denetimciler NFC ve FLC ve ayrıca geleneksel denetimci (PID) ile karşılaştırılmıştır. Saat $t = 11.00$ ve 21.00 'de sırasıyla 245 kW ve 285 kW'lık iki tepe noktası (yük) vardır. Yakınlaştırılan şekiller, farklı denetimcilerin performansını ayrıntılı olarak göstermektedir. Örneğin, Şekil 4.10. aktif güç aktarımı açısından şebeke bağlantılı eviricinin performansını vermektedir. Yakınlaştırılan şekillerden açıkça görüleceği üzere (yani $t=11.00-11.20$ ve $t= 17.00-17.20$) denetimci (ANFJW) referans sinyali çok doğru bir şekilde takip etmiştir.

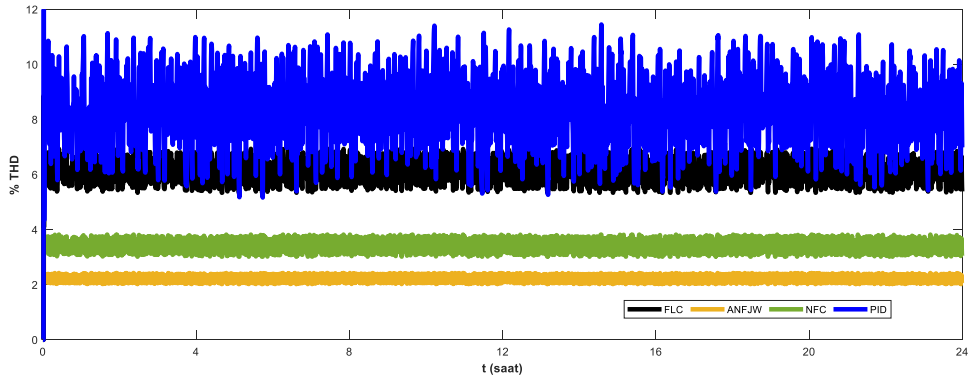


Şekil 4.10. Aktif güç (a-b) ANFJW, (c-d) NFC, (e-f) FLC, (g-h) PID

Diğer denetimciler referans sinyalini aşmalar nedeniyle tam izleyememektedir. Benzer şekilde, Şekil 4.11. reaktif güç aktarımı açısından şebeke bağlantılı eviricinin performansını vermektedir. Örneğin, Şekil 4.11.'teki yakınlaştırılmış kısım (yani $t=8.30-8.42$ ve $t=21.00-21.20$) denetimci referans gücünü çok hızlı bir şekilde takip etmiş, diğer denetimciler ise aşımalarla takip etmiştir. ANFJW denetimcileri hem aktif hem de reaktif güç aktarımı için farklı aralıklarda daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca, tüm denetimcilerin THD ve frekans açısından güç kalitesi analizleri yapılmış ve sırasıyla Şekil 4.12.-4.13.'te gösterilmiştir. IEEE standartlarına göre frekans ve THD için standart limitler sırasıyla ± 0.8 ve ± 5 'tir.

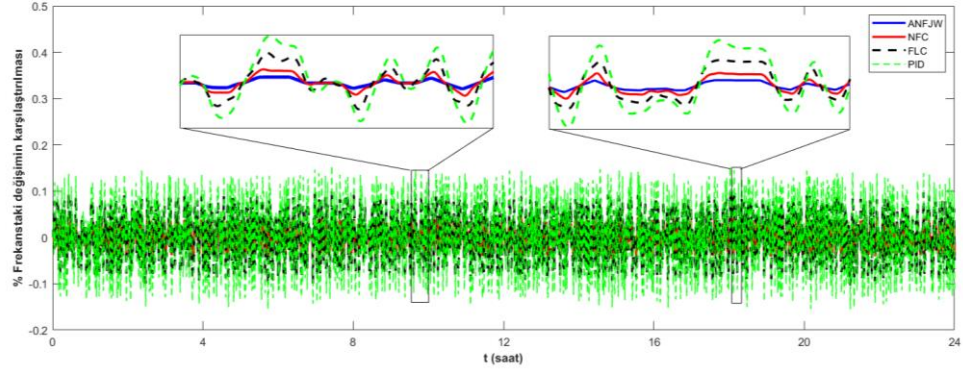


Şekil 4.11. Reaktif güç (a-b) ANFJW, (c-d) NFC, (e-f) FLC, (g-h) PID

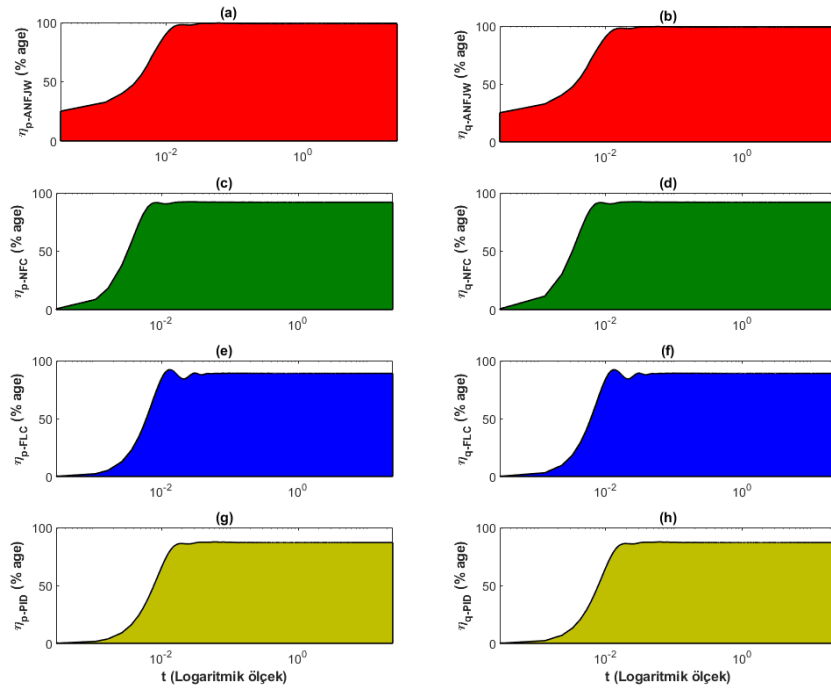


Şekil 4.12. THD karşılaştırması

Bu çalışmada yük geriliminin etkin değer ve frekans referans değerleri sırasıyla 440 V ve 50 Hz'dir. Şekil 4.12.'de gösterilen THD, ANFJW denetimci ile %2.23 civarındadır. Benzer şekilde, Şekil 4.13.'teki yakınlaştırılmış pencerelerde farklı aralıklarla görülebileceği gibi, frekanstaki değişim %0.02'nin altındadır.



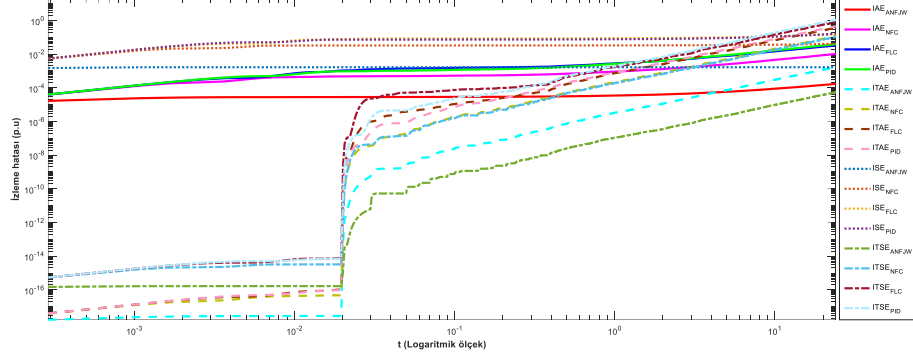
Şekil 4.13. Frekanstaki değişimin karşılaştırılması



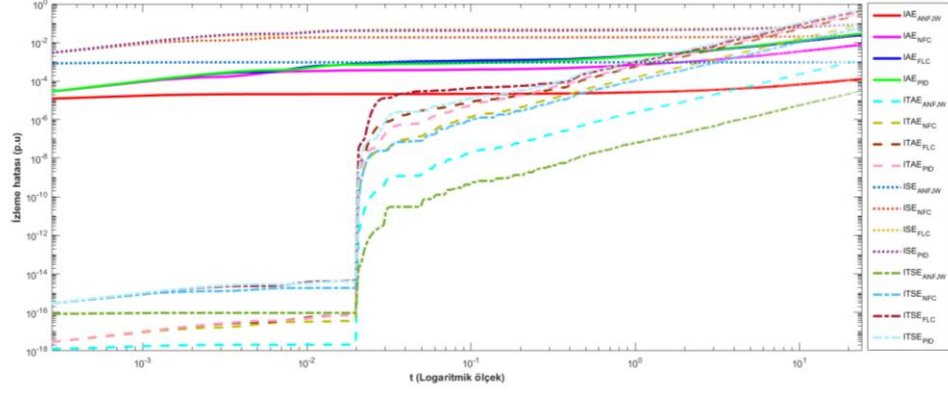
Şekil 4.14. Güç verimliliği (a, c, e, g) aktif ve (b, d, f, h) reaktif güç

Performansı daha iyi göstermek için, Denklem (4.2)'i kullanan tüm denetimler için şebeke bağlantılı eviricinin verimliliği 24 saat için hesaplanmıştır ve Şekil 4.14.'te

gösterilmiştir. ANFJW denetimcileri ile inverterin aktif ve reaktif güç aktarım verimleri daha yüksektir.



Şekil 4.15. Dinamik aktif güç performans



Şekil 4.16. Dinamik reaktif güç performans

Tablo 4.2. Verimleri ve dinamik tepki karşılaştırması

Denetimci	Çıkış gücü	η_{IN} (%)	THD (%)	IAE (p.u)	ITAE (p.u)	ISE (p.u)	ITSE (p.u)
ANFJW	Aktif	98.98	2.23	0.00019	0.00178	0.00171	0.00071
	Reaktif	99.02		0.00015	0.00154	0.00101	0.00004
NFC	Aktif	92.06	3.42	0.0145	0.1212	0.0444	0.1101
	Reaktif	92.14		0.099	0.0945	0.0246	0.0642
FLC	Aktif	90.04	6.20	0.0378	0.3942	0.1621	0.8115
	Reaktif	89.57		0.0284	0.2924	0.0887	0.4612
PID	Aktif	86.98	8.40	0.0405	0.4620	0.1688	1.114
	Reaktif	87.12		0.0315	0.3542	0.0984	0.6145

Daha fazla analiz için, indeks parametreleri (yani IAE, ISE, ITAE, ITSE, MRE) aracılığıyla tüm denetimcilerin dinamik performansı, Şekil 4.15. ve 4.16.'da gösterilmiştir. ANFJW denetimci durumunda, tüm indeks parametreleri çok daha küçüktür ve bu da üstün bir dinamik performans göstermektedir. Tüm karşılaştırmalar Tablo 4.2.'de özetlenmiştir.

4.5. Sonuçlar

Bu bölümde, şebeke bağlantılı eviricinin uyarlanabilir NFC tabanlı kontrolü ve bir mikro şebekenin merkezi enerji yönetim sistemi sunulmuştur. Klasik NFC'deki iyileştirme, Jacobi dalgacığının entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu güç aktarımı, şebeke bağlantılı evirici verimliliği ve yük geriliminin frekansı ve THD'ü açısından iyi sonuçlar vermiştir. EMSCS, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak, 24 saat gücün sürekliliği sağlamak ve olumsuz hava koşulları ve yetersiz depolama altında çıkış gücündeki farklılıkların azaltılmasını sağlamak için hem ayrı ayro her bir bileşeni hem de tüm sistemi kontrol etmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu bölüm tezin ana sonuçlarını, önemli bulguları ve gelecekteki çalışmalarını özetlenmiştir.

5.1. Sonuçlar

Uygun denetim yöntemleri ve enerji yönetim sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından iyi bir performans ve verim elde etmek için gereklidir. Yenilenebilir enerji santrallerinin çalışması ve enerji dönüşüm verimliliği, doğru denetim yönteminin seçimine bağlıdır. Bu nedenle bu tezde, güneş PV enerji sistemlerinin ve SOFC'nin en iyi performansı sağlaması için yeni gelişmiş denetim yöntemleri önerilmiştir. Güneş PV enerji sistemlerinin tüm hava koşullarında yüksek güç sağlayamayabilir. Bu yüzden, yeni uyarlamalı NFC, B-spline fonksiyonlarının yardımı ile güneş PV enerjisi sisteminin MGİ performansını daha iyi hale getirilmiştir. B-spline fonksiyonu tanım aralıklarının sınırlarında yüksek özyineleme özellikleri gösterir, böylece denetiminin çevrimiçi uyarlama yeteneğini geliştirir. PV sisteminin performansı, enerji dönüşüm verimliliği, dinamik cevabı ve dayanıklılık açısından önemli ölçüde iyileşmeler sağlanmıştır. B-spline yöntemi ile PV sisteminin enerji dönüşüm verimliliği ticari düzeyde oldukça iyi bir oran olan %97.07 seviyesinde oluşmuştur. Temel alınan denetimin dayanıklılığı, güç değişimleri ve gerçek zamanlı ani çevresel değişiklikler gibi belirsizlikler altında doğrulanmıştır.

Bu tezin bir diğer önemli katkısı da SOFC'nin denetimi olmuştur. SOFC'nin yavaş dinamik tepkiye sahip olması en önemli sakıncalarından biridir. Bu nedenle, bu tezde SOFC'nin bu sorunu önerilen yeni bir denetimci ile çözülmüştür. Legendre dalgacık tabanlı yeni NFC geliştirilmiştir. Böylece SOFC'nin verimliliği %5.04 civarında artmıştır. Ayrıca geleneksel ve akıllı denetimcilerle karşılaştırıldığında, çıkış gerilimi,

yakıt kullanımı, enerji dönüşüm verimliliği, geçici ve kalıcı durum performansı açısından da iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Dağıtık üretimli bir mikro şebeke sisteminde, geniş fonksiyon yelpazesi nedeniyle en kritik parçalardan biri şebeke bağlantılı eviricidir. Bu tezde, şebeke bağlantılı eviricinin yeni bir geliştirilmiş uyarlamalı NFC'si önerilmiştir. Bu amaçla, yeni bir uyarlamalı NFC denetimcisi geliştirilmiştir. Önerilen denetimci ile şebeke bağlantılı eviricinin aktif ve reaktif güç aktarım verimleri yükselmiştir ve tüm performans indeks parametreleri çok daha küçük sonuçlanmıştır. Bu da üstün bir dinamik performans ispatlamaktadır.

Son olarak, bir mikro şebekede yenilenebilir enerji kaynakları için yeni bir merkezi enerji yönetim sistemi çalışılmıştır. Temel alınan sistemde enerji yönetimi iki denetiminde (birincil ve ikincil) gerçekleştirilmektedir. Hava durumu istatistiklerini ve yük koşullarını kullanan ikincil denetimci, mikro şebekenin bileşenlerini (PV, SOFC, battarya ve şebeke bağlantılı evirici) için referans noktaları belirler. Birincil denetimci, ikincil denetimcinin referans noktalarının mikro şebekenin bileşenleri tarafından doğru bir şekilde takip edilmesini sağlar. EMSCS, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak, 24 saat gücün sürekliliğini sağlamak, yenilenebilir kaynakları optimum şekilde kullanmak, olumsuz hava koşulları ve yetersiz depolama altında gücün sürekliliğini sağlamak için hem tek tek bütün bileşenleri hem de sistemin bütünü kontrol etmektedir.

5.2. Gelecek Çalışmalar

Bu tez yenilenebilir enerji kaynakları için yüksek performanslı denetim yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak denetim konusu, yenilenebilir enerji sistemleri anlamında oldukça geniş bir çalışma alanıdır. Bu tezde araştırma çalışmaları aşağıdaki çalışma konuları ile genişletilebilir.

- PV enerji sistemi için çalışılan denetimci, rüzgâr ve SOFC sistemlerinde de uygulanabilir ve geliştirilebilir.

- Benzer şekilde, yakıt hücresinin yeni denetimcisi hem PV'de hem de rüzgâr enerji sistemlerine uygulanabilir.
- Önerilen ve çalışılan denetimcilerin, laboratuvar ölçeğinde deneysel doğrulaması gelecekteki en önemli çalışma olarak görülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] www.aa.com.tr/en/economy/global-renewables-use-15-higher-than-last-year-iea/1829726., Erişim Tarihi: 20.12.2021.
- [2] www.statista.com/statistics/799098/global-clean-energy-investment-by-country/., Erişim Tarihi: 20.12.2021.
- [3] Hassan, S.Z., Mumtaz, S., Kamal, T., Khan, L., Performance of grid-integrated photovoltaic/fuel cell/ electrolyzer/battery hybrid power system. Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies., Islamabad, 1–8, 2015.
- [4] Liang, X., Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. IEEE Trans Ind Appl., 53(2): 855–866, 2016.
- [5] Kumar, S., Jain, C., Singh, B., Adaptive pseudo-linear control for grid-supportive PV system. IET Gener Transm Distrib., 13(9): 1653–1660, 2019.
- [6] Ali, K., Khan, L., Khan, Q., Ullah, S., Ahmad, S., Mumtaz, S., Robust integral backstepping based nonlinear mppt control for a pv system. Energies., 12(16): 3180, 2019.
- [7] Zhong, Q.C., Weiss, G., Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition., Seattle, 1–6, 2009.
- [8] Al Sayari, N., Chilipi, R., Barara, M., An adaptive control algorithm for grid-interfacing inverters in renewable energy based distributed generation systems. Energy Convers Manag., 111: 443–452, 2016.
- [9] Smida, M.Ben., Sakly, A., Different conventional strategies of pitch angle control for variable speed wind turbines. 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering., Hammamet, 803–808, 2014.
- [10] Jurado, F., Saenz, J.R., Neuro-fuzzy control for autonomous wind–diesel systems using biomass. Renew energy., 27(1): 39–56, 2002.

- [11] Minai, A.F., Malik, H., Metaheuristics paradigms for renewable energy systems: advances in optimization algorithms. in: *Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications*. 1st Edition, Springer, Singapore, 35–61, 2021.
- [12] Arul, P.G., Ramachandaramurthy, V.K., Rajkumar, R.K., Control strategies for a hybrid renewable energy system. A review. *Renew Sustain energy Rev.*, 42: 597–608, 2015.
- [13] Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M.S., Moghavvemi, M., Energy management strategies in hybrid renewable energy systems. A review. *Renew Sustain Energy Rev.*, 62: 821–835, 2016.
- [14] Zhou, L., Zhang, Y., Lin, X., Li, C., Cai, Z., Yang, P., Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms. *IEEE access.*, 6: 41050–41059, 2018.
- [15] Milan, C., Bojesen, C., Nielsen, M.P., A cost optimization model for 100% renewable residential energy supply systems. *Energy.*, 48(1): 118–127, 2012.
- [16] Kamal, T., Hassan, S.Z., Espinosa-Trujillo, M.J., Li, H., Flota, M., An optimal power sharing and power control strategy of photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system. *J Renew Sustain Energy.*, 8(3): 035301, 2016.
- [17] Wang, X., Yang, K., Economic load dispatch of renewable energy-based power systems with high penetration of large-scale hydropower station based on multi-agent glowworm swarm optimization. *Energy Strateg. Rev.*, 26: 100425, 2019.
- [18] Singh, S., Singh, M., Kaushik, S.C., Optimal power scheduling of renewable energy systems in microgrids using distributed energy storage system. *IET Renew Power Gener.*, 10(9): 1328–1339, 2016.
- [19] Zheng, Y., Li, S., Xu, S., Transport oil product consumption and GHG emission reduction potential in China: An electric vehicle-based scenario analysis. *PLoS One.*, 14(9): e0222448, 2019.
- [20] Kamal, T., Karabacak, M., Hassan, S. Z., Li, H., Fernández-Ramírez, L. M. (2018). A robust online adaptive B-spline MPPT control of three-phase grid-coupled photovoltaic systems under real partial shading condition. *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, 34(1): 202-210, 2018.
- [21] <https://www.economist.com/node/11565685>., Erişim Tarihi: 21.12.2021.
- [22] Sera, D., Mathe, L., Kerekes, T., Spataru, S.V., Teodorescu R. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE J photovoltaics.*, 3(3): 1070–1078, 2013.

- [23] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli M. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. *IEEE Trans Power Electron.*, 20(4): 963–973, 2005.
- [24] Yamashita, H., Tamahashi, K., Michihira, M., Tsuyoshi, A., Amako, K., Park, M., A novel simulation technique of the PV generation system using real weather conditions. *Proceedings of the IEEE.*, Osaka, 839–844, 2002.
- [25] Salameh, ZM., Dagher, F., Lynch, W.A., Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems. *Sol Energy.*, 46(5): 279–282, 1991.
- [26] Hamdy, M.A., A new model for the current-voltage output characteristics of photovoltaic modules. *J Power Sources.*, 50(1–2): 11–20, 1994.
- [27] ESRAM, T., Kimball, J.W., Krein, P.T., Chapman, P.L., Midya, P., Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control. *IEEE Trans power Electron.*, 21(5): 1282–1291, 2006.
- [28] Safari, A., Mekhilef, S., Incremental conductance MPPT method for PV systems. *24th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.*, Niagara Falls, 345–347, 2011.
- [29] Noguchi, T., Togashi, S., Nakamoto, R., Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system. *IEEE Trans Ind Electron.*, 49(1): 217–223, 2002.
- [30] Gokmen, N., Karatepe, E., Ugrasli, F., Silvestre, S., Voltage band based global MPPT controller for photovoltaic systems. *Sol Energy.*, 98: 322–334, 2013.
- [31] Tse, K.K., Ho, M.T., Chung, H.H., Hui, S.Y., A novel maximum power point tracker for PV panels using switching frequency modulation. *IEEE Trans power Electron.*, 17(6): 980–989, 2002.
- [32] Salas, V., Olías, E., Barrado, A., Lázaro, A., Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Sol Energy Mater Sol Cells.*, 90(11): 1555–1578, 2006.
- [33] Alajmi, B.N., Ahmed, K.H., Finney, S.J., Williams, B.W., Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System. *IEEE Trans Power Electron.*, 26(4): 1022–1030, 2011.
- [34] Jain, S., Agarwal, V., A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems. *IEEE power Electron Lett.*, 2(1): 16–19, 2004.

- [35] Li, X., Wen, H., Jiang, L., Lim, E.G., Du, Y., Zhao, C., Photovoltaic modified β -parameter-based MPPT method with fast tracking. *J Power Electron.*, 16(1): 9–17, 2016.
- [36] De Brito, M.A.G., Galotto, L., Sampaio, L.P., e Melo, G de A., Canesin, C.A., Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE Trans Ind Electron.*, 60(3): 1156–1167, 2012.
- [37] Li, X., Wen, H., Zhao, C., Improved beta parameter based mppt method in photovoltaic system. 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, Seoul, 1405–1412, 2015.
- [38] M.P, A., S, K., Linear quadratic optimal control of solar photovoltaic system: An experimental validation. *J Renew Sustain Energy.*, 8(5): 53502, 2016.
- [39] Shabrina, H.N., Setiawan, E.A., Sabirin, C.R., Designing of new structure PID controller of boost converter for solar photovoltaic stability. *AIP Conference Proceedings.*, AIP Publishing, 20026, 2017.
- [40] Algaddafi, A., Altuwayjiri, S.A., Ahmed, O.A., Daho, I., An Optimal Current Controller Design for a Grid Connected Inverter to Improve Power Quality and Test Commercial PV Inverters. *Sci World J.*, 1-13, 2017.
- [41] Armghan, H., Ahmad, I., Armghan, A., Khan, S., Arsalan, M., Backstepping based non-linear control for maximum power point tracking in photovoltaic system. *Sol Energy.*, 159: 134–141, 2018.
- [42] Hu, J., Xu, Y., Cheng, K.W., Guerrero, J.M., A model predictive control strategy of PV-Battery microgrid under variable power generations and load conditions. *Appl Energy.*, 221: 195–203, 2018.
- [43] Wu, H., Adaptive robust stabilisation of uncertain nonlinear dynamical systems: an improved backstepping approach. *Int J Control.*, 91(1): 114–131, 2018.
- [44] Wai, R.J., Wang, W.H., Lin, C.Y., High-performance stand-alone photovoltaic generation system. *IEEE Trans Ind Electron.*, 55(1): 240–250, 2008.
- [45] Farhat, M., Barambones, O., Sbita, L., A new maximum power point method based on a sliding mode approach for solar energy harvesting. *Appl Energy.* 185: 1185–1198, 2017.
- [46] Lee, H., Utkin, V.I., Chattering suppression methods in sliding mode control systems. *Annu Rev Control.*, 31(2): 179–188, 2007.
- [47] Edwards, C., Fossas Colet, E., Fridman, L., Advances in variable structure and sliding mode control, Vol. 334, Springer Verlag, 2006.

- [48] Nguyen, GMT., Uchida, K., Active and Reactive Power Control Techniques Based on Feedback Linearization and Fuzzy Logic for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters. *Asian J Control.*, 17(5): 1522–1546, 2015.
- [49] Franco, ALD., Bourlès, H., De Pieri, ER., Guillard H. Robust nonlinear control associating robust feedback linearization and H_{∞} control. *IEEE Trans Automat Contr.*, 51(7): 1200–1207, 2006.
- [50] Mao, M., Zhang, L., Duan, Q., Oghorada OJK, Duan P, Hu B. A two-stage particle swarm optimization algorithm for MPPT of partially shaded PV arrays. *Int J Green Energy.*, 14(8): 694–702, 2017.
- [51] Oshaba, A.S., Ali, E.S., Abd Elazim SM. PI controller design using artificial bee colony algorithm for MPPT of photovoltaic system supplied DC motor-pump load. *Complexity.*, 21(6): 99–111, 2016.
- [52] Larbes, C., Cheikh, SMA., Obeidi, T., Zerguerras, A., Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system. *Renew energy.*, 34(10): 2093–2100, 2009.
- [53] Selvi, V., Umarani, D.R., Comparative analysis of ant colony and particle swarm optimization techniques. *Int J Comput Appl.*, 5(4): 1-6, 2010.
- [54] Khanaki, R., Mohd Radzi, MA., Marhaban, M.H., Artificial neural network based maximum power point tracking controller for photovoltaic standalone system. *Int J Green Energy.*, 13(3): 283–291, 2016.
- [55] Bouchafaa, F., Hamzaoui, I., Hadjammar, A., Fuzzy Logic Control for the tracking of maximum power point of a PV system. *Energy Procedia.*, 6: 633–642, 2011.
- [56] Logeswaran, T., Senthilkumar, A., Karuppusamy, P., Adaptive neuro-fuzzy model for grid-connected photovoltaic system. *Int J Fuzzy Syst.*, 17(4): 585–594, 2015.
- [57] Karatepe, E., Hiyama, T., Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions. *IET Renew Power Gener.*, 3(2): 239–253, 2009.
- [58] Liu, Y.H., Liu, C.L., Huang, J.W., Chen, J.H., Neural-network-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments. *Sol Energy.*, 89: 42–53, 2013.
- [59] Cheng, P.C., Peng, B.R., Liu, Y.H., Cheng, Y.S., Huang J-W. Optimization of a fuzzy-logic-control-based MPPT algorithm using the particle swarm optimization technique. *Energies.*, 8(6): 5338–5360, 2015.

- [60] Abu-Rub, H., Iqbal, A., Ahmed, SM., Adaptive neuro-fuzzy inference system-based maximum power point tracking of solar PV modules for fast varying solar radiations. *Int J Sustain Energy*, 31(6): 383–398, 2012.
- [61] Wang, C.H., Wang, W.Y., Lee, T.T., Tseng, P.S., Fuzzy B-spline membership function (BMF) and its applications in fuzzy-neural control. *IEEE Trans Syst Man Cybern.*, 25(5): 841–851, 1995.
- [62] Badar, R., Khan, L., Hybrid NeuroFuzzy B-spline wavelet based SSSC control for damping power system oscillations. 15th IEEE International Multitopic Conference., Islamabad, 80–87, 2012.
- [63] Wang, K., Lei, B., Using B-spline neural network to extract fuzzy rules for a centrifugal pump monitoring. *J Intell Manuf.*, 12(1): 5–11, 2001.
- [64] Khan, L., Badar, R., Hybrid adaptive neuro-fuzzy B-spline--based SSSC damping control paradigm using online system identification. *Turkish J Electr Eng Comput Sci.*, 23(2): 395–420, 2015.
- [65] Das, D., Esmaili, R., Xu, L., Nichols D. An optimal design of a grid connected hybrid wind/photovoltaic/fuel cell system for distributed energy production. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society., Raleigh, NC, 2499–2504, 2005.
- [66] Mukerjee, AK., Dasgupta, N., DC power supply used as photovoltaic simulator for testing MPPT algorithms. *Renew Energy*, 32(4): 587–592, 2007.
- [67] Ruano, AE., Cabrita, C., Oliveira J V, Kóczy LT. Supervised training algorithms for B-spline neural networks and neuro-fuzzy systems. *Int J Syst Sci.*, 33(8): 689–711, 2002.
- [68] Dos, Santos., Coelho, L., Assunção, R., B-Spline Neural Network Using an Artificial Immune Network Applied to Identification of a Ball-and-Tube Prototype. *Soft Computing in Industrial Applications Springer.*, 92–101, 2007.
- [69] Sayed, T., Tavakolie, A., Razavi, A., Comparison of adaptive network based fuzzy inference systems and B-spline neuro-fuzzy mode choice models. *J Comput Civ Eng.*, 17(2): 123–130, 2003.
- [70] Zhang, J., Van Le, K., Knoll, A., Unsupervised learning of control surfaces based on B-spline models. *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems.*, Barcelona, 1725–1730, 1997.
- [71] Nasir S. Microfinance in India: Contemporary issues and challenges. *Middle-east J Sci Res.* 15(2): 191–199 2013.

- [72] Lee, C.H., Teng, C.C., Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks. *IEEE Trans Fuzzy Syst.*, 8(4): 349–366, 2000.
- [73] Kamal, T., Karabacak, M., Blaabjerg, F., Zulqadar Hassan, S., Fernández-Ramírez, L.M., A novel Lyapunov stable higher order B-spline online adaptive control paradigm of photovoltaic systems. *Sol Energy.*, 194: 530–540, 2019.
- [74] <http://www.pmd.gov.pk/met.gov/pmdservices.html>, Erişim Tarihi: 22.12.2021.
- [75] Huang, B., Qi, Y., Murshed, AKMM., Dynamic modeling and predictive control in solid oxide fuel cells: first principle and data-based approaches. *John Wiley & Sons.*, 1-345, 2013.
- [76] Hassan, S.Z., Li, H., Kamal, T., Mumtaz, S., Khan, L., Fuel Cell/Electrolyzer/Ultra-capacitor hybrid power system: Focus on integration, power control and grid synchronization. *13th IEEE International Conference on Applied Sciences and Technology.*, Bhurban, 231–237, 2016.
- [77] Nehrir, M.H., Wang, C., Modeling and control of fuel cells: distributed generation applications. *John Wiley & Sons.*, 1-316, 2009.
- [78] Das, T., Snyder, S., Adaptive control of a solid oxide fuel cell ultra-capacitor hybrid system. *IEEE Proceedings of the American Control Conference.*, San Francisco, 3892–3898, 2011.
- [79] Meacham, J.R., Jabbar, F., Brouwer, J., Mauzey, J.L., Samuelsen, G.S., Analysis of stationary fuel cell dynamic ramping capabilities and ultra capacitor energy storage using high resolution demand data. *J Power Sources.*, 156(2): 472–479, 2006.
- [80] Campanari, S., Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module. *J Power Sources.*, 92(1): 26–34, 2001.
- [81] Sedghisigarchi, K., Feliachi, A., Control of grid-connected fuel cell power plant for transient stability enhancement. *Power Engineering Society Winter IEEE Meeting.*, New York, 383–388, 2002.
- [82] Mueller, F., Brouwer, J., Jabbari, F., Samuelsen S. Dynamic simulation of an integrated solid oxide fuel cell system including current-based fuel flow control. *J Fuel Cell Sci Technol.*, 3(2): 144–154, 2006.
- [83] Schmittinger, W., Vahidi, A., A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. *J Power Sources.*, 180(1): 1–14, 2008.

- [84] Drolia, A., Jose, P., Mohan, N., An approach to connect ultracapacitor to fuel cell powered electric vehicle and emulating fuel cell electrical characteristics using switched mode converter. IEEE Industrial Electronics Society 29th Annual Conference., Roanoke, VA, 897–901, 2003.
- [85] Thounthong, P., Raël, S., Davat, B., Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle. J Power Sources., 158(1): 806–814, 2006.
- [86] Allag, T., Das, T., Robust control of solid oxide fuel cell ultracapacitor hybrid system. IEEE Trans Control Syst Technol., 20(1): 1–10, 2012.
- [87] Sun, J., Kolmanovsky, I.V., Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: A robust nonlinear reference governor approach. IEEE Trans Control Syst Technol. 13(6): 911–920, 2005.
- [88] Vahidi, A., Stefanopoulou, AG., Peng H., Current management in a hybrid fuel cell power system: A model-predictive control approach. IEEE Trans Control Syst Technol., 14(6): 1047–1057, 2006.
- [89] Uzunoglu, M., Alam, M.S., Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications. Energy Convers Manag., 48(5): 1544–1553, 2007.
- [90] Hassan, S.Z., Li, H., Kamal, T., Hussain, I., Khan, A., Espinosa-Trujillo, M.J., A coordinated power control strategy combined fuel cell/electrolyzer/supercapacitor/battery power generation and grid integration. Sci Int., 28(5): 4489–4499, 2016.
- [91] Hajizadeh, A., Golkar, MA., Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system. Int J Electr Power Energy Syst., 29(10): 783–795, 2007.
- [92] Zhang, T., Feng, G., Rapid load following of an SOFC power system via stable fuzzy predictive tracking controller. IEEE Trans Fuzzy Syst., 17(2): 357–371, 2009.
- [93] Chen, Q., Long, R., Quan, S., Zhang, L., Nonlinear recurrent neural network predictive control for energy distribution of a fuel cell powered robot. Sci World J., 1-10, 2014.
- [94] Rauh, A., Senkel, L., Aschemann H. Interval-based sliding mode control design for solid oxide fuel cells with state and actuator constraints. IEEE Trans Ind Electron., 62(8): 5208–5217, 2015.

- [95] Fliess, M., Lévine, J., Martin, P., Rouchon, P., Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples. *Int J Control.*, 61(6): 1327–1361, 1995.
- [96] Sesha, AKM., Abdelrahman M. Linear-quadratic-integral controller for a solid oxide fuel cell. 42nd Southeastern IEEE Symposium System Theory., Tyler, TX, 90–95, 2010.
- [97] Ahmed, A., Ullah, MS., Input–Output Linearization-Based Controller Design for Stand-Alone Solid Oxide Fuel Cell Power Plant. *Arab J Sci Eng.*, 41(9): 3543–3558, 2016.
- [98] Das, T., Slippey, A., Observer based transient fuel utilization control for solid oxide fuel cells. *ASME dynamic systems and control conference.*, Cambridge, 743-750, 2010.
- [99] Fardadi, M., Mueller, F., Jabbari, F., Feedback control of solid oxide fuel cell spatial temperature variation. *J Power Sources.*, 195(13): 4222–4233, 2010.
- [100] Hajizadeh, A., Golkar, M.A., Fuzzy neural control of a hybrid fuel cell/battery distributed power generation system. *IET Renew Power Gener.*, 3(4): 402–414, 2009.
- [101] Golkar, M.A., Hajizadeh, A. Control strategy of hybrid fuel cell/battery distributed generation system for grid-connected operation. *J Zhejiang Univ A.*, 10(4): 488–496, 2009.
- [102] Qureshi, M.B., Qamar, S., Ali, SW., Khalid U. Recurrent neuro-fuzzy control of grid-interfaced solid oxide fuel cell system. *Communications.*, 9(1): 31–52, 2018.
- [103] Atakulreka, A., Sutivong, D., Avoiding local minima in feedforward neural networks by simultaneous learning. *Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence.*, Canberra, 100–109, 2007.
- [104] Lee, C.Y., Lin, C.J., A wavelet-based neuro-fuzzy system and its applications. *Intell Autom Soft Comput.*, 13(4): 385–403, 2007.
- [105] Abiyev, R.H., Kaynak. O., Identification and Control of Dynamic Plants Using Fuzzy Wavelet Neural Networks. *IEEE International Symposium on Intelligent Control.*, San Antonio, 1295–1301, 2008.
- [106] Nehrir, M.H., Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System. *IEEE Trans Energy Convers.*, 23(3): 957–967, 2008.

- [107] Huang, B., Qi, Y., Murshed, M., Solid oxide fuel cell: Perspective of dynamic modeling and control. *J Process Control.*, 21(10): 1426–1437, 2011.
- [108] Kamal, T., Karabacak, M., Perić, V. S., Hassan, S. Z., Fernández-Ramírez, L. M. Novel Improved Adaptive Neuro-Fuzzy Control of Inverter and Supervisory Energy Management System of a Microgrid. *Energies.*, 13(18), 4721, 2020.
- [109] Kamal, T., Fernández-Ramírez, L. M., Karabacak, M., Hassan, S. Z., Dynamic Operation and Supervisory Control of a Photovoltaic/Fuel cell/Supercapacitor/Battery Hybrid Renewable Energy System. *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* 1-6, 2019.
- [110] Onar, O.C., Uzunoglu, M., Alam, M.S., Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. *J Power Sources.*, 161(1): 707–722, 2006.
- [111] Agbossou, K., Kolhe, M., Hamelin, J., Bose, T.K., Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen. *IEEE Trans Energy Convers.*, 19(3): 633–640, 2004.
- [112] Garcia, P., Fernandez, L.M., Garcia, C.A., Jurado, F., Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway. *IEEE Trans Ind Electron.*, 57(12): 4013–4023, 2010.
- [113] Haruni, AMO., Negnevitsky, M., Haque, M.E., Gargoom, A., A Novel Operation and Control Strategy for a Standalone Hybrid Renewable Power System. *IEEE Trans Sustain Energy.*, 4(2): 402–413, 2013.
- [114] El Mnassri, M., Leger, A.S., Stand alone photovoltaic solar power generation system: A case study for a remote location in Tunisia. *IEEE PES General Meeting.*, Minneapolis, 1–4, 2010.
- [115] Saheb-Koussa, D., Koussa. M., Belhamel, M., Haddadi, M., Economic and environmental analysis for grid-connected hybrid photovoltaic-wind power system in the arid region. *Energy Procedia.*, 6: 361–370, 2011.
- [116] Jayasinghe, SDG., Vilathgamuwa, D.M., Madawala, U.K., Direct integration of battery energy storage systems in distributed power generation. *IEEE Trans Energy Convers.*, 26(2): 677–685, 2011.
- [117] Burke, A., Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *J Power Sources.*, 91(1): 37–50, 2000.

- [118] Hajizadeh, A., Golkar, M.A., Control of hybrid fuel cell/energy storage distributed generation system against voltage sag. *Int J Electr Power Energy Syst.*, 32(5): 488–497, 2010.
- [119] Zamora, R., Srivastava, A.K., Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renew Sustain Energy Rev.*, 14(7): 2009–2018, 2010.
- [120] Gyawali, N., Ohsawa, Y., Integrating Fuel Cell/Electrolyzer/Ultracapacitor System into a Stand-Alone Microhydro Plant. *IEEE Trans Energy Convers.*, 25(4): 1092–1101, 2010.
- [121] Thounthong, P., Chunkag, V., Sethakul, P., Sikkabut, S., Pierfederici, S., Davat, B., Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. *J Power Sources.*, 196(1): 313–324, 2011.
- [122] Yalcinoz, T., Alam, M.S., Improved dynamic performance of hybrid PEM fuel cells and ultracapacitors for portable applications. *Int J Hydrogen Energy.*, 33(7): 1932–1940, 2008.
- [123] Onar, O.C., Uzunoglu, M., Alam, M.S., Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system. *J Power Sources.*, 185(2): 1273–1283, 2008.
- [124] Allag, T., Das, T., Robust Control of Solid Oxide Fuel Cell Ultracapacitor Hybrid System. *IEEE Trans Control Syst Technol.*, 20(1): 1–10, 2011.
- [125] Thounthong, P., Sethakul, P., Analysis of a Fuel Starvation Phenomenon of a PEM Fuel Cell. *IEEE Power Conversion Conference.*, Nagoya, 731–738, 2007.
- [126] Francois, B., el Hadi, Lebbal M., Lecoeuche S., Real-Time Emulation of a Hydrogen-Production Process for Assessment of an Active Wind-Energy Conversion System. *IEEE Trans Ind Electron.*, 56(3): 737–746, 2009.
- [127] Wang, C., Nehrir, M.H., Shaw, S.R., Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits. *IEEE Trans Energy Convers.*, 20(2): 442–451, 2005.
- [128] Borowy, B.S., Salameh, Z.M., Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. *IEEE Trans Energy Convers.*, 11(2): 367–375, 1996.
- [129] Singh, C., Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm. *IEEE Trans Energy Convers.*, 24(1): 163–172, 2009.

- [130] Chedid, R., Rahman, S., Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems. *IEEE Trans Energy Convers.*, 12(1): 79–85, 1997.
- [131] Vrettos, EI., Papathanassiou, S.A., Operating Policy and Optimal Sizing of a High Penetration RES-BESS System for Small Isolated Grids. *IEEE Trans Energy Convers.*, 26(3): 744–756, 2011.
- [132] Saha, T.K., Kastha, D., Design optimization and dynamic performance analysis of a stand-alone hybrid wind–diesel electrical power generation system. *Energy Conversion, IEEE Trans.*, 25(4): 1209–1217, 2010.
- [133] Islam, S., Belmans, R., Grid independent photovoltaic fuel-cell hybrid system: optimal design and control strategy. 19th European photovoltaic solar energy., Paris 3311–3314, 2004.
- [134] Senjyu, T., Nakaji, T., Uezato, K., Funabashi, T., A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island. *IEEE Trans Energy Convers.*, 20(2): 406–414, 2005.
- [135] El-Shatter, T.F., Eskander, M.N., El-Hagry, M.T., Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system. *Energy Convers Manag.*, 47(9–10): 1264–1280, 2006.
- [136] Hassan, S.Z., Li H., Kamal, T., Awais, M., Stand-alone/grid-tied wind power system with battery/supercapacitor hybrid energy storage. *IEEE International Conference on Emerging Technologies.*, Peshawar, 1–6 2015.
- [137] Kamal, T., Hassan, S.Z., Li, H., Mumtaz, S., Khan, L., Energy management and control of grid-connected wind/fuel cell/battery Hybrid Renewable Energy System. *IEEE International Conference on Intelligent Systems Engineering.*, Islamabad, 161–166 2016.
- [138] Seul-Ki, Kim S.K., Jin-Hong Jeon, J.H., Chang-Hee, Cho C-H., Jong-Bo, Ahn J-B., Sae-Hyuk, Kwon S-H., Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer. *IEEE Trans Ind Electron.*, 55(4): 1677–1688, 2008.
- [139] Rahman, M.L., Oka, S., Shirai, Y., Hybrid Power Generation System Using Offshore-Wind Turbine and Tidal Turbine for Power Fluctuation Compensation (HOT-PC). *IEEE Trans Sustain Energy.*, 1(2): 92–98, 2010.
- [140] Muljadi, E., McKenna, HE., Power quality issues in a hybrid power system. *IEEE Trans Ind Appl.*, 38(3): 803–809, 2002.
- [141] Chowdhury, A.A., Koval, D.O., Probabilistic Wind Energy Modeling in Electric Generation System Reliability Assessment. *IEEE Trans Ind Appl.*, 47(3): 1507–1514, 2011.

- [142] Hua, C., Lin, J., Shen, C., Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Trans Ind Electron.*, 45(1): 99–107, 1998.
- [143] Hussein, K.H., Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proc - Gener Transm Distrib.*, 142(1): 59, 1995.
- [144] Dolara, A., Faranda, R., Leva, S., Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems. *J Electromagn Anal Appl.*, 1(3): 152-162, 2009.
- [145] Scarpa, V., Buso, S., Spiazzi G. Low-Complexity MPPT Technique Exploiting the PV Module MPP Locus Characterization. *IEEE Trans Ind Electron.*, 56(5): 1531–1538, 2009.
- [146] Ahmed, N.A., Miyatake, M., Al-Othman, A.K., Hybrid Solar Photovoltaic/Wind Turbine Energy Generation System with Voltage-based Maximum Power Point Tracking. *Electr Power Components Syst.*, 37(1): 43–60, 2008.
- [147] Bukar, A. L., Tan, C. W., A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy. *Journal of cleaner production.*, 221, 73-88, 2019.
- [148] Artuso, P., Gammon, R., Orecchini, F., Watson SJ. Alkaline electrolyzers: Model and real data analysis. *Int J Hydrogen Energy.*, 36(13): 7956–7962, 2011.
- [149] Wang, C., Nehrir, M.H., Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. *IEEE Trans energy Convers.*, 23(3): 957–967, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tariq KAMAL

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Doktora	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Comsats Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik Mühendisliği	2015
Lisans	Mühendislik ve Teknoloji Üniversitesi, Peşaver / Mühendislik Fakültesi / Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	İslamia Koleji, Peşaver	2008

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2014-2015	Comsats Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2014	Mühendislik ve Teknoloji Üniversitesi	Öğretim Üyesi

YABANCI DİL

İngilizce (C1), İspanyol (A1)

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

Dergi Makaleleri

1. Mahum Pervez, Tariq Kamal, Luis M. Fernández- Ramírez “A novel switched model predictive control of wind turbines using artificial neural network-Markov chains prediction with load mitigation” Ain Shams Engineering Journal, Vol-13, no.2 pp. 2022, 2021.
2. Ibrahim A Fadel, Hussein Alsanabani, Cemil Öz, Tariq Kamal, Murat Iskefiyeli, Fawzia Abdien “Hybrid fuzzy-genetic algorithm to automated discovery of prediction rules” Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,, Vol-40, no. 1 pp. 43-52, 2021.
3. Faizan Mehmod, Nouman Ashraf, Lourdes Alvarez , Tahir Nadeem Malik Hassaan Khaliq Qureshi, Tariq Kamal “Grid Integrated PV System with Fuzzy based MPPT Control along with Harmonic Elimination" Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 16 January 2020.
4. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Vedran S. Perić, Syed Zulqadar Hassan, Luis M. Fernández- Ramírez “Novel Improved Adaptive Neuro-fuzzy Control of Inverter and Supervisory Energy Management System of a Microgrid” Energies, Vol-13, pp. 4721, 2020.
5. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Fuat Kilic, Frede Blaabjerg, Luis M. Fernández- Ramírez “Fast Adaptive Robust Differentiator based Robust-Adaptive Control of Grid-Tied Inverters with a New L Filter Design Method" Energies, Vol-13, pp. 2, January 2020.

6. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Frede Blaabjerg, Syed Zulqadar Hassan, Luis M. Fernández- Ramírez "A Novel Lyapunov Stable Higher Order B-spline Online Adaptive Control Paradigm of Photovoltaic Systems" *Solar Energy*, Vol-194, pp. 530-540, December 2019.
7. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, and Luis M. Fernández- Ramírez, "A Robust Online Adaptive B-spline MPPT Control of Three-Phase Grid-Coupled Photovoltaic Systems under Real Partial Shading Condition" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol-34, Issue-1, pp. 202-210, March 2019.
8. Murat Karabacak, Luis M. Fernández-Ramírez, Tariq Kamal, Shyam Kamal, "A New Hill Climbing Maximum Power Tracking Control for Wind Turbines with Inertial Effect Compensation" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol-66, Issue- 11, pp. 8545-8556, November 2019.
9. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Syed Zulqadar Hassan, Luis M. Fernández-Ramírez, Muhammad Hussnain Riaz, Muhammad Tanveer Riaz, Muhammad Abbas Khan, Laiq Khan, "Energy Management and Switching Control of PHEV Charging Stations in a Hybrid Smart Micro-Grid System" in *Electronics*, 2018, 7, 156.
10. Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Tariq Kamal, Izhar Hussain, Maria Jesus Espinosa-Trujillo, Baris Cevher, "Load sharing and arrangement through an effective utilization of SOFC/supercapacitor/ battery in a hybrid power system" in *Iranian Journal of Science & Tec. Transactions of Electrical Engineering*, pp. 1-14, 2018.
11. Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, Maria Espinosa-Trujillo, Hui Li, Manuel Flota, "An Optimal Power Sharing and Power Control Strategy of Photovoltaic/FC/ UC Hybrid Power System" *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 3, 2016.

12. Syed Zulqadar Hassan, Tariq Kamal, Muhammad Hussnain Riaz, Syed Samir Hussain Shah, Muhammad Sarmad, Hina Gohar Ali, Muhammad Tanveer Riaz, Amir Zahoor, Muhammad Abbas Khan, Julio Pascual Miqueleiz, "Intelligent Control of Wind-Assisted PHEVs Smart Charging Station", Vol-12, Issue-5, Energies, March 2019.

Konferans Bildirileri

1. Tariq Kamal, Luis M. Fernández-Ramírez, Murat Karabacak, and Syed Zulqadar Hassan, "Adaptive control of inverter for grid-coupled photovoltaic systems under real uncertainty" in Control and Optimization of Renewable Energy Systems (CORES 2019), December 67, 2019, Anaheim, California, USA.
2. Tariq Kamal, Luis M. Fernández-Ramírez, Murat Karabacak, and Syed Zulqadar Hassan, "Dynamic operation and supervisory control of a photovoltaic/fuel cell super-capacitor/battery hybrid renewable energy system" in 1st IEEE International Conference Proceedings on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE-2019), July 24th-25th, 2019 Swat Serina Hotel Pakistan.
3. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Luis M. Fernández-Ramírez, Syed Zulqadar Hassan, Muhammad Hussnain Riaz, "Development of hybrid power supply monitoring system based on LabVIEW and MATLAB" in IEEE (PGSRET) in 4th Conference Proceedings, 10-12 September 2018.
4. Murat Karabacak, Tufan Volkan Kucuk, Ozhan Atmaca, Tariq Kamal, and Yasin Cantas, "Design and Implementation of a Wind Turbine Emulator for Wind Energy Conversion Systems" in proceedings 7th International Conference on Advanced Technologies at, 28 April-May 1, 2018, Antalya, Turkey.

5. Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Tariq Kamal, Jawad Ahmad, Muhammad Hussnain Riaz and Muhammad Abbas Khan, "Performance of Different MPPT Control Techniques for Photovoltaic Systems" in 5th International Conference on Electrical Engineering, UET Lahore, Pakistan from Feb. 15-16th, 2018.
6. Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Suayb Cagri Yener, Tariq Kamal and Gussan Mufti, "Integration and Simulation of Wind with Hydrogen/Battery Storage Hybrid System", IEEE Conference on Electrical Engineering, March 2, 2017 UET Lahore, Pakistan.
7. Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Tariq Kamal, Ugur Arifoglu, Ali Arsalan, Asif Kabir, "Design and control of wind/super-capacitor/battery/diesel engine power plant" in IEEE International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), 5-7 April, 2017.
8. Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Tariq Kamal, Malik Qamar Abbas, Muhammad Abbas Khan and Gussan Maaz Mufti, "An Intelligent Pitch Angle Control of Wind Turbine", 2017 IEEE International Symposium on Recent Advance on Electrical Engineering (RAEE17), Institute of Engineering and Applied Sciences, Islamabad, Pakistan from October 24-26, 2017.
9. Tariq Kamal, A. Kucuker, Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Gussan Mufti and M. Hamza, "Design and Control of Photovoltaic/Wind/Battery based Micro-grid System" IEEE Conference on Electrical Engineering, March 2-4, 2017 UET Lahore, Pakistan.
10. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Syed Zulqadar Hassan, Hui Li, Ali Arsalan, Rajprasad Kumar, Integration control of a off-grid hybrid wind/PV generation system for rural applications" in IEEE International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), 5-7 April, 2017.

11. Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, Muhammad Hussnain Riaz, Hui Li, Muhammad Sarmad and Gussan Maaz Mufti, "Design and Control of Photovoltaic/Microturbine/Super-Capacitor based Microgrid System", 20th IEEE International Multitopic Conference 2017 (INMIC 2017) at National University of Computer and Emerging Sciences (FAST-NUCES) Lahore campus, Pakistan from November 24-26, 2017.

12. Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, "Energy Management and Simulation of Photovoltaic/ Hydrogen/Super-capacitor Hybrid Power System", *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 11-18, 2016.

13. Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, Laiq Khan, Sidra Mumtaz, "Energy management and Control of Grid-Connected Wind/ Fuel Cell/ Battery Hybrid Renewable Energy System", in first IEEE International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE 2016).

14. Tariq Kamal, Mithulananthan Nadarajah, Umair Younas, Syed Zulqadar Hassan, Hina Gohar and Alfredo Vaccaro, "Intelligent MPPT Design of DC-DC Converter for PV in a PV/SC Hybrid Power System" *Proceedings of the 4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development*, November 01-03, 2016.

15. Mahum Pervez, Tariq Kamal, Luis M Fernandez-Ramirez, "Comparative study of modern control techniques for optimal dynamic nonlinear process control" in *IEEE proceedings of 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 14-18 Jan 2020, Islamabad, Pakistan.

Yayınladığı Kitaplar

1. Radu-Emil Precup, Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, "Solar Photovoltaic Power Plants: Advanced Control and Optimization Techniques", Springer Nature, March 2019.
2. Radu-Emil Precup, Tariq Kamal, Syed Zulqadar Hassan, "Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems", Springer Nature, March 2019.

Yayınladığı Kitap İçerikleri

1. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Syed Zulqadar Hassan, Luis M. Fernandez-Ramirez, Muhammad Hussnain Riaz, Muhammad Tanveer Riaz, Muhammad Abbas Khan, Laiq Khan, "Energy Management and Switching Control of PHEV Charging Stations in a Hybrid Smart Micro-Grid System", in Applications of Power Electronics, Vol 2, pp. 285-301, October 2019, ISBN 978-3-03921-149-4.
2. Tariq Kamal, Murat Karabacak, Syed Zulqadar Hassan, Luis M. Fernandez-Ramirez, Indrek Roasto, and Laiq Khan "An Indirect Adaptive Control Paradigm for Wind Generation Systems" in Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems Springer Nature March 2019.
3. Syed Zulqadar Hassan, Tariq Kamal, Sidra Mumtaz and Laiq Khan "An Online Self Recurrent Direct Adaptive Neuro-Fuzzy Wavelet Based Control of Photovoltaic Systems" in Solar Photovoltaic Power Plants: Advanced Control and Optimization Techniques Springer Nature March 2019.